

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

MARIA EDUARDA WALTER SAGAZ DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS E CIMENTÍCIOS
COM POLIESTIRENO EXPANDIDO ADICIONADO

Joinville

2025

MARIA EDUARDA WALTER SAGAZ DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS E CIMENTÍCIOS
COM POLIESTIRENO EXPANDIDO ADICIONADO

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, no Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Luciano Senff.

Joinville

2025

MARIA EDUARDA WALTER SAGAZ DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS E CIMENTÍCIOS
COM POLIESTIRENO EXPANDIDO ADICIONADO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, no Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 28 de novembro de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Senff
Orientador(a)/Presidente

Eng. Vinícius Ramon Krause
Membro
Perville Engenharia e Empreendimentos Ltda

Prof. Dr. Diego Alexandre Duarte
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Msc. Julia da Rosa Martins
Membra
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

A pessoa mais importante nessa caminhada, agradeço imensamente à minha mãe, que sempre me apoiou nos estudos e nunca me deixou desistir de algo que parecia apenas um sonho anos atrás e agora se torna realidade. Não há palavras suficientes para agradecer seu esforço em me proporcionar a oportunidade de estudar em uma universidade de nome tão renomado.

Agradeço ao meu pai pelo incentivo e apoio ao longo desses anos, e, com muito carinho, à minha Samanta, que sempre esteve presente, incentivando-me a continuar. Agradeço por ter sido, muitas vezes, uma ouvinte nos bons e maus momentos e por cada conselho dado nessa trajetória. A todos os meus familiares e amigos que estiveram presentes de alguma forma, apesar da distância, meus mais sinceros agradecimentos.

A todas as amizades feitas, agradeço o tempo que passamos juntos, nos estudos e nos momentos de descontração. Foram essas pessoas que tornaram a graduação mais leve e especial.

Ao professor Dr. Luciano Senff, agradeço pela oportunidade de ter sido sua bolsista de pesquisa ao longo de dois anos, pelo conhecimento transmitido, pela paciência e dedicação em compartilhar tantos ensinamentos. Sua contribuição foi fundamental e enriquecedora, tanto no âmbito acadêmico quanto pessoal.

Agradeço aos membros da banca examinadora pela disponibilidade, pelas valiosas contribuições e pelo tempo dedicado à leitura e avaliação deste trabalho, que certamente contribuíram para o meu crescimento acadêmico.

Por fim, a todos os professores que, ao longo da graduação, compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para a minha formação acadêmica, deixo meu profundo agradecimento.

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.
(Albert Einstein).

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver e avaliar o comportamento físico, mecânico e térmico de compósitos à base de matrizes geopoliméricas e cimentícias com adição de poliestireno expandido (EPS). Foram elaboradas doze formulações, seis de cada matriz, variando o teor de EPS em substituição ao volume de pasta, a fim de investigar o potencial de obtenção de materiais de menor densidade e desempenho adequado para aplicações não estruturais. Os ensaios realizados compreenderam a determinação da densidade aparente, resistência à compressão e análise visual após exposição térmica controlada a 200 °C e 400 °C, com validação dos resultados por meio do método de análise de variância – ANOVA. Os resultados demonstraram que a incorporação de EPS promoveu redução significativa da densidade aparente, passando de valores superiores a 1800 kg/m³ nas formulações referências para valores entre 366 e 690 kg/m³ nas misturas com 80% e 72,5% de EPS, confirmando a eficácia do polímero como agente leve. Observou-se também que o aumento do volume de EPS resultou em diminuição progressiva da resistência à compressão, embora algumas misturas, como a formulação geopolimérica com 70% de EPS, tenham apresentado equilíbrio favorável entre leveza e desempenho mecânico (densidade de 850 kg/m³ e resistência de 4,66 MPa aos 28 dias), destacando-se entre as alternativas avaliadas. Em relação ao comportamento térmico, as matrizes geopoliméricas exibiram maior estabilidade e menor incidência de fissuração após o aquecimento, preservando melhor a integridade superficial quando comparadas às cimentícias. Os resultados obtidos evidenciam o potencial de utilização do EPS em compósitos leves geopoliméricos e cimentícios, com destaque para o bom desempenho térmico e a viabilidade ambiental associada ao reaproveitamento de resíduos poliméricos.

Palavras-chave: cimento; geopolímero; poliestireno expandido.

ABSTRACT

This research aimed to develop and evaluate the physical, mechanical, and thermal behavior of composites based on geopolymer and cementitious matrices with the addition of expanded polystyrene (EPS). Twelve formulations were developed, six for each matrix, varying the EPS content to replace the paste volume, in order to investigate the potential for obtaining materials with lower density and adequate performance for non-structural applications. The tests performed included determining the apparent density, compressive strength, and visual analysis after controlled thermal exposure at 200 °C and 400 °C, with validation of the results using the analysis of variance (ANOVA) method. The results showed that the incorporation of EPS promoted a significant reduction in bulk density, from values above 1800 kg/m³ in the reference formulations to values between 366 and 690 kg/m³ in mixtures with 80% and 72.5% EPS, confirming the effectiveness of the polymer as a lightweighting agent. It was also observed that the increase in EPS volume resulted in a progressive decrease in compressive strength, although some mixtures, such as the geopolymer formulation with 70% EPS, showed a favorable balance between lightness and mechanical performance (density of 850 kg/m³ and strength of 4.66 MPa at 28 days), standing out among the alternatives evaluated. In terms of thermal behavior, the geopolymer matrices exhibited greater stability and less cracking after heating, better preserving surface integrity when compared to cementitious matrices. The results obtained highlight the potential for using EPS in lightweight geopolymer and cementitious composites, with emphasis on good thermal performance and environmental viability associated with the reuse of polymeric waste.

Keywords: cement; geopolymer; expanded polystyrene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de adições	21
Figura 2 – Grão de clínquer de cimento Portland com face cortada e polida	22
Figura 3 – Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de Ca^{2+} em solução (B) durante a hidratação do cimento Portland. Indicações das etapas de reação: (I): Estágio inicial; (II): Período de indução; (III): Período de aceleração; (IV): Período de desaceleração; e (V): Estágio final.....	23
Figura 4 – Gráficos moleculares representativos de estruturas geopoliméricas: polissialato e polissialato-siloxo.....	25
Figura 5 – Esquema do mecanismo de geopolimerização	29
Figura 6 – Processo de fabricação da matéria-prima de poliestireno.....	33
Figura 7 – Processo de transformação da matéria-prima (poliestireno).....	34
Figura 8 – Matérias primas utilizadas – a) Metacaulim, b) NaOH, c) Na_2SiO_3 , d) CPV-ARI, e) EPS, f) Água	36
Figura 9 – 1) Distribuição granulométrica do metacaulim, 2) Difração de raios-X do metacaulim	37
Figura 10 – Pérolas de EPS utilizadas	39
Figura 11 – Misturadora utilizada para a produção da pasta a) geopolimérica; b) cimentícia	43
Figura 12 – Ilustração do ensaio de índice de consistência	43
Figura 13 – Índice de consistência da pasta referência a) cimentícia; b) geopolimérica	44
Figura 14 – Corpos de prova da pasta geopolimérica moldados	45
Figura 15 – Corpos de prova geopoliméricos desmoldados a) 80; b) 75; c) 72,5; d) 70; e) 60; f) REF	45
Figura 16 – Corpos de prova cimentícios desmoldados a) 80; b) 75; c) 72,5; d) 70; e) 60; f) REF	46
Figura 17 – Mufla	47
Figura 18 – Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão das amostras REF, 60 e 70	48
Figura 19 – Prensa CBR utilizada para o ensaio de resistência à compressão das amostras 72,5, 75 e 80.....	49

Figura 20 – Amostras do ensaio na temperatura de 200°C a) antes do ensaio e b) após o ensaio.....	57
Figura 21 – Amostras do ensaio na temperatura de 400°C a) antes do ensaio e b) após o ensaio.....	57

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Etapas da metodologia experimental	41
Fluxograma 2 – Processo de produção dos corpos de prova geopoliméricos	42
Fluxograma 3 – Processo de produção dos corpos de prova cimentícios	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tendência à normalidade das densidades aparentes dos corpos de prova aos 28 dias de cura	51
Gráfico 2 – Dispersão dos resultados em função dos valores da densidade aparente dos corpos de prova aos 28 dias de cura.....	52
Gráfico 3 – Variação da densidade aparente dos corpos de prova considerando constante o tipo de matriz utilizada	53
Gráfico 4 – Resultados da média das densidades obtidas dos corpos de prova considerando constante a quantidade de EPS adicionado	54
Gráfico 5 – Tendência à normalidade das resistências à compressão dos corpos de prova aos 7 e 28 dias de cura	60
Gráfico 6 – Dispersão dos resultados em função dos valores da resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 e 28 dias de cura	61
Gráfico 7 – Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura das matrizes cimentícias e geopoliméricas com % de EPS adicionado.....	63
Gráfico 8 – Resultados da média das resistências à compressão obtidas dos corpos de prova considerando constante o tempo de cura e a quantidade de EPS adicionado	64
Gráfico 9 – Média dos resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, considerando constante o tipo de matriz e a quantidade de EPS adicionado	65
Gráfico 10 – Resistência à compressão vs densidade aparente.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das estruturas poliméricas tridimensionais dos geopolímeros	25
Quadro 2 – Classificação dos geopolímeros e suas aplicações.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do Metacaulim.....	37
Tabela 2 – Características do hidróxido de sódio.....	38
Tabela 3 – Composição química do silicato de sódio.....	38
Tabela 4 – Características do cimento Portland CP-V-ARI segundo a NBR 16697..	38
Tabela 5 – Medidas de densidade das pérolas de EPS.....	40
Tabela 6 – Proporções da mistura de referência (em massa).....	41
Tabela 7 – Formulações das pastas geopoliméricas.	41
Tabela 8 – Formulações das pastas cimentícias.....	42
Tabela 9 – a) ANOVA densidade aparente e b) Médias pareadas. Os asteriscos (*) mostrados na mesma coluna indicam que tais médias não há diferença estatística entre os níveis de tratamentos.	55
Tabela 10 – a) ANOVA resistência à compressão e b) Médias pareadas. Os asteriscos (*) mostrados na mesma coluna indicam que tais médias não há diferença estatística entre os níveis de tratamentos.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABRAPEX – Associação Brasileira de Poliestireno Expandido

ANOVA – Análise Estatística de Variância

EPS – Poliestireno Expandido

m – Metro

cm – Centímetro

kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

m³ – Metro cúbico

MPa – Mega Pascal

°C – Grau Celsius

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. OBJETIVOS	19
1.1.1. Objetivo Geral	19
1.1.2. Objetivos Específicos	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. CIMENTO	20
2.1.1. Hidratação do cimento	22
2.2. GEOPOLÍMERO	24
2.2.1. Matérias-primas para a produção de geopolímeros	27
2.2.2. Propriedades dos geopolímeros	28
2.2.3. Estado fresco	30
2.2.4. Estado endurecido	30
2.2.5. Vantagens e desvantagens do geopolímero em relação ao cimento Portland	31
2.3. POLIESTIRENO EXPANDIDO	32
3. METODOLOGIA	35
3.1. MATERIAIS	35
3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	40
3.2.1. Definições das formulações e produção das pastas	41
3.2.2. Propriedades no estado endurecido	46
<u>3.2.2.1. Densidade aparente</u>	<u>46</u>
<u>3.2.2.2. Estabilidade térmica</u>	<u>46</u>
<u>3.2.2.3. Resistência à compressão</u>	<u>47</u>
3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS (ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA).....	49
4. APRESENTAÇÃO DE DADOS	51
4.1. DENSIDADE APARENTE	51
4.2. ESTABILIDADE TÉRMICA.....	56
4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	59
4.4. RESISTÊNCIA MECÂNICA VERSUS DENSIDADE APARENTE	68
6. CONCLUSÃO	70

6.2. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais sustentáveis na construção civil tem se consolidado como uma das principais diretrizes de inovação tecnológica e ambiental do setor. Nesse contexto, os geopolímeros têm se destacado como alternativa promissora aos ligantes à base de cimento Portland, por apresentarem baixo impacto ambiental, alta resistência e excelente estabilidade térmica (Davidovits, 2002). Obtidos pela ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumina, os geopolímeros possibilitam o aproveitamento de resíduos industriais e a redução das emissões de CO₂ associadas à produção do cimento convencional.

Paralelamente, a crescente geração de resíduos plásticos, especialmente o poliestireno expandido (EPS), tem motivado estudos voltados à sua incorporação em materiais de construção, como pastas e argamassas leves. O EPS, devido à sua baixa densidade, natureza hidrofóbica e elevada capacidade de isolamento térmico, contribui para a produção de compósitos mais leves e com desempenho térmico aprimorado. Contudo, sua adição pode comprometer a resistência mecânica e a coesão da matriz, exigindo o desenvolvimento de formulações otimizadas e compatíveis com as características do polímero (Silva *et al.*, 2018).

Considerando essas perspectivas, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento físico, mecânico e térmico de compósitos geopoliméricos e cimentícios com adição de EPS, comparando o desempenho das duas matrizes sob diferentes temperaturas. Foram produzidas doze formulações experimentais, nas quais se determinaram a densidade aparente e a resistência à compressão, além da análise visual após exposição térmica em mufla a 200 °C e 400 °C. O estudo busca contribuir para a valorização de resíduos poliméricos e o avanço do uso de ligantes alternativos na engenharia civil, ampliando o conhecimento sobre a interação entre o EPS e diferentes matrizes inorgânicas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Elaborar pastas geopoliméricas e cimentícias com adição de poliestireno expandido, analisar e comparar as propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver pastas cimentícias e geopoliméricas com a adição e poliestireno expandido de maneira crescente na mistura;
- Avaliar a evolução das propriedades físicas (densidade aparente e estabilidade térmica) aos 28 dias de cura e mecânica (resistência à compressão) aos 7 e 28 dias de cura;
- Empregar a metodologia estatística para a avaliação dos resultados obtidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na fundamentação teórica serão apresentadas informações relevantes acerca dos materiais envolvidos no processo, bem como algumas generalidades e conceitos sobre o cimento, o geopolímero e o poliestireno expandido, de modo a fornecer ao leitor subsídios para uma adequada interpretação do assunto sobre os temas abordados no decorrer da pesquisa.

2.1. CIMENTO

Originada do latim CAEMENTU, a palavra “cimento” remonta a cerca de 4500 anos, utilizada desde o Egito antigo em monumentos importantes da história. Empregado na forma de uma liga constituída da mistura de gesso calcinado. Obras imponentes como o Coliseu e o Panteão, foram concebidos por meio de solos de origem vulcânica da ilha grega Santorino, ou de proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que apresentavam propriedades de endurecimento em virtude das reações e processos de hidratação, mantendo sua resistência e estabilidade (ABCP, 2025).

No século XVIII, cientistas e pesquisadores iniciaram a busca por um ligante que pudesse servir como matéria-prima para argamassas de revestimento externo, desenvolvendo formulações e denominações distintas como, “cimento romano” e “cimento britânico” (SNIC, 2025). Em 1824, o construtor Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino, percebeu que havia obtido uma mistura que, após secar, tornava-se tão resistente quanto as pedras empregadas nas construções e não se dissolvia em água (ABCP, 2025). Patenteou no mesmo ano como cimento Portland, nome escolhido por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (ABCP, 2025).

Formado pela reação térmica da mistura de dois componentes básicos, o cimento Portland comum tem em sua composição, calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio e ferro), e a partir dessas matérias-primas que são extraídos os óxidos necessários para sua hidratação (Castro, 2021). Segundo Cincotto (2022), os cimentos Portland compostos, se diferenciam pela adição ou substituição do clínquer por filer calcário, materiais pozolânicos (cinza volante, sílica

ativa, argila calcinada) e escória de alto forno, em novas pesquisas, outros tipos de escórias têm sido utilizados como adição.

Figura 1 – Tipos de adições



Fonte: ABCP, 2025.

O clínquer é um material polifásico, com teores de silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico característicos para cada produtor (Cincotto, 2022). Originado em um processo chamado de clínquerização, onde o carbonato de cálcio (CaCO_3) aquecido em alta temperatura forma a cal (CaO) e os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 extraídos da argila, são submetidos a fornos rotativos, que podem chegar a temperaturas superiores à 1450°C . Durante esta etapa, ocorrem diversas reações físicas e químicas que, ao se completar o processo de resfriamento, resultam na aglomeração do material em partículas sólidas denominadas clínquer, com diâmetros que podem variar de 2 a 20 mm (Castro, 2021).

Figura 2 – Grão de clínquer de cimento Portland com face cortada e polida



Fonte: Stutzman, 2004.

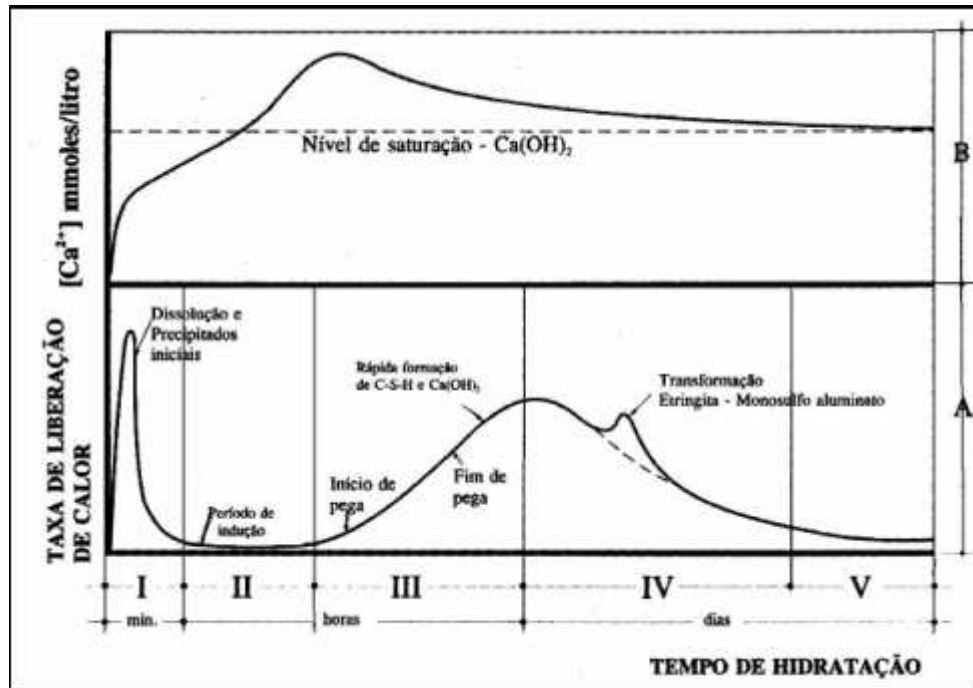
Após a formação do clínquer, o material é resfriado, moído e combinado com pequenas quantidades de gesso, que podem variar até 5%, conforme estabelecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018), originando o cimento Portland. Essa adição tem por finalidade regular o tempo de pega e evitar a hidratação imediata do aluminato tricálcico, conferindo ao cimento características adequadas para o uso na construção civil (Mehta e Monteiro, 2014; Cincotto, 2022).

2.1.1. Hidratação do cimento

O cimento Portland é denominado de ligante hidráulico, pois, quando misturado à água, é responsável por aglomerar partículas e uni-las através da formação de produtos hidratados, resistentes à água. Esses produtos possuem características de pega e endurecimento, com consequente desenvolvimento de resistência mecânica (Cincotto, 2022).

Por se tratar de um material multicomponente, o processo de hidratação do cimento Portland é bastante complexo, consiste em uma série de reações químicas individuais que ocorrem tanto em paralelo quanto sucessivamente. O processo se inicia espontaneamente ao entrar em contato do aglutinante com a água e está associado à liberação de calor (Odler, 2003).

Figura 3 – Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de Ca^{2+} em solução (B) durante a hidratação do cimento Portland. Indicações das etapas de reação: (I): Estágio inicial; (II): Período de indução; (III): Período de aceleração; (IV): Período de desaceleração; e (V): Estágio final.



Fonte: Jawed; Skalny; Young (1983) e Zampieri (1989), citado por Quarcioni, 2008.

Segundo Odler (2003), mesmo em ambientes com umidade elevada, o cimento pode sofrer hidratação parcial. Entretanto, para que o processo ocorra de forma completa, é necessário que o material seja misturado a uma quantidade adequada de água. A proporção entre a massa de água e de cimento, conhecida como relação água/cimento, exerce influência direta sobre o comportamento reológico da mistura, o avanço das reações de hidratação e as propriedades do material após o endurecimento.

Em relações água/cimento entre 0,3 e 0,6, a mistura apresenta consistência pastosa, sendo denominada pasta de cimento fresco. À medida que as reações de hidratação evoluem, essa pasta gradualmente endurece, transformando-se em uma pasta de cimento endurecida. O termo “cura” refere-se à perda de plasticidade da pasta, marcando o início de sua solidificação, enquanto o “endurecimento” está relacionado ao subsequente aumento de resistência e dureza do material (Odler, 2003).

2.2. GEOPOLÍMERO

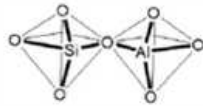
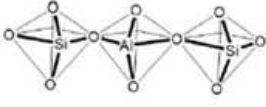

Conforme relatado por Shi, Krivenko e Roy (2006), o uso de compostos alcalinos em materiais cimentícios remonta à década de 1930, quando Kuhl investigou misturas de escória moída com soluções cáusticas de potássio. Já na década de 1940, Purdon, na Bélgica, desenvolveu estudos utilizando escórias ativadas com hidróxido de sódio, consolidando os primeiros registros do emprego de ativação alcalina em ligantes minerais (Torgal e Jalali, 2009).

Posteriormente, entre as décadas de 1940 e 1950, os pesquisadores ucranianos Glukhovsky e Krivenko iniciaram pesquisas voltadas à substituição do cimento Portland por materiais obtidos a partir da ativação alcalina de aluminossilicatos, como as escórias de alto-forno (Krivenko, 2008 apud Borges *et al.*, 2014). Glukhovsky investigou e analisou os ligantes utilizados em construções históricas, como as pirâmides egípcias e os templos romanos e concluiu serem compostos por aluminossilicatos cálcicos hidratados (Torgal e Jalali, 2009).

Já no início da década de 1970, Davidovits direcionou seus estudos para o desenvolvimento de materiais poliméricos resistentes ao fogo, motivado por uma série de incêndios ocorridos na França entre 1970 e 1973. Essas pesquisas resultaram na formulação de um novo tipo de ligante mineral, ao qual deu o nome de geopolímero o qual foi patenteado posteriormente em 1979 (Davidovits, 1991).

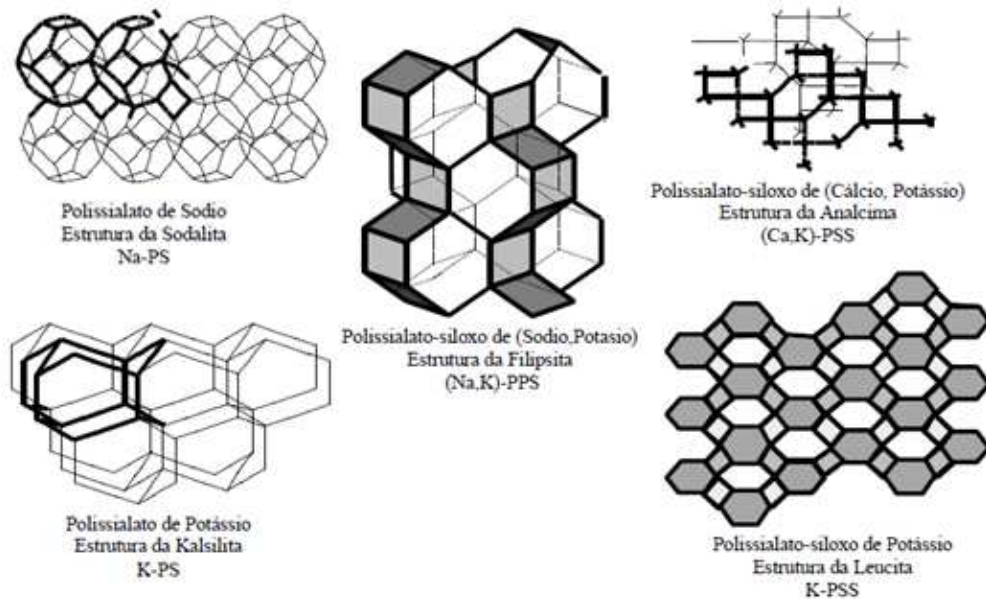
Segundo Davidovits (1994) sugeriu-se como designação química de geopolímeros baseados em sílica-aluminatos de poli(sialato), uma abreviação de silício-óxido-aluminato, uma vez que esses materiais são constituídos por unidades tetraédricas do silício e do alumínio ligadas pelo compartilhamento de átomos de oxigênio. Posteriormente, em 1976, durante o *International Symposium on Macromoleculares* foi estabelecido pela IUPAC a nomenclatura para esses polímeros minerais como polissialato (Davidovits, 1982, 2002). A estrutura destes polissialatos baseia-se na organização e arranjo espacial do silício e do alumínio, que podem formar diferentes unidades de repetição (Davidovits, 2002).

Quadro 1 – Classificação das estruturas poliméricas tridimensionais dos geopolímeros

Razão Si/Al	Monômero	Estrutura 3D
1:1	Polissialato (-Si-O-Al-O-)	
2:1	Polissialato-siloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-)	
3:1	Polissialato-disiloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)	

Fonte: Adaptado de Davidovits, 1994.

Figura 4 – Gráficos moleculares representativos de estruturas geopoliméricas: polissialato e polissialato-siloxo



Fonte: Adaptado de Davidovits, 1991.

De forma geral, os geopolímeros podem ser definidos como polímeros inorgânicos obtidos pela polimerização de matérias-primas naturais ou industriais ricas em aluminossilicatos (Pinto, 2006). O termo “geopolímero”, designa polímeros de origem mineral cuja composição química é semelhante à das zeólitas, mas com microestrutura predominantemente amorfa à semicristalina (Wallah e Rangan, 2006).

Nesse contexto, verifica-se atualmente um crescimento significativo nas pesquisas voltadas ao desenvolvimento de diferentes tipos de polímeros inorgânicos, os quais se destacam como uma promissora classe de materiais e tendem, futuramente, a se consolidar como um novo campo de estudo dentro da química e da ciência dos materiais. A seguir apresenta um resumo das principais cadeias poliméricas formadas partir de reagentes comuns e suas respectivas aplicações (SoteloPinã, *et al.*, 2018).

Quadro 2 – Classificação dos geopolímeros e suas aplicações

Tipo de Geopolímero	Cadeia Polimérica	Solução Ativadora	Precursor		Aplicação
Sialatos	Polissialato	Alcalina	Natural	Caulim	Tijolos
				Caulinita	Cerâmica
				Metacaulim	Fabricação de cimentos e concretos
	Polissialato-siloxo		Sintética	Zeólita	Encapsulamento de resíduos tóxicos
				Silica ativa	Fundição de equipamentos
				Alumina	Equipamento aeroespacial
Fosfatos	Fosfato	Ácida	Natural	Zeólita	Suporte de membranas
	Fosfato-siloxo			Caulim	Materiais de isolamento
				Metacaulim	Revestimentos refratários
	Poli-ferro-sialatos		Sintética	Silica ativa	Revestimentos monolíticos
				Alumina	Espumas
Ferro-sialatos	Poli-ferro-sialatos	Alcalina	Lama vermelha (bauxita)	Imobilização de resíduos perigosos	
				Tijolos	
				Agentes ligantes e cimentos	
			Escórias de alto-forno	Reparos de artesanatos e esculturas	
				Adsorção de metais pesados	
				Argamassas e concretos	
Orgânico-Inorgânico	Poli-organo-siloxo	Alcalina e Ácida	Rede polimérica orgânica	Petróleo	Construção de pavimentos
				Álcool Polivinílico	Concreto de alta resistência à compressão
				Resinas epóxi	Imobilização de metais pesados
				Lignina	Fonte de Gás e Óleo
	Querogênio		Ácido húmico	Concreto de alta resistência à flexão	
			Fonte de SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Metacaulim	
				Caulim	

Fonte: Sotelo-Pinã *et al.*, 2018.

De acordo com Davidovits (1988), os materiais geopoliméricos apresentam uma ampla gama de aplicações em setores industriais, como o automotivo,

aeroespacial, de fundições não ferrosas e metalurgia, engenharia civil e indústrias de plásticos. Um dos campos potenciais de aplicação desses materiais é a gestão de resíduos tóxicos, uma vez que os geopolímeros se comportam de maneira semelhante aos materiais zeolíticos, reconhecidos por sua capacidade de absorver compostos químicos nocivos.

2.2.1. Matérias-primas para a produção de geopolímeros

A seleção das matérias-primas utilizadas na fabricação de geopolímeros depende de diversos fatores, como a disponibilidade local, o custo, o tipo de aplicação pretendida e as exigências específicas do usuário final (Wallah e Rangan, 2006). De modo geral, diferentes minerais e subprodutos industriais podem ser empregados como base para a síntese desses materiais, destacando-se a pozolana, o metacaulim (MK), a escória de alto-forno, as cinzas volantes, bem como misturas entre esses compostos, como cinza volante associada à caulinita ou ao metacaulim (He *et al.*, 2013).

As matérias-primas empregadas na síntese de geopolímero consistem, fundamentalmente, em fontes de aluminossilicatos e um ativador alcalino. As fontes de aluminossilicatos devem conter uma quantidade significativa de material amorfo e apresentar controle adequado da granulometria, visto que essas características influenciam diretamente na reatividade do sistema. O ativador alcalino, por sua vez, deve possuir pH suficientemente elevado para promover a dissolução da fração amorfa do precursor sólido, etapa essencial para a ocorrência da reação de geopolimerização (Schwaab, 2019).

Entre os precursores mais comuns utilizados na síntese de geopolímeros estão os zeólitos, o caulim e o MC. Os zeólitos são aluminossilicatos microporosos com estrutura tridimensional composta por unidades tetraédricas de silício e alumínio, interligadas por átomos de oxigênio. Essa configuração dá origem a cavidades uniformes no interior da estrutura, responsáveis por suas propriedades de adsorção e troca iônica (Duxson *et al.*, 2007).

O MK é obtido a partir do tratamento térmico (calcinação) da caulinita, processo que visa remover grupos estruturais de hidroxila e gerar instabilidade química por meio da alteração no número de coordenação do alumínio. O material resultante apresenta comportamento pozolânico e eleva reatividade (Schwaab, 2019).

Sua composição inclui elementos essenciais para a produção de geopolímeros, 52% de dióxido de silício (SiO_2) e 40% de óxido de alumínio (Al_2O_3), além de 8% de outros componentes, como quartzo, feldspato, mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (Nita, 2006).

Um dos fatores determinantes no mecanismo de reação de polimerização é a quantidade de íons lixiviados de silício e alumínio. Quanto maior a disponibilidade desses íons, mais intensa será a formação das redes tetraédricas de polissilato e, conseqüentemente, maior será a resistência mecânica do material geopolimérico (Santa, 2012). Assim, devido ao seu elevado teor de aluminossilicato amorfo, o MK se destaca como uma das matérias-primas mais relevantes na produção de geopolímero (Santa, 2012).

Embora as cinzas volantes e as escórias industriais também sejam amplamente utilizadas como precursores na síntese de materiais geopoliméricos, sua disponibilidade vem se tornando limitada em algumas regiões. Nesse contexto, o MK surge como uma alternativa promissora por apresentar composição homogênea, ampla disponibilidade e baixo custo, tornando-se uma das principais opções para produção de geopolímero em escala comercial (SoteloPinã, *et al.*, 2018).

2.2.2. Propriedades dos geopolímeros

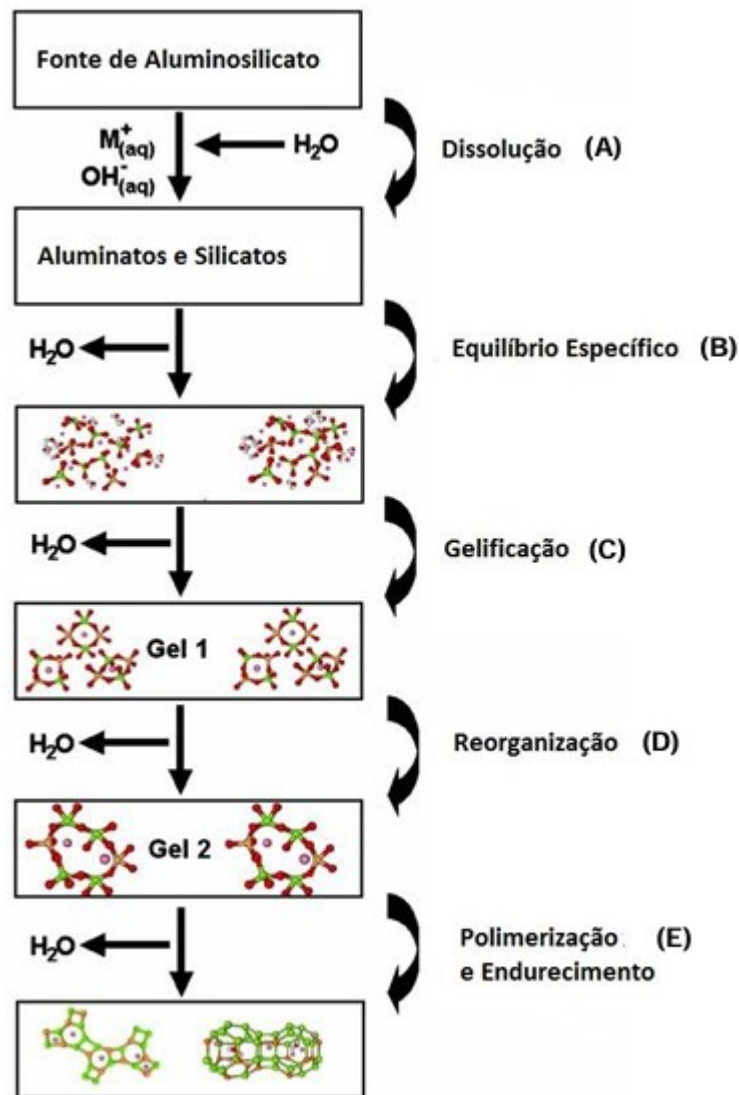
Os geopolímeros são obtidos a partir de uma reação de policondensação denominada geopolimerização. Esse processo consiste na dissolução da sílica e da alumina em meio altamente alcalino, o que promove a quebra das ligações químicas existentes na matéria-prima original e a formação de um gel de silicoaluminato. Esse gel, por sua vez, é rapidamente convertido em uma estrutura tridimensional, caracterizando um processo de evolução acelerada. Em seguida, ocorre a reorganização estrutural do gel, culminando na polimerização e no endurecimento do material geopolimérico (Cesari, 2015).

O modelo de mecanismo proposto para formação dos geopolímeros está representado na Figura 5, e contém as seguintes etapas (Sousa, 2011):

A – Etapa de dissolução inicial onde a solução alcalina hidrolisa a superfície do mineral também atacando as ligações Si-O e Al-O, dissolvendo uma pequena quantidade de espécies Al e Si. Nesta fase o OH atua como um ativador da reação, e o cátion alcalino do metal atua como um elemento de formação da estrutura;

- B - As espécies dissolvidas reagem com os íons silicatos já dissolvidos e polimerizam por reações de condensação;
- C - Início da formação do gel;
- D - Reorganização da estrutura;
- E - Formação de um gel que é transformado na estrutura final.

Figura 5 – Esquema do mecanismo de geopolimerização



Fonte: Santos, 1989.

Segundo Sotelo-Pinã *et al.* (2018) os geopolímeros se destacam por suas notáveis propriedades mecânicas e físicas, incluindo alta resistência à compressão, estabilidade térmica, baixo encolhimento e resistência ao fogo e a ataques ácidos, além de serem ecologicamente sustentáveis. Para a adequada compreensão das

características e propriedades desses ligantes, torna-se imprescindível analisar seu comportamento tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

2.2.3. Estado fresco

No estado fresco, a principal propriedade a ser considerada é a trabalhabilidade, a qual está relacionada a plasticidade, consistência e facilidade de mistura da argamassa. Essa característica pode ser modificada pela variação da quantidade de água presente na mistura, bem como pela alteração da relação líquido/sólido (Simões *et al.*, 2012). De acordo com o Pinto (2006), os geopolímeros, quando ainda no estado fresco, apresentam propriedades como boa coesão, adequada trabalhabilidade e acabamento superficial uniforme, o que resulta em rápido ganho de resistência mecânica e dureza. Todavia, conforme ressaltado por Vassalo (2013), estudos indicam que pequenas variações na relação sílica/alumina pode impactar de forma significativa as propriedades da argamassa geopolimérica, evidenciando a necessidade de uma avaliação criteriosa da reatividade das matérias primas.

2.2.4. Estado endurecido

Segundo Rosseto (2017), no estado endurecido, os comportamentos físico e mecânico tornam-se predominantes. Entre as propriedades físicas destacam-se a absorção de água, porosidade aparente, densidade e permeabilidade. Quanto às propriedades mecânicas, sobressai-se a resistência à compressão, parâmetro fundamental para os cálculos estruturais na construção civil. De modo geral, os materiais geopoliméricos apresentam características como elevada resistência inicial, durabilidade, alta resistência a ataques químicos por ácidos e sulfatos, capacidade de imobilização de compostos tóxicos e radioativos, baixa porosidade e permeabilidade, além de resistência à altas temperaturas (Rosseto, 2017).

Essas propriedades físico-químicas também influenciam o comportamento do geopolímero no estado fresco, conferindo pega rápida, boa trabalhabilidade, coesão e acabamento superficial uniforme, associados ao rápido desenvolvimento de resistência mecânica e dureza (Pinto, 2006). Alguns estudos atribuíam o endurecimento dos geopolímeros à policondensação do aluminato hidrolisado e do

silicato, porém, conforme Brito (2018), ainda não existem pesquisas suficientes para compreender plenamente o mecanismo que confere resistência e endurecimento ao material, embora se reconheça que a estrutura obtida é estável e garante elevado durabilidade ao composto.

2.2.5. Vantagens e desvantagens do geopolímero em relação ao cimento Portland

De acordo com Cunha (2013), em relação ao cimento Portland, os geopolímeros apresentam como principais vantagens:

- Matéria-prima abundante, sendo possível produzi-lo a partir de uma simples pozolana ou a partir de materiais e resíduos cuja composição química contenha quantidades significativas de sílica e alumina;
- A obtenção de fontes de aluminossilicatos não requer grandes quantidades de energia, sendo que se resume à energia necessária para se obter temperaturas de cerca de 600 °C;
- As emissões de CO₂ para a atmosfera são consideradas insignificantes, se comparadas com cimento Portland;
- Possuem um coeficiente de retração 4/5 inferior ao do cimento Portland;
- Possuem excelente durabilidade, sendo a resistência ao ataque por ácidos considerada uma das maiores vantagens dos geopolímeros em relação ao cimento Portland;
- Conseguem resistir a temperaturas de 1000 °C a 1200 °C;
- Possuem baixa condutividade térmica;
- Possuem excelente resistência a ataques de sulfatos, que provocam reações expansivas;
- Apresentam valores baixos de permeabilidade quando comparados com outros materiais, o que favorece sua aplicação na imobilização de resíduos perigosos.

Apesar do elevado potencial e das diversas vantagens dos geopolímeros frente ao cimento Portland, Nematollahi *et al.* (2015) identificam certas desvantagens que podem restringir a sua adoção:

- O uso de geopolímeros ainda é restrito a aplicações de pequena escala, dificultando sua implementação em grandes projetos na construção civil;
- A produção convencional envolve a mistura de soluções alcalinas agressivas com precursores sólidos de aluminossilicato, que exigem cuidados especiais no manuseio devido à sua corrosividade e viscosidade, dificultando a produção em massa;
- A pasta gel polimérica tende a ser pegajosa e espessa, especialmente em sistemas com sódio como fonte de álcali, o que torna a consistência e a fluidez difíceis de controlar;
- A performance do geopolímero é altamente dependente da proporção de álcali para silicato, tornando o controle preciso desafiador, principalmente quando são utilizados materiais residuais como fontes de sílica;
- O movimento de álcalis e água para a superfície durante a cura pode haver uma tendência a gerar eflorescência e aumentar a absorção de água, a menos que o conteúdo de água e álcali seja cuidadosamente controlado.

2.3. POLIESTIRENO EXPANDIDO

O Poliestireno Expandido (EPS), conhecido internacionalmente por Expanded Polystyrene, é um material termoplástico de estrutura celular rígida, obtido por meio da polimerização do estireno em meio aquoso. No Brasil, é popularmente chamado de “Isopor®”, denominação registrada da empresa Knauf Isopor Ltda., que comercializa produtos derivados desse polímero. A classificação do material segue as diretrizes da norma DIN ISO 1043/78, a qual o identifica como um plástico celular rígido (ABRAPEX, 2006).

Descoberto em 1949 pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz, nos laboratórios da BASF, na Alemanha, o EPS destacou-se pelo seu baixo peso,

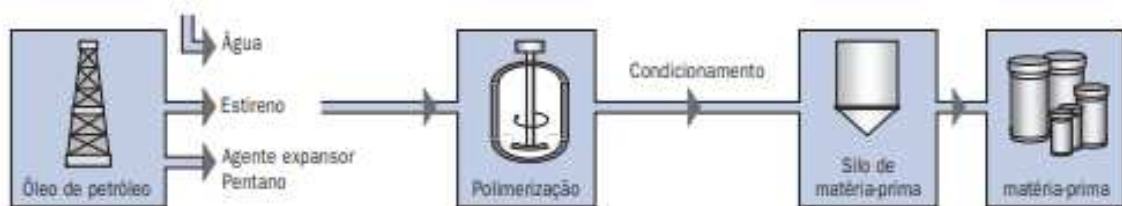
excelente isolamento térmico e versatilidade de aplicação. O processo de produção do material não utiliza e nunca utilizou gases CFC ou substitutos, o que contribui para sua compatibilidade ambiental (ABRAPEX, 2006).

A NBR 11752 (ABNT, 2017) define o poliestireno expandido (EPS) como material plástico celular rígido, originalmente de cor branca, produzido pela expansão de pérolas pré-expandidas de poliestireno, podendo ser fabricado nas condições de não retardante à chama (classe P) e de retardante à chama (classe F).

Durante a fabricação, é incorporado ao estireno um agente expensor, geralmente o pentano, um hidrocarboneto que se degrada rapidamente por reação fotoquímica quando exposto à radiação solar, sem causar danos ao meio ambiente. O produto resultante é composto por pequenas pérolas de até 3 mm de diâmetro, que, quando submetidas ao vapor d'água, podem expandir-se até 50 vezes o seu volume original, fundindo-se e moldando-se em diversas formas (ABRAPEX, 2006).

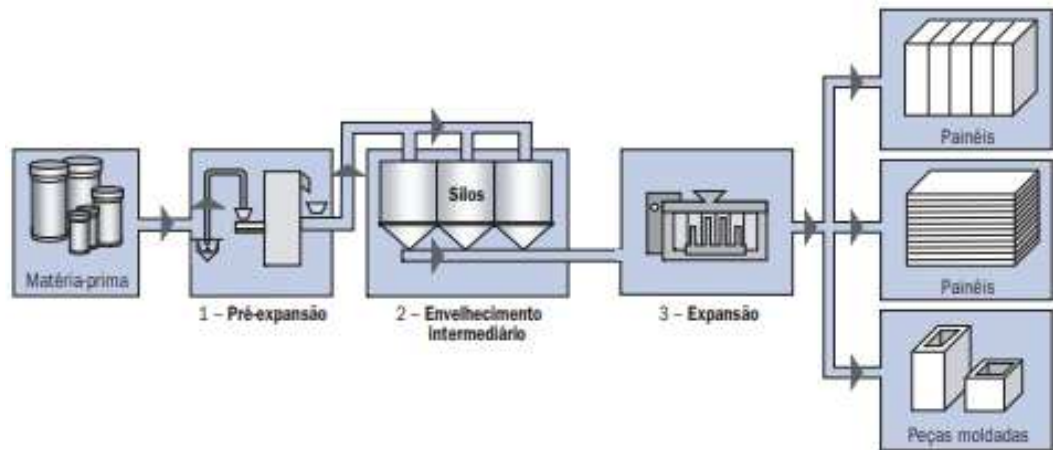
Após a expansão, o material apresenta uma composição de aproximadamente 98% de ar e 2% de poliestireno, o que explica sua leveza e eficiência como isolante térmico. Em um metro cúbico de EPS expandido, existem entre 3 e 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar. Além disso, os produtos finais de EPS são inodoros, atóxicos, recicláveis e 100% reaproveitáveis, podendo retornar à condição de matéria-prima sem prejuízo de qualidade (ABRAPEX, 2006).

Figura 6 – Processo de fabricação da matéria-prima de poliestireno



Fonte: Grote e Silveira, 2001.

Figura 7 – Processo de transformação da matéria-prima (poliestireno)



Fonte: Grote e Silveira, 2001.

O EPS possui ampla aplicação em embalagens industriais, artigos de consumo (como caixas térmicas, pranchas e porta-gelo) e na agricultura. No entanto, é na construção civil que seu uso se destaca, sendo amplamente empregado como material isolante e estrutural leve, devido à sua resistência, baixo peso e facilidade de manuseio (ABRAPEX, 2006).

3. METODOLOGIA

No presente capítulo serão descritos os materiais, métodos e equipamentos empregados na produção das pastas geopoliméricas e cimentícias com adição de poliestireno expandido (EPS). Foram desenvolvidas duas composições distintas, uma com base em ligante geopolimérico e outra em cimento Portland, ambas contendo adição gradual de EPS como agente formador de poros. O EPS foi incorporado às misturas com o objetivo de avaliar sua influência nas propriedades físicas e mecânicas das pastas, considerando o seu potencial de reduzir a densidade dos materiais.

O preparo dos corpos de prova das pastas geopoliméricas e cimentícias, bem como a realização dos ensaios das propriedades físicas foram conduzidos no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável, localizado no Centro Tecnológico de Joinville na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Já o ensaio de resistência à compressão, referente ao estado endurecido, foi realizado de forma dividida: parte das amostras foram ensaiadas no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC, enquanto as demais foram testadas com apoio da empresa Trojan Engenharia Integrada.

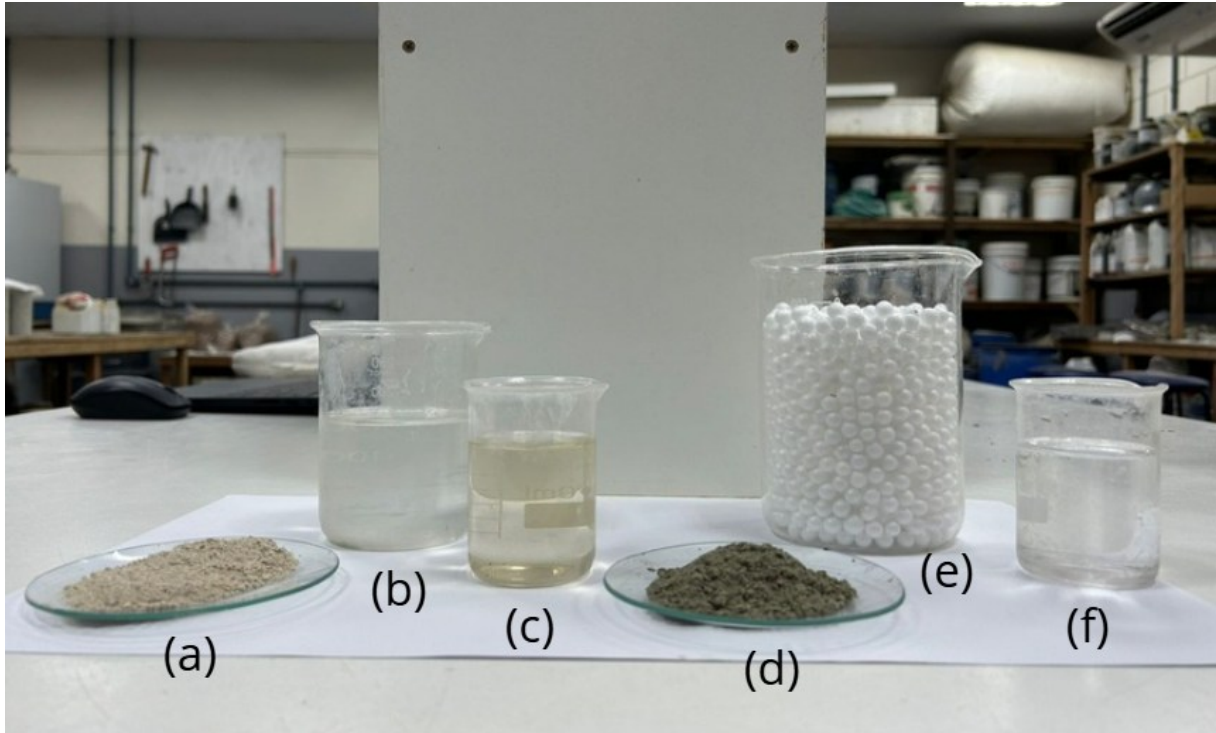
3.1. MATERIAIS

No presente estudo, foram desenvolvidas duas composições de pastas: uma geopolimérica, produzida a partir de materiais ricos em aluminossilicatos, e uma cimentícia de referência, à base de cimento Portland. Em ambas, foram incorporados diferentes volumes de poliestireno expandido (EPS), com o propósito de avaliar o efeito desse material na estrutura e no desempenho das pastas, permitindo uma comparação entre o comportamento do sistema geopolimérico e do cimentício.

Para a pasta geopolimérica, o material aglomerante utilizado foi o metacaulim, considerado uma alternativa sustentável e amplamente empregado no desenvolvimento de geopolímeros, em conjunto com uma solução ativadora composta por hidróxido de sódio (NaOH, 10 molar) e silicato de sódio (Na_2SiO_3). Já para a pasta cimentícia, empregou-se cimento Portland do tipo CPV-ARI como aglomerante e água como meio de hidratação.

A Figura 8 apresenta os materiais usados para a produção dos corpos de prova das pastas geopoliméricas e cimentícias.

Figura 8 – Matérias primas utilizadas – a) Metacaulim, b) NaOH, c) Na_2SiO_3 , d) CPV-ARI, e) EPS, f) Água



Fonte: A autora, 2025.

O metacaulim (MK), utilizado como fonte de aluminossilicatos na produção dos corpos de prova da pasta geopolimérica foi o Metacaulim HP, fornecido pela empresa Metacaulim Brasil, em conformidade com as especificações da norma NBR 15894/10. De acordo com Rocha (2005), a utilização desse material tem como finalidade aprimorar as propriedades mecânicas e a durabilidade das estruturas produzidas com a sua incorporação.

MK é um material aluminossilicato ativado termicamente, gerado pela calcinação de argilas caulínicas em temperaturas entre 650°C e 800°C , variando com a pureza das argilas (Vassalo, 2013). Segundo Davidovits (1994), o produto obtido pode ter diferentes graus de finura, superfície específica e apresentar colorações variadas. Tais características dependem da composição química e mineralógica do caulim de base.

O Núcleo de Pesquisa CERMAT desenvolveu ensaios de caracterização química do MK e por meio do ensaio de fluorescência de raios-X, foi determinada sua composição química, onde é composto em sua maior parte por SiO₂ (57,12%) e Al₂O₃ (32,6%), apresentado na Tabela 1.

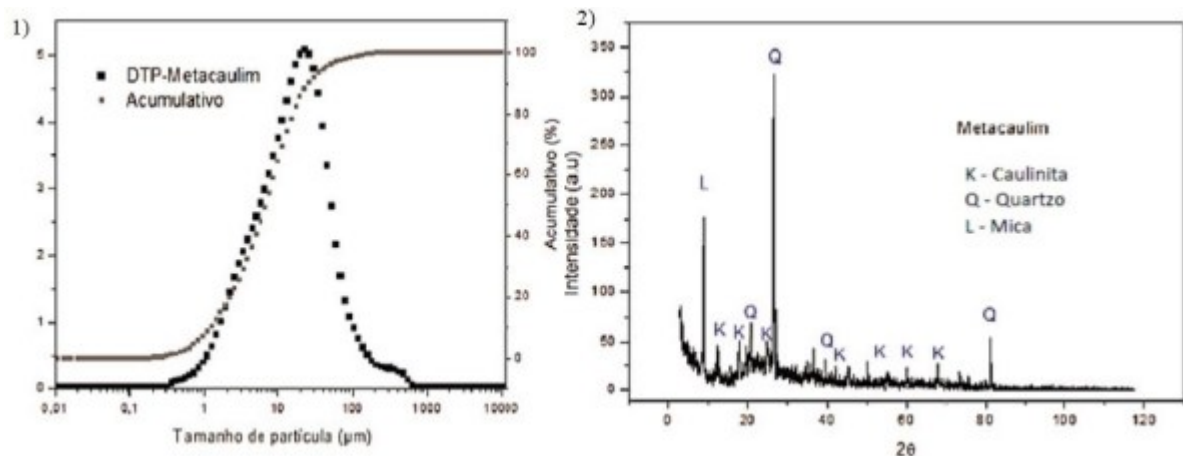
Tabela 1 – Composição química do Metacaulim.

Óxidos	Al ₂ O ₃	CaO	FeO ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂
Teor (%)	32,6	0,08	2,26	2,13	0,59	<0,05	<0,05	0,06	57,12	1,51
Perda ao Fogo	2,62%									
Área Específica	32700 m ² /kg									

Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2022.

A partir do método de difração de raios-X o CERMAT, determinou o grau de cristalinidade dos componentes e as fases cristalinas como a mica (L), caulinita (K) e o quartzo (Q), apresentado na Figura 9. E pelo ensaio de distribuição do tamanho de partículas foi verificado que o tamanho médio das partículas é de 21µm e D50 = 6,5µm.

Figura 9 – 1) Distribuição granulométrica do metacaulim, 2) Difração de raios-X do metacaulim



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2022.

O hidróxido de sódio (NaOH), conhecido comercialmente como soda cáustica, e o silicato de sódio (Na₂SiO₃) foram empregados como ativadores alcalinos no processo de polimerização das argamassas geopoliméricas. O hidróxido de sódio,

fornecido pela empresa Buschle e Lepper S/A, foi utilizado na forma de solução com concentração de 10 Mol/l, enquanto o silicato de sódio com 98% de pureza, foi fornecido pela empresa Quimidrol. As especificações técnicas são apresentadas nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 – Características do hidróxido de sódio.

Descrição	Mínimo	Máximo
Concentração (%)	97,00	100,00
Carbonatos (Na_2CO_3)	-	0,60 %
Cloretos (NaCl)	-	0,30 %
Ferro (Fe)	-	6,00 ppm
Densidade (g/cm^3)	2,13	2,20

Fonte: Buschle & Lepper S/A, 2022.

Tabela 3 – Composição química do silicato de sódio.

Descrição	Mínimo	Máximo
Densidade (g/cm^3)	1,39	1,42
Viscosidade (cP)	250,00	500,00
Óxido de sódio (%)	8,50	9,20
Óxido de silício (%)	27,80	30,50
Sólidos totais (%)	37,00	39,00
Relação $(\text{SiO}_2)/(\text{Na}_2\text{O})$	3,02	3,59
Água (%)	61,00	63,00

Fonte: Buschle & Lepper S/A, 2022.

O cimento utilizado na produção da pasta cimentícia foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V-ARI), conforme especificações da norma NBR 16697 (ABNT, 2018). Esse tipo de cimento é amplamente empregado em estudos e aplicações que demandam rápido ganho de resistências nas idades iniciais, devido à sua elevada finura e ao maior teor de clínquer em sua composição. Na Tabela 4 são apresentadas as principais características físico-químicas e mecânica do CP-V-ARI, conforme estabelecido pela referida norma.

Tabela 4 – Características do cimento Portland CP-V-ARI segundo a NBR 16697.

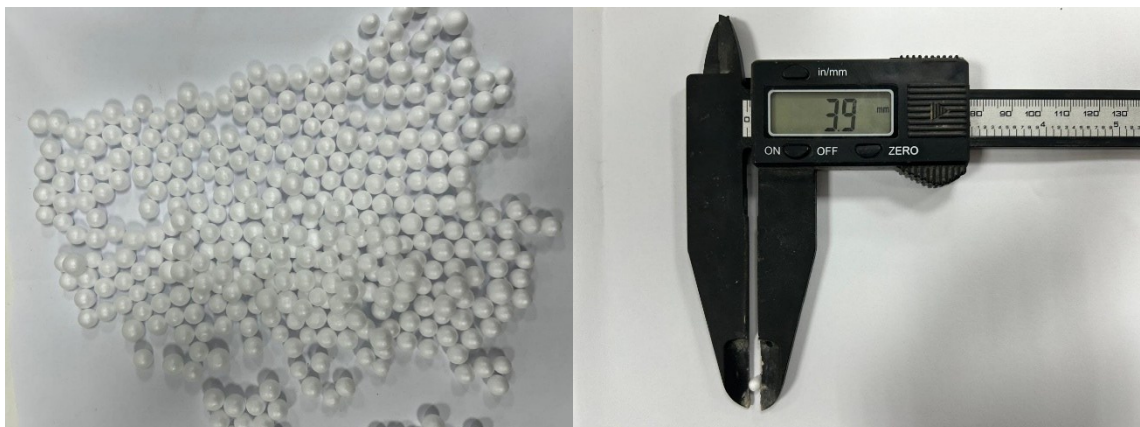
Propriedade	Unidade	Requisito
Tipo de cimento	—	CP-V-ARI

Clínquer + sulfatos de cálcio	%	90 – 100
Material carbonático	%	0 – 10
Finura (resíduo na peneira nº 200)	%	≤ 6,0
Expansibilidade a quente	mm	≤ 5,0
Início de pega	min	≥ 60
Fim de pega	min	≤ 600
Resistência à compressão – 1 dia	MPa	≥ 14,0
Resistência à compressão – 3 dias	MPa	≥ 24,0
Resistência à compressão – 7 dias	MPa	≥ 34,0
Resíduo insolúvel (RI)	%	≤ 3,5
Perda ao fogo (PF)	%	≤ 6,5
Óxido de magnésio (MgO)	%	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	%	≤ 4,5

Fonte: adaptado de ABNT NBR 16697, 2018.

O poliestireno expandido (EPS) utilizado na produção dos corpos de prova foi empregado na forma de pérolas (Figura 10), visando reduzir a densidade da pasta e proporcionar maior leveza ao material final. Trata-se de um material de baixa massa específica e elevada estabilidade química, comumente aplicado em compostos leves devido à sua capacidade de formar vazios e contribuir para o isolamento térmico.

Figura 10 – Pérolas de EPS utilizadas



Fonte: A autora, 2025.

O material considerado para a incorporação foi o passante na peneira de 4,75 mm e retido na peneira de 2,36 mm, adotando-se essa granulometria como referência

para a produção de todos os corpos de prova, a fim de garantir uniformidade e controle visual na mistura.

A densidade das pérolas de EPS foi determinada a partir de um objeto de volume conhecido. Para isso, foram realizadas cinco medições consecutivas, cuja média será apresentada na tabela a seguir e adotada como valor representativo da densidade do material.

Tabela 5 – Medidas de densidade das pérolas de EPS

Amostra	1	2	3	4	5	Desvio Padrão	Média
Massa (kg)	0,00185	0,00172	0,00173	0,00183	0,00175		
Volume (m ³)	0,000196	0,000196	0,000196	0,000196	0,000196		
Densidade (kg/m ³)	9,42	8,76	8,81	9,32	8,91	0,30	9,0451

Fonte: A autora, 2025.

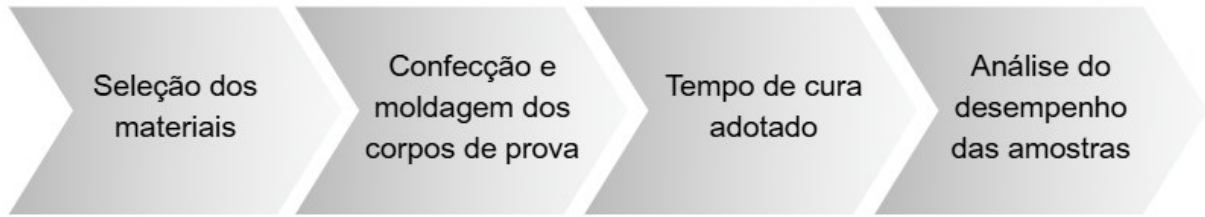
Com base nas cinco medições realizadas, obteve-se uma densidade média de 9,05 kg/m³ para as pérolas de EPS, valor adotado como representativo do material. Esse parâmetro fornece maior precisão às etapas subsequentes de dosagem e análise dos resultados, garantindo uniformidade e reprodutibilidade no experimento.

3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A seleção dos materiais utilizados neste estudo baseou-se no objetivo de obter compósitos de menor densidade por meio da incorporação de poliestireno expandido (EPS), visando à redução do consumo de matérias-primas e a conciliação entre leveza e desempenho técnico adequado. Nesse sentido, optou-se pela realização de uma análise comparativa entre as pastas cimentícias e geopoliméricas com adição de EPS, considerando o potencial desse material em reduzir a massa e otimizar o uso de recursos, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas construtivos mais sustentáveis.

A metodologia experimental adotada foi desenvolvida com o objetivo de avaliar o comportamento das pastas cimentícias e geopoliméricas, considerando suas propriedades no estado endurecido. O Fluxograma 1 apresenta as etapas empregadas.

Fluxograma 1 – Etapas da metodologia experimental



Fonte: A autora, 2025.

3.2.1. Definições das formulações e produção das pastas

Foram desenvolvidas seis formulações para cada tipo de pasta, sendo a primeira uma pasta geopolimérica de referência, que foi baseada nas proporções de propriedades físicas e químicas recomendadas por Davidovits (1994), a mesma adotada por Fazardo (2024) em seu estudo.

Tabela 6 – Proporções da mistura de referência (em massa).

MK	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Relação S/L
55%	15%	30%	1,22

Fonte: A autora, 2025.

A partir do índice de consistência da formulação geopolimérica de referência, a pasta cimentícia foi ajustada experimentalmente, por meio de variações controladas na composição, até que apresentasse um índice de consistência equivalente, dentro de uma faixa de ± 5 mm. Em seguida, as pérolas de poliestireno expandido (EPS) foram incorporadas, em volume, tanto a pasta geopolimérica quanto a pasta cimentícia de referência, de modo a avaliar o efeito do material leve sobre a densidade, trabalhabilidade e desempenho das misturas.

Importante destacar que a água presente na mistura geopolimérica se origina apenas da solução de 10 Molar do NaOH, cuja porcentagem em massa foi de 15% nas formulações. As Tabela 7 e Tabela 8 apresentam as composições em massa, utilizadas para a produção dos corpos de prova.

Tabela 7 – Formulações das pastas geopoliméricas.

Formulações	Matérias Primas (%) em massa (%) em volume			
	MK	NaOH	Na ₂ SiO ₃	EPS
REF	55	15	30	-

60	55	15	30	60%
70	55	15	30	70%
72,5	55	15	30	72,5%
75	55	15	30	75%
80	55	15	30	80%

Fonte: A autora, 2025.

Tabela 8 – Formulações das pastas cimentícias.

Formulações	Matérias Primas (%) em massa (%) em volume		
	Cimento CP-V-ARI	Água	EPS
REF	66	34	-
60	66	34	60%
70	66	34	70%
72,5	66	34	72,50%
75	66	34	75%
80	66	34	80%

Fonte: A autora, 2025.

O processo de produção das pastas geopoliméricas se deu em 4 etapas, apresentadas no fluxograma a seguir.

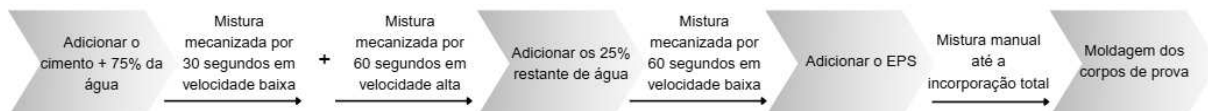
Fluxograma 2 – Processo de produção dos corpos de prova geopoliméricos



Fonte: A autora, 2025.

O processo de produção das pastas cimentícias se deu em 5 etapas, apresentadas no fluxograma a seguir.

Fluxograma 3 – Processo de produção dos corpos de prova cimentícios



Fonte: A autora, 2025.

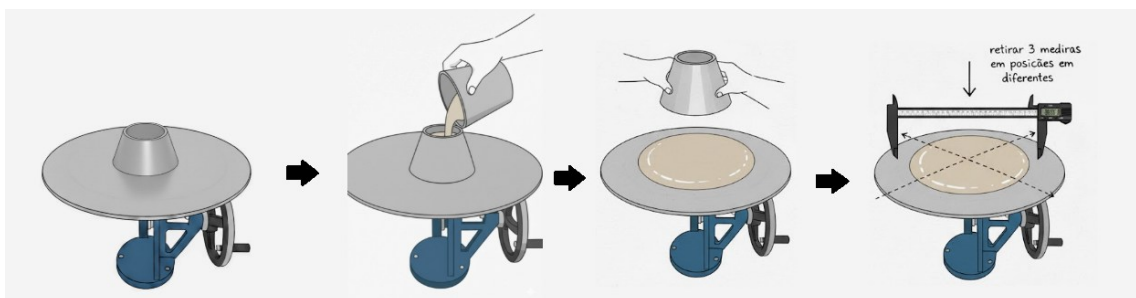
Figura 11 – Misturadora utilizada para a produção da pasta a) geopolimérica; b) cimentícia



Fonte: A autora, 2025.

Após o processo mistura, ambas as pastas referências foram submetidas ao ensaio de índice de consistência, conforme apresentado na ilustração a seguir.

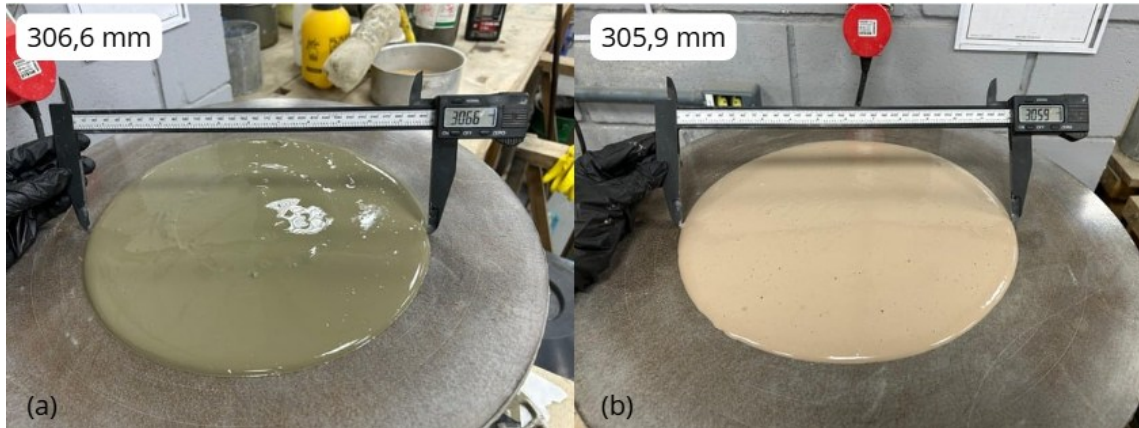
Figura 12 – Ilustração do ensaio de índice de consistência



Fonte: A autora, 2025.

O índice de consistência adotado foi escolhido de forma a proporcionar uma pasta com maior fluidez, o que favorece a homogeneização e a incorporação do EPS (poliestireno expandido) na mistura. A consistência mais líquida possibilita a melhor dispersão das partículas de EPS e permite a introdução de volumes maiores desse material sem comprometer a trabalhabilidade a uniformidade da pasta.

Figura 13 – Índice de consistência da pasta referência a) cimentícia; b) geopolimérica



Fonte: A autora, 2025.

Em seguida, procedeu-se a moldagem nos moldes prismáticos previamente preparados, mediante aplicação de agente desmoldante e revestimento com plástico filme, visando facilitar a desmoldagem dos corpos de prova. O preenchimento foi realizado com auxílio de espátula, assegurando o nivelamento para obtenção das dimensões especificadas. Posteriormente, os prismas foram divididos em 4 (quatro) corpos de prova cúbicos, com dimensões 4 cm x 4 cm x 4 cm, sendo a de moldagem efetuada após 48 horas.

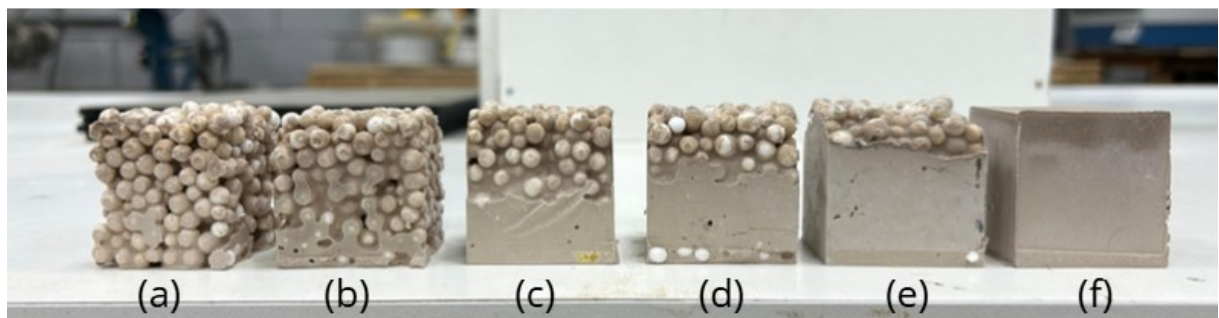
Figura 14 – Corpos de prova da pasta geopolimérica moldados



Fonte: A autora, 2025.

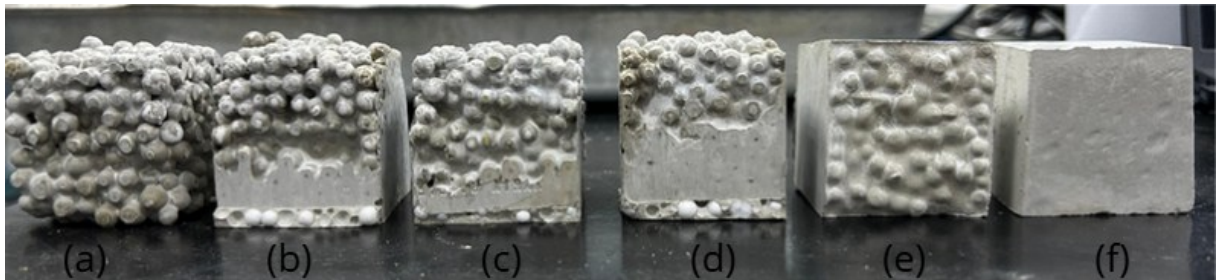
Após a desmoldagem, foram obtidos doze (12) corpos de prova para cada mistura produzida, totalizando 144 amostras. Destes, cinco foram destinados ao ensaio de resistência à compressão sendo considerado o resultado de três corpos prova e utilizado dois exemplares para balizamento dos dados, tanto aos 7 quanto aos 28 dias de cura. Os dois corpos de prova remanescentes foram destinados ao ensaio de estabilidade térmica.

Figura 15 – Corpos de prova geopoliméricos desmoldados a) 80; b) 75; c) 72,5; d) 70; e) 60; f) REF



Fonte: A autora, 2025.

Figura 16 – Corpos de prova cimentícios desmoldados a) 80; b) 75; c) 72,5; d) 70; e) 60; f) REF



Fonte: A autora, 2025.

3.2.2. Propriedades no estado endurecido

Após o período de cura, foram realizados os ensaios de resistência à compressão, com o objetivo de avaliar a propriedade mecânica do material aos 7 e 28 dias, bem como os ensaios de densidade aparente e de tratamento térmico, ambos conduzidos aos 28 dias de cura.

3.2.2.1. Densidade aparente

Para a determinação da densidade aparente, foram mensuradas as dimensões dos corpos de prova, a fim de se obter o volume, e posteriormente realizada a pesagem para determinação da massa. A densidade foi então calculada pela razão entre a massa (em gramas) e o volume (em centímetros cúbicos), conforme a Equação (1).

$$Densidade\ Aparente = \frac{m}{V} * 1000 \quad (1)$$

Onde:

- m: massa seca, em gramas;
- V: volume da amostra, em cm³.

3.2.2.2. Estabilidade térmica

O ensaio de estabilidade térmica teve como objetivo avaliar o comportamento dos corpos de prova frente à exposição a elevadas temperaturas, verificando

possíveis alterações físicas ou estruturais decorrentes do aquecimento. Para a realização do teste, foi selecionada uma amostra de cada traço/formulação, totalizando 12 corpos de prova.

As amostras foram submetidas ao ensaio em forno tipo mufla, sendo inicialmente aquecidas até 200 °C, com taxa de aquecimento de 25 °C por minuto. Após atingir a temperatura estabelecida, os corpos de prova foram mantidos sob essa condição por 30 minutos, de forma a permitir a estabilização térmica do material. Em seguida, iniciou-se o resfriamento natural das amostras até a temperatura ambiente.

Figura 17 – Mufla



Fonte: A autora, 2025.

O mesmo procedimento foi repetido para a temperatura de 400 °C, utilizando-se novos corpos de prova correspondentes a cada formulação. Dessa forma, foi possível comparar o desempenho e a integridade dos materiais em diferentes níveis de exposição térmica.

3.2.2.3. Resistência à compressão

Para a realização do ensaio de resistência à compressão, as amostras referentes aos traços REF, 60 e 70 foram rompidas na empresa Trojan Engenharia Integrada Ltda., enquanto as amostras 72,5, 75 e 80 foram ensaiadas em uma prensa

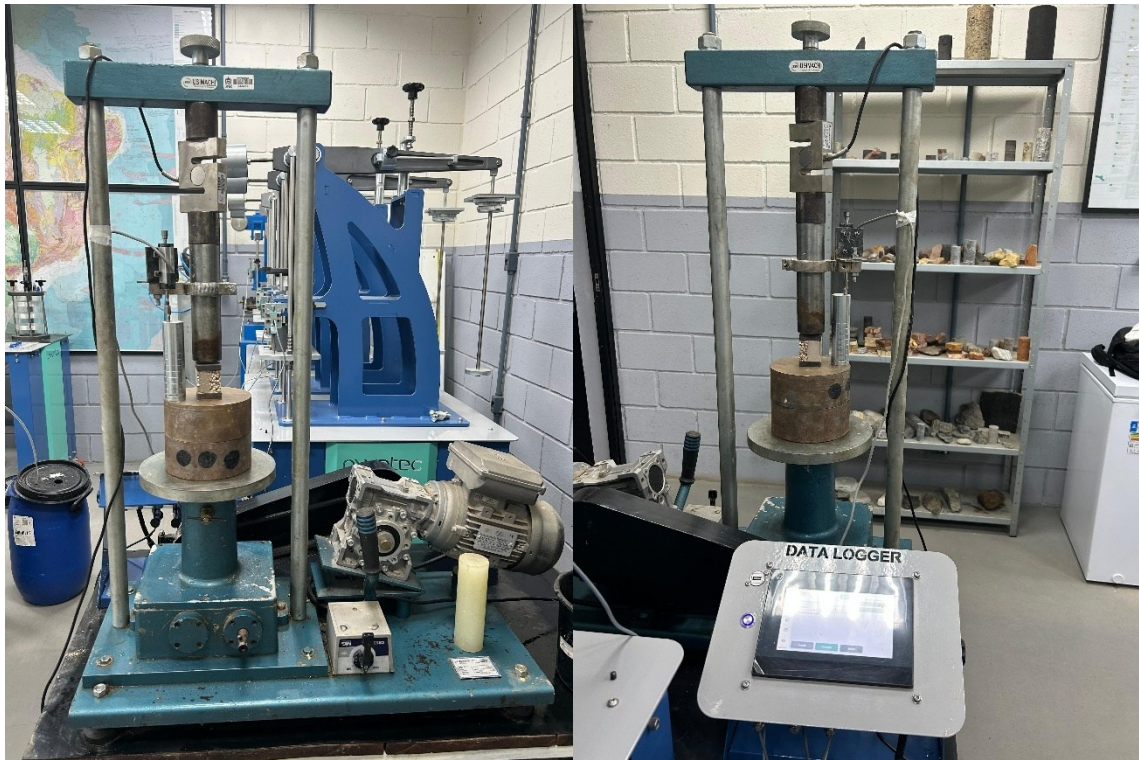
de CBR da marca Usimachi. Essa prensa foi utilizada por apresentar maior sensibilidade na medição dos esforços aplicados, característica essencial para materiais leves, garantindo assim maior precisão nos resultados obtidos. O equipamento encontra-se instrumentado com uma célula de carga MK de 5 toneladas, um LVDT Lemaqs com curso de 25 milímetros, utilizado para medições de deslocamento, e um Datalogger Owntec, responsável pelo registro e processamento dos dados durante os ensaios.

Figura 18 – Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão das amostras REF, 60 e 70



Fonte: A autora, 2025.

Figura 19 – Prensa CBR utilizada para o ensaio de resistência à compressão das amostras 72,5, 75 e 80



Fonte: A autora, 2025.

Os ensaios foram conduzidos com cinco corpos de prova para cada traço, sendo três considerados no cálculo da resistência média e dois utilizados como referência para balizamento dos resultados, conforme os procedimentos descritos na NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS (ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA)

Para a avaliação dos resultados obtidos nos ensaios de densidade aparente e resistência à compressão das pastas geopoliméricas e cimentícias, utilizou-se a análise de variância (ANOVA) como ferramenta estatística. A ANOVA permite comparar as médias de diferentes grupos independentes e identificar se as diferenças observadas são estatisticamente significativas, considerando como intervalo de confiança 95% e nível de significância ($\alpha = 0,05$).

A aplicação da ANOVA foi conduzida por meio do software *Statística*, que possibilitou investigar as fontes de variação dos resultados, distinguindo o erro

experimental (erro puro) dos efeitos decorrentes dos fatores estudados. Assim, buscou-se garantir maior confiabilidade às conclusões, reduzindo a influência de variáveis aleatórias nos resultados obtidos.

Antes da aplicação da análise de variância, foi realizado o teste de normalidade dos dados, etapa fundamental para validar o uso da ANOVA. O p-valor foi considerado como parâmetro para interpretação estatística: valores inferiores ou iguais a α indicaram forte evidência de que as diferenças observadas entre as formulações não ocorreram ao acaso, sendo, portanto, estatisticamente significativas.

Em sequência, aplicou-se o teste de Tukey, utilizado para identificar quais formulações diferiram entre si. Esse método pode ser empregado em análises de variância de modo a comparar as múltiplas respostas das médias entre si, controlando a taxa de erro global em um nível de significância pré-estabelecido. Tal abordagem é adequada de ser usada neste trabalho de forma a efetuar diversas comparações simultâneas. Assim, o teste de Tukey ajusta os intervalos de confiança para que o nível de confiança simultâneo seja mantido no valor especificado.

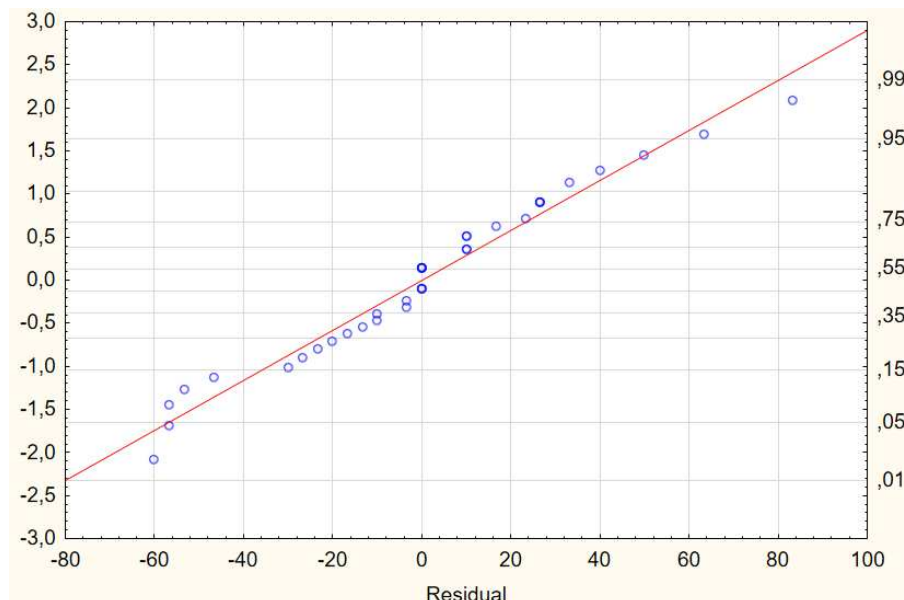
4. APRESENTAÇÃO DE DADOS

Com o propósito de tornar mais clara a interpretação e análise dos resultados, este capítulo apresenta os dados obtidos em cada ensaio realizado, organizados nos respectivos subcapítulos a seguir:

4.1. DENSIDADE APARENTE

Para a aplicabilidade do método de análise de variância ANOVA, houve a necessidade inicial de que os resultados obtidos apresentassem uma distribuição próxima à normalidade, ou seja, que os valores estivessem alinhados ou próximos a uma reta inclinada. Portanto, por meio do Gráfico 1, é possível observar que os seus dados obtidos na pesquisa apresentaram uma distribuição bem próxima à normalidade, validando o uso do método.

Gráfico 1 – Tendência à normalidade das densidades aparentes dos corpos de prova aos 28 dias de cura



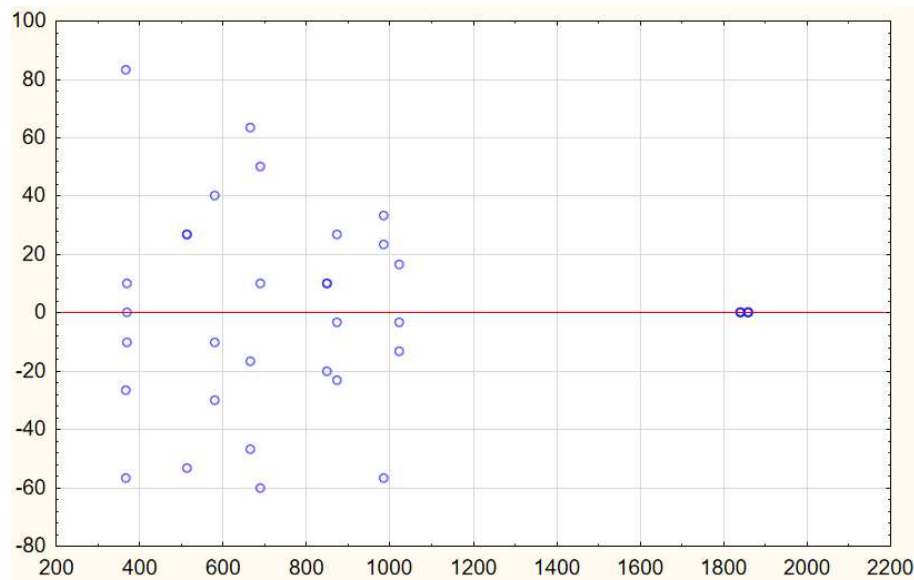
Fonte: A autora, 2025.

Os dados apresentados no Gráfico 2 evidenciam uma dispersão equilibrada em sua maioria dos valores obtidos, caracterizada por uma transição aleatória entre os grupos distribuídos verticalmente em torno da média zero (0). Tais valores

correspondem às diferenças entre as observações individuais e a média do grupo ao qual pertencem. Esse comportamento demonstra a consistência dos resultados experimentais e ausência de erros significativos durante a execução dos ensaios.

Além disso, essa análise constitui um pré-requisito fundamental para a validação das conclusões obtidas por meio da ANOVA, uma vez que assegura a inexistência de tendências sistemáticas entre os grupos avaliados. Dessa forma, reforça-se a confiabilidade da análise estatística e a legitimidade da aplicação do método ANOVA aos dados experimentais.

Gráfico 2 – Dispersão dos resultados em função dos valores da densidade aparente dos corpos de prova aos 28 dias de cura



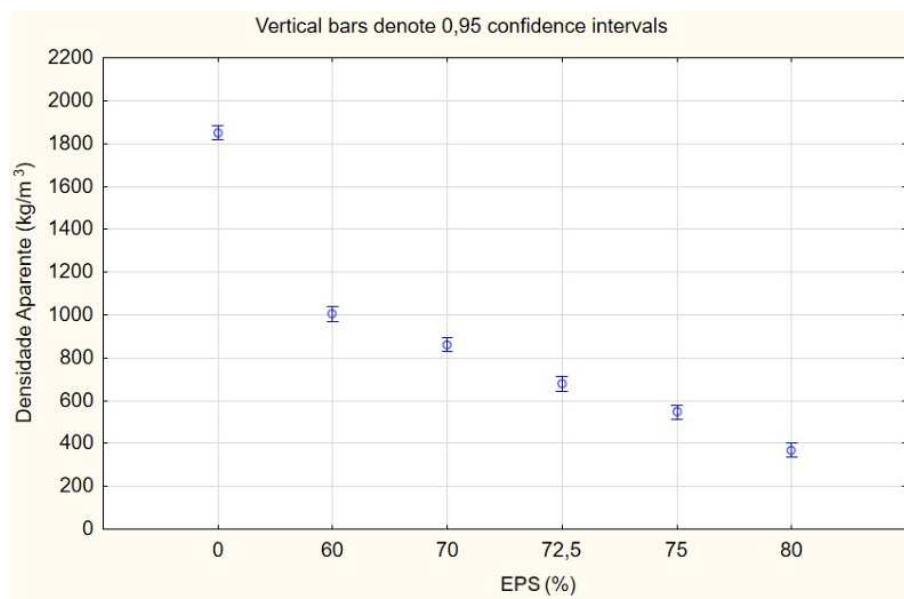
Fonte: A autora, 2025.

A análise dos resultados de densidade aparente, apresentados no Gráfico 3, evidencia que a adição de EPS exerceu um impacto significativo na redução dessa propriedade para todas as formulações avaliadas. Esse comportamento era esperado uma vez que o EPS é um material polimérico de baixa densidade e alta incorporação de ar em sua estrutura, atuando como um agregado leve nas matrizes estudadas, mesmo comportamento observado no estudo de Pirez (2017), Tessari (2006) e Marconato (2022). À medida que se elevou o teor EPS nas misturas, observou-se uma redução progressiva da densidade aparente, demonstrando o benefício trazido pelo material na produção de compósitos de menor massa específica. Tal resultado confirma o papel do EPS como agente redutor de densidade, contribuindo para o

desenvolvimento de pastas mais leves e, conseqüentemente, com potencial para aplicações que demandem redução de peso próprio sem perda significativa de estabilidade dimensional.

Observa-se, entretanto, que a variação da densidade aparente em função do teor de EPS não é linear, indicando que a taxa de redução depende da porcentagem de material incorporado. Essa tendência pode estar relacionada à distribuição do EPS na matriz e à formação de vazios, que se tornam mais expressivos em teores elevados. Além disso, os baixos valores de desvio padrão obtidos sugerem que as diferenças entre os resultados das matrizes geopolimérica e cimentícia são pequenas, evidenciando um comportamento semelhante entre ambas para todos os níveis de edição de apps.

Gráfico 3 – Variação da densidade aparente dos corpos de prova considerando constante o tipo de matriz utilizada

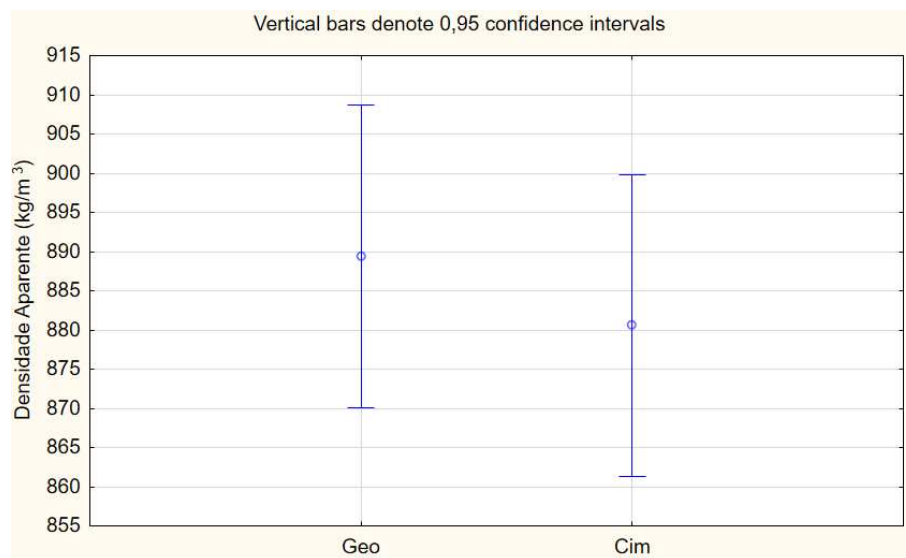


Fonte: A autora, 2025.

De fato, a análise dos resultados de densidade aparente apresentado no Gráfico 4, permite observar que as misturas à base de geopolímero (Geo) e de cimento Portland (Cim) apresentaram valores médios próximos, indicando comportamento semelhante quanto a essa propriedade. Apesar da ligeira diferença observada, ambas as matrizes mantiveram densidades na mesma ordem de grandeza, evidenciando que o tipo de ligante exerceu influência limitada sobre a densidade final das amostras. Esse resultado sugere que a variação do ligante, por si

só, não provocou alterações significativas na massa específica aparente do material, sendo os valores resultantes mais fortemente associados à proporção e a distribuição do EPS incorporada em cada formulação. Dessa forma, constata-se que tanto o Geo quanto o Cim apresentaram um comportamento estável e coerente dentro da faixa de densidade observada, demonstrando uniformidade e homogeneidade nas amostras analisadas.

Gráfico 4 – Resultados da média das densidades obtidas dos corpos de prova considerando constante a quantidade de EPS adicionado



Fonte: A autora, 2025.

Na Tabela 9a, a ANOVA aplicada aos resultados de densidade aparente indicou que o fator EPS (%) exerceu influência estatisticamente significativa sobre essa propriedade, uma vez que o valor de p encontrado foi inferior a 0,05 ($p = 0,000000$). Isso demonstra que a variação do teor de EPS nas formulações influenciou diretamente a densidade aparente dos compósitos analisados. Por outro lado, o fator Tipo (Geopolímero e Cimento) apresentou $p = 0,508041$, valor superior ao limite de significância adotado, indicando ausência de influência significativa do tipo de ligante sobre a densidade aparente. De forma semelhante, a interação entre Tipo e EPS (%) também não apresentou significância estatística ($p = 0,297734$), o que evidencia que o efeito foi independentemente do tipo de matriz utilizada.

Observa-se ainda que o maior valor de Soma dos Quadrados (SS) foi atribuído ao fator EPS (%) correspondendo a 8.221.767, o que confirma que a variância

observada nos resultados de densidade foi predominantemente explicada pela variação do teor de EPS incorporado nas misturas. Esse comportamento reforça que o EPS foi o principal fator responsável pela redução da densidade aparente nas formulações avaliadas, em consonância com sua natureza de material leve e altamente poroso.

Tabela 9 – a) ANOVA densidade aparente e b) Médias pareadas. Os asteriscos (*) mostrados na mesma coluna indicam que tais médias não há diferença estatística entre os níveis de tratamentos.

a)	SS	Grau de Liberdade	MS	F	p
Intercept	28196100	1	28196100	17902,29	0,000000
Tipo	711	1	711	0,45	0,508041
EPS (%)	8221767	5	1644353	1044,03	0,000000
Tipo*EPS (%)	10222	5	2044	1,30	0,297734
Error	37800	24	1575		
Total SS	36466600,00	36			

b)	Tipo	EPS (%)	Densidade Aparente (kg/m ³)	1	2	3	4	5	6	7
	Cim	80	366,67		****					
	Geo	80	370,00		****					
	Cim	75	513,33			****				
	Geo	75	580,00		****	****				
	Cim	72,5	666,67		****					
	Geo	72,5	690,00		****					
	Geo	70	850,00				****			
	Cim	70	873,33				****	****		
	Geo	60	986,67					****	****	
	Cim	60	1023,33						****	
	Cim	0	1840,00							****
	Geo	0	1860,00							****

Fonte: A autora, 2025.

O teste de tukey (Tabela 9b) aplicado aos valores de densidade aparente permitiu identificar grupos estatisticamente distintos entre as formulações, conforme mostrado na Tabela 9b. Observa-se uma clara tendência de redução da densidade com o aumento do teor de EPS, tanto para as misturas cimentícias quanto para as geopoliméricas. As formulações de referência (0% EPS) apresentaram os maiores valores de densidade acima de 1800 kg/m³ e diferiram estatisticamente de todas as

demais, evidenciando o impacto expressivo da incorporação do EPS na estrutura da matriz.

As amostras com 60% e 70% de EPS formaram grupos intermediários, apresentando densidades entre 850 e 1023,33 kg/m³. Nota-se que, dentro desses teores, algumas formulações cimentícias e geopoliméricas apresentaram comportamento estatisticamente semelhante, como ocorre entre o Geo 60 e o Cim 60, ou entre o Geo 70 e o Cim 70, indicando que, nesse intervalo de incorporação, o tipo de ligante exerce influência secundária sobre a densidade final do compósito.

Já as misturas com teores mais elevados (72,5% a 80% de EPS) agruparam-se separadamente, apresentando as menores densidades, entre 366 e 960 kg/m³, e não apresentando diferença significativa entre si, o que sugere que, em altos teores de material polimérico, a estrutura celular do EPS domina o comportamento da mistura, independentemente do ligante empregado.

Sob o ponto de vista técnico, essa redução acentuada da densidade pode ser vantajosa em aplicações que demandam materiais de baixa massa específica, como elementos de enchimento, isolamento térmico e blocos leves. Contudo, deve-se considerar que o aumento da fração de EPS tende a elevar a porosidade e a reduzir a resistência mecânica, o que limita o uso dessas formulações em elementos estruturais mais solicitados, análise aprofundada no item 4.3.

Destaca-se o desempenho da formulação Geo 70, que apresentou redução de 54,30% da densidade aparente em relação a formulação Geo 0, evidenciando a expressiva influência do teor intermediário de EPS na diminuição da massa específica da matriz geopolimérica. Esse comportamento indica que, nesse nível de incorporação, o EPS atuou de maneira particularmente eficiente na formação de uma estrutura interna mais leve, com maior volume de vazios distribuídos ao longo da pasta. Por outro lado, as formulações com maiores teores de EPS, embora tenham atingido menores valores de densidade, podem comprometer o equilíbrio entre leveza e desempenho estrutural, o que limita sua atratividade para aplicações práticas.

4.2. ESTABILIDADE TÉRMICA

Com o objetivo de avaliar a estabilidade térmica das matrizes geopolimérica e cimentícia, foram realizados ensaios de exposição em mufla a temperaturas de 200 °C e 400 °C, conforme descrito no item 3.2.2.2. As Figura 20 e Figura 21 apresentam,

respectivamente, as amostras antes e após o ensaio, possibilitando a análise comparativa dos efeitos da temperatura sobre o aspecto superficial e a integridade física dos corpos de prova.

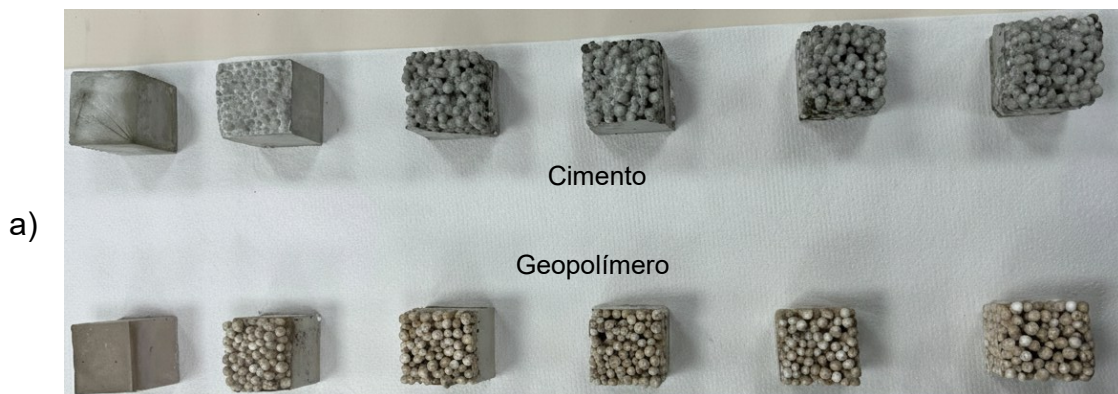
De modo geral, as matrizes geopoliméricas apresentaram melhor estabilidade visual e estrutural frente à elevação de temperatura, quando comparadas às matrizes cimentícias, que mostraram indícios mais acentuados de degradação, especialmente após 400 °C.

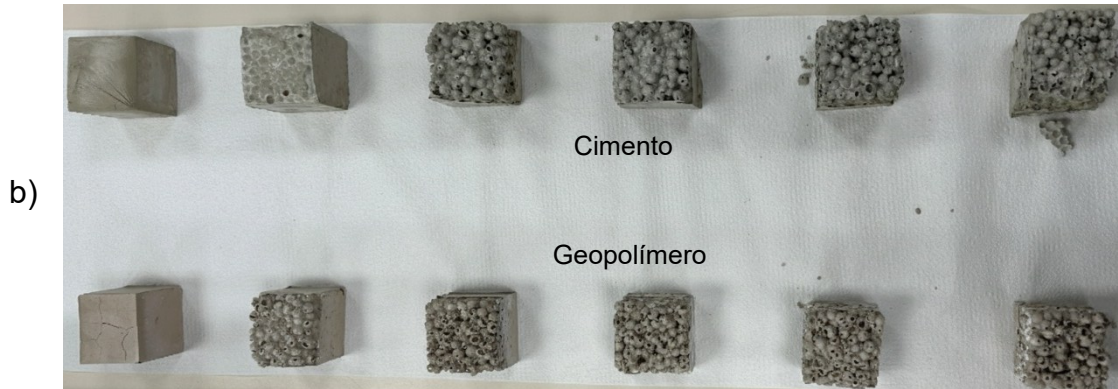
Figura 20 – Amostras do ensaio na temperatura de 200°C a) antes do ensaio e b) após o ensaio



Fonte: A autora, 2025.

Figura 21 – Amostras do ensaio na temperatura de 400°C a) antes do ensaio e b) após o ensaio





Fonte: A autora, 2025.

Após a exposição a 200 °C (Figura 20), observou-se uma mudança discreta na coloração das amostras, tornando-se ligeiramente mais claras para ambas as matrizes. Essa alteração está associada à evaporação de água livre e adsorvida, fenômeno típico nessa faixa de temperatura.

Nas amostras cimentícias, notou-se o surgimento de microfissuras superficiais e leve esbranquiamento, possivelmente decorrente da desidratação parcial do hidróxido de cálcio e da retração térmica diferencial entre a pasta e o agregado.

Nas amostras geopoliméricas, as alterações visuais foram menos expressivas, mantendo a integridade da superfície e sem ocorrência evidente de fissuração. Essa estabilidade é atribuída à estrutura amorfa e termicamente mais resistente da matriz geopolimérica, composta por aluminossilicatos com ligações Si–O–Al mais estáveis sob aquecimento.

Nas amostras de ambas as matrizes que continham pérolas de EPS, observou-se que, a 200 °C, ainda havia presença de pérolas visíveis, indicando que o material polimérico ainda não havia se degradado totalmente nessa temperatura. Segundo Moraes e Brasil (2015), o EPS inicia sua degradação em contato com temperaturas superiores a 80°C a partir do seu núcleo, o que pode ser uma explicação para ainda se ter EPS nas amostras.

Após a exposição a 400 °C (Figura 21), os efeitos da temperatura tornaram-se mais pronunciados. As amostras cimentícias apresentaram maior grau de fissuração, perda de coesão superficial e desagregação parcial de bordas, indicando uma redução significativa da integridade estrutural. Essa degradação está relacionada à desidratação completa do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, à instabilidade da matriz C–S–H e à

consequente formação de micro vazios, os quais comprometem a resistência mecânica.

Nas amostras geopoliméricas, apesar de também apresentarem alterações na coloração, tornando-se mais acinzentadas e opacas, mantiveram-se estruturalmente coesas, sem desprendimentos visíveis ou fissuras expressivas. Esse comportamento confirma a maior resistência térmica das matrizes geopoliméricas, corroborando os estudos de Davidovits (1991), que afirma que os materiais geopoliméricos suportam altas temperaturas.

No caso das formulações com EPS, verificou-se ausência completa das pérolas após a exposição a 400 °C, evidenciando a decomposição total do polímero, com consequente formação de vazios na superfície das amostras. Essa perda do EPS provoca um aumento da porosidade aparente e, portanto, redução da resistência mecânica residual.

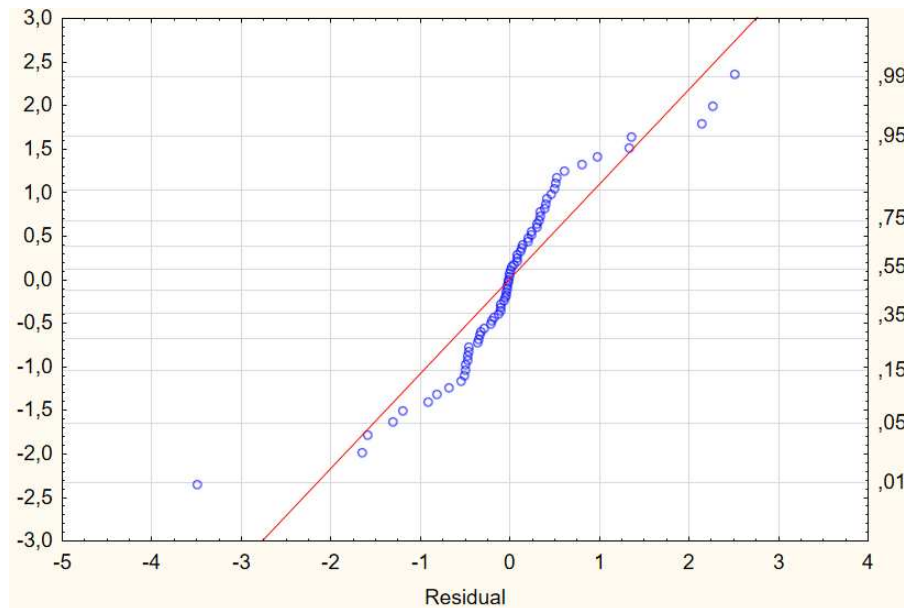
A partir das observações visuais e estruturais, constata-se que a matriz geopolimérica apresentou desempenho mais satisfatório frente à elevação térmica, demonstrando maior estabilidade dimensional e integridade física nas duas faixas de temperatura analisadas. Já a matriz cimentícia mostrou-se mais sensível ao aquecimento, com degradação progressiva e maior comprometimento da coesão superficial.

Esses resultados corroboram estudos (Fernández-Jiménez; Palomo, 2005; Kong; Sanjayan, 2008; Rickard; Van Riessen; Walls, 2012), que indicam que as ligações Si–O–Al do gel geopolimérico possuem maior estabilidade térmica que as ligações C–S–H do cimento Portland, o que confere à matriz geopolimérica melhor desempenho em ambientes de alta temperatura.

4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O Gráfico 5 apresenta a tendência à normalidade dos resíduos do ensaio de resistência à compressão. Verifica-se que a maior parte dos pontos se distribui próximo a linha de referência, com pequenas variações nas extremidades o que indica a ausência de desvio significativo em relação à distribuição normal. Esse alinhamento sugere que os pressupostos estatísticos para aplicação da ANOVA foram atendidos.

Gráfico 5 – Tendência à normalidade das resistências à compressão dos corpos de prova aos 7 e 28 dias de cura

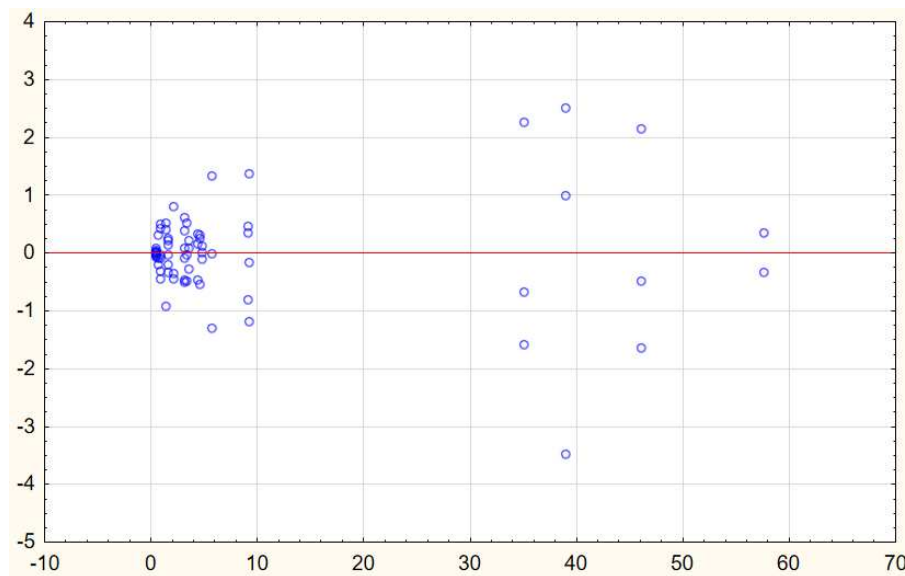


Fonte: A autora, 2025.

O Gráfico 6 de distribuição dos resíduos referente aos resultados de resistência à compressão sugere que o modelo apresenta boa precisão nas estimativas de valores mais baixos de resistência, uma vez que os resíduos se mantêm próximos de zero, indicando pequena diferença entre os valores observados e preditos.

No entanto, observa-se um aumento na dispersão dos resíduos à medida que os valores preditos de resistência à compressão se elevam o que sugere uma redução na capacidade preditiva do modelo nessa faixa, possivelmente associada a maior variabilidade dos dados experimentais ou a limitações do ajuste estatístico.

Gráfico 6 – Dispersão dos resultados em função dos valores da resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 e 28 dias de cura



Fonte: A autora, 2025.

Análise dos resultados de resistência à compressão das pastas cimentícias e geopoliméricas (Gráfico 7) indica que o aumento da adição de EPS promoveu redução significativa na resistência mecânica em ambas as idades avaliadas (7 e 28 dias). Esse comportamento está associado à incorporação de material de baixa densidade e maior porosidade, o que resulta no aumento da quantidade de vazios na matriz e consequentemente redução da área efetiva de contato capaz de resistir aos esforços de compressão. Assim, à medida que o teor de EPS se eleva, observa-se uma perda progressiva da integridade estrutural da matriz, comprometendo a transferência de tensões e a coesão interna do material.

Na pasta cimentícia, o corpo de prova de referência (REF) apresentou resistência média de 35,12 MPa (7 dias) e 46,15 MPa (28 dias), um aumento de 31,41%, evidenciando o ganho típico de resistência decorrente da continuidade das reações de hidratação do cimento Portland ao longo do tempo. As misturas modificadas apresentaram reduções expressivas, com destaque para o traço com 60%, cuja resistência foram de 4,84 MPa (7 dias) e 9,24 MPa (28 dias), representando perdas superiores a 70% em relação à referência. A partir do teor de 70%, os valores de resistência tornaram-se inferiores a 4 MPa, e a tendência de queda se intensifica para teores de 75% e 80%, indicando uma perda acentuada da capacidade de

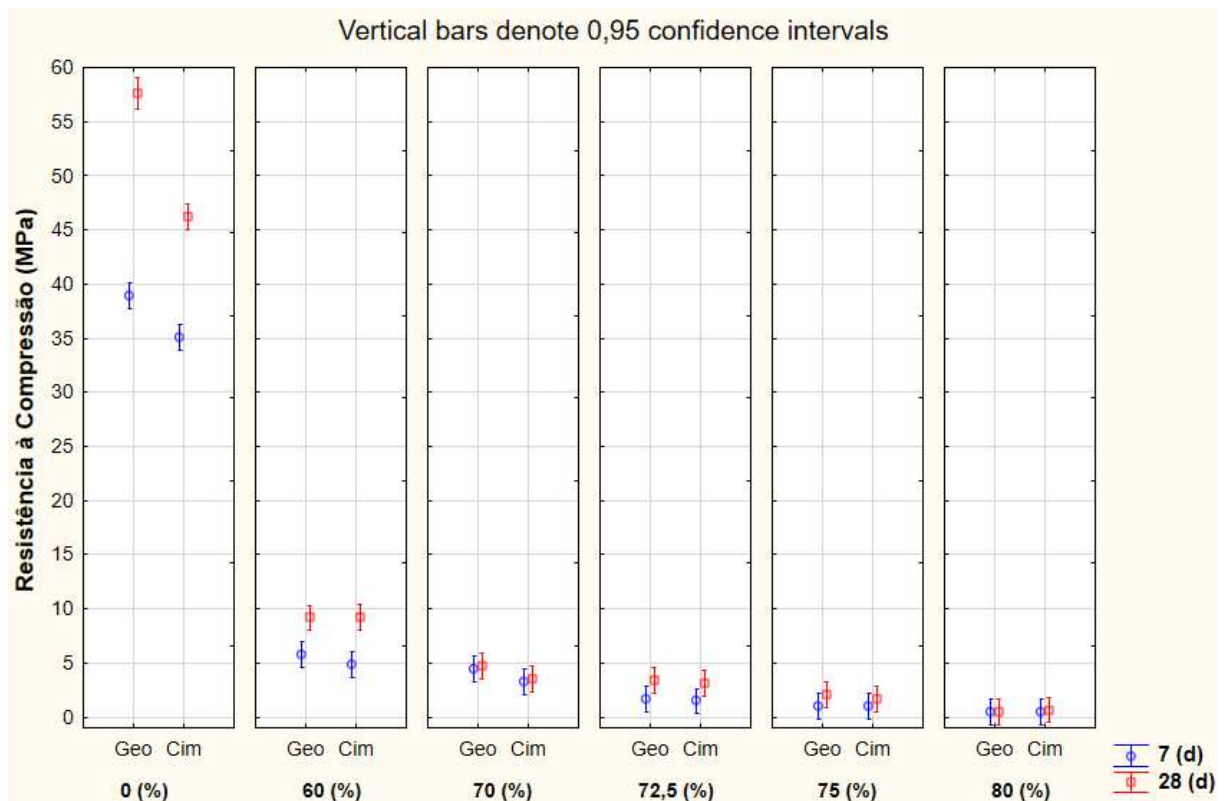
suportar cargas de compressão, possivelmente associada à descontinuidade da matriz e a predominância de zonas frágeis.

Na pasta geopolimérica, comportamento semelhante foi observado. A formulação de referência apresentou resistência de 38,98 MPa (7 dias) e 52,49 MPa (28 dias), um aumento de 34,66%, demonstrando desempenho superior à pasta cimentícia, o que pode ser atribuído a natureza mais densa e homogênea da matriz ativada alcalinamente. No entanto, o aumento do teor de substituição também resultou em decréscimo significativo dos valores médios, com a amostra 60% atingindo 5,78 MPa (7 dias) e 9,15 MPa (28 dias), e os demais compósitos apresentando resistências progressivamente menores. As amostras 80% apresentaram o menor desempenho, com 0,47 MPa tanto aos 7 quanto aos 28 dias, sugerindo que, a partir de determinado teor, a matriz perde completamente sua capacidade de consolidar-se de forma eficiente.

A comparação direta entre as duas matrizes, observa-se que a pasta geopolimérica manteve, em geral, valores ligeiramente superiores de resistência em relação à pasta cimentícia nas mesmas proporções de substituição. Tal comportamento pode ser atribuído à formação da rede tridimensional de aluminossilicatos típica do processo de geopolimerização, que confere melhor integridade microestrutural nos estágios iniciais de cura. Na prática, a incorporação de EPS exerce um impacto significativo sobre o desempenho da pasta, e, à medida que seu teor aumenta, esse efeito passa a dominar o comportamento do material.

Dessa forma, os resultados confirmam que a adição do material de baixa densidade, embora possa contribuir para a redução da massa específica e outras propriedades desejáveis, exerce um impacto negativo pronunciado sobre a resistência mecânica. A tendência observada reforça a importância de limitar o teor de substituição para evitar a perda excessiva de desempenho estrutural mantendo-se um equilíbrio entre leveza e resistência.

Gráfico 7 – Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura das matrizes cimentícias e geopoliméricas com % de EPS adicionado



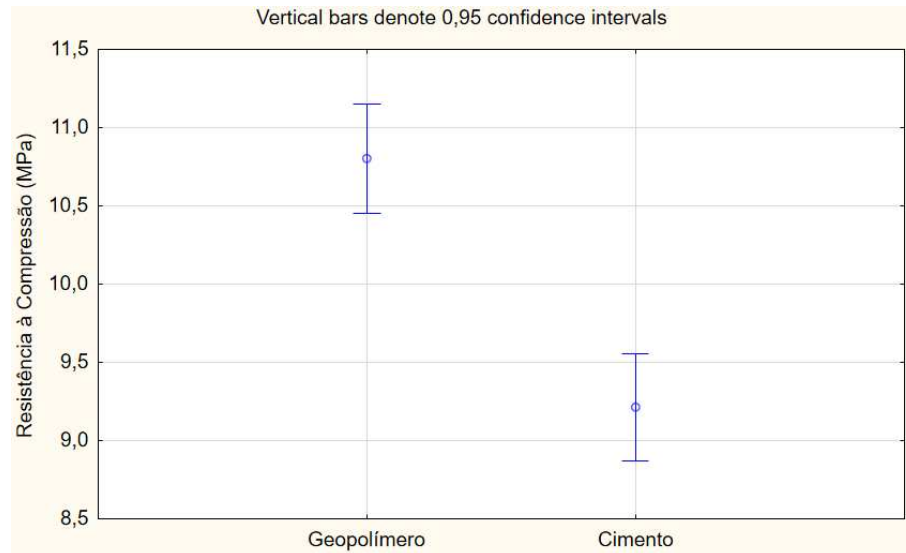
Fonte: A autora, 2025.

A análise dos resultados médios de resistência à compressão, apresentados no Gráfico 8 permite observar que as formulações à base de geopolímero e de cimento Portland apresentaram comportamentos distintos contra essa propriedade mecânica. A matriz a base de geopolímero obteve o maior valor médio de resistência, com aproximadamente 10,8 MPa, enquanto a formulação de cimento Portland registrou um valor médio inferior, em torno de 9,2 MPa. Além da diferença nas médias, os intervalos de confiança (representado pelas barras verticais) para os dois grupos não se sobrepõem, o que é um indicativo visual de que a diferença entre as médias é estatisticamente significativa segundo a análise de variância (ANOVA).

Esse resultado evidencia que o tipo de ligante exerceu uma influência decisiva sobre a resistência final à compressão das amostras, com o geopolímero conferindo uma performance mecânica superior em comparação ao cimento nas condições testadas. A diferença observada (aproximadamente 1,6 MPa) sugere que a natureza química da matriz geopolimérica, caracterizada por uma rede tridimensional rígida e

estável, contribuiu de forma mais eficaz para a capacidade do material de suportar cargas compressivas do que a matriz cimentícia.

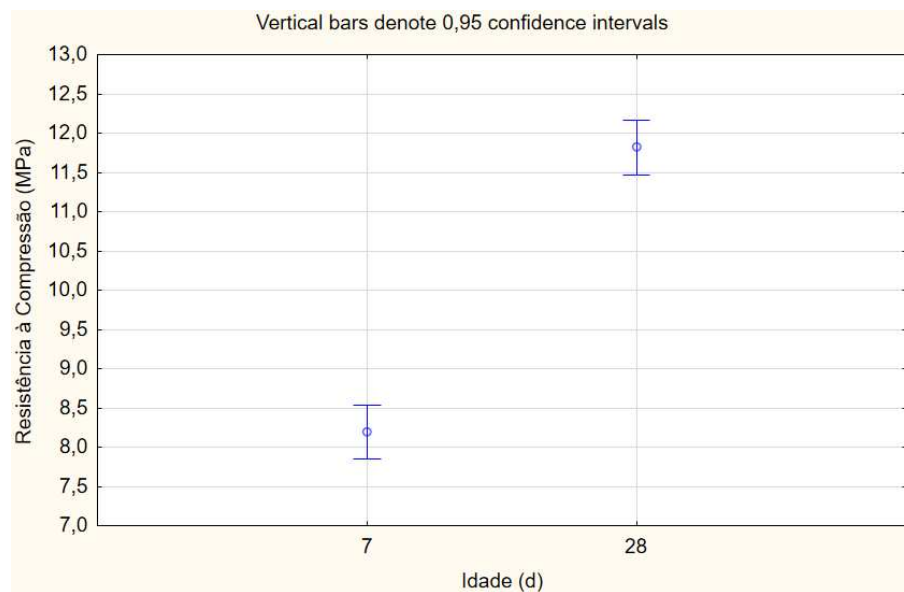
Gráfico 8 – Resultados da média das resistências à compressão obtidas dos corpos de prova considerando constante o tempo de cura e a quantidade de EPS adicionado



Fonte: A autora, 2025.

Ao comparar as idades de cura (Gráfico 9) observa-se um ganho progressivo de resistência ao longo do tempo. Aos 7 dias, a resistência média foi cerca de 8,2 MPa, atingindo aproximadamente 11,8 MPa aos 28 dias, o que representa um aumento em torno de 44%. Esse crescimento está associado à evolução das reações de hidratação, no caso do cimento, e de polimerização, no caso do geopolímero, que promovem o adensamento da microestrutura e o aumento da coesão interna, resultando em maior desempenho mecânico das amostras.

Gráfico 9 – Média dos resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, considerando constante o tipo de matriz e a quantidade de EPS adicionado



Fonte: A autora, 2025.

Na Tabela 10a, a ANOVA aplicada aos resultados de resistência à compressão indicou que todos os fatores principais (idade de cura, tipo de ligante e teor de EPS) apresentar um efeito estatisticamente significativo ($p < 0,05$). Observa-se que o fator EPS (%) apresentou a maior soma dos quadrados ($SS = 15829,63$), representando a principal fonte de variação nos resultados com 66,45% e confirmando que o teor de agregado leve exerce influência dominante sobre a resistência mecânica das amostras. Em seguida, destacam-se a idade de cura ($SS = 231,62$) e o tipo de ligante ($SS = 44,48$), cujos efeitos também foram expressivos, indicando que o tanto o avanço do tempo de cura quanto a natureza do ligante (cimento ou geopolímero) afetam significativamente o desempenho à compressão.

No que se refere às interações entre fatores, todos apresentaram significância estatística ($p < 0,05$), o que demonstra comportamento interdependente das variáveis analisadas. As interações Idade x EPS (%) ($SS = 439,07$) e Tipo x EPS (%) ($SS = 123,45$) se destacaram por seus elevados valores de SS, sugerindo que o efeito do EPS sobre a resistência depende tanto do tempo de cura quanto do tipo de ligante utilizado. A interação tripla Idade x Tipo x EPS (%) ($SS = 35,17$), embora significativa, apresentou magnitude consideravelmente menor, evidenciando um efeito mais modesto quando comparado às demais interações, ainda que suficiente para demonstrar a influência conjunta desses fatores sobre a resposta do material. Assim,

a ANOVA confirma que a resistência a compressão é fortemente influenciada pelo teor de EPS, e que essa influência se manifesta de forma complexa e interativa, variando conforme o tipo de matriz e a idade de cura.

Para aprofundar a interpretação dos resultados da ANOVA apresentados na Tabela 10a, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey que é detalhado na Tabela 10b.

Tabela 10 – a) ANOVA resistência à compressão e b) Médias pareadas. Os asteriscos (*) mostrados na mesma coluna indicam que tais médias não há diferença estatística entre os níveis de tratamentos.

a)		SS	Grau de Liberdade	MS	F	p
	Intercept	7061,98	1	7061,978	6762,163	0,000000
	Idade (d)	231,62	1	231,615	221,782	0,000000
	Tipo	44,48	1	44,476	42,588	0,000000
	EPS (%)	15829,63	5	3165,926	3031,517	0,000000
	Idade (d)•Tipo	5,82	1	5,816	5,569	0,022487
	Idade (d) •EPS (%)	439,07	5	87,814	84,086	0,000000
	Tipo•EPS (%)	123,45	5	24,690	23,641	0,000000
	Idade (d) •Tipo•EPS (%)	35,17	5	7,034	6,735	0,000083
	Error	49,08	47	1,044		
	Total SS	23820,30	71			

b)	Idade (d)	Tipo	EPS (%)	Resistência à Compressão (MPa)													
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
	7	Geo	80	0,47	****												
	28	Geo	80	0,47	****												
	7	Cim	80	0,51	****												
	28	Cim	80	0,67	****												
	7	Geo	75	0,94	****												
	7	Cim	75	0,95	****												
	7	Cim	72,5	1,47	****												
	7	Geo	72,5	1,65	****	****											
	28	Cim	75	1,67	****	****											
	28	Geo	75	2,10	****	****	****										
	28	Cim	72,5	3,15		****	****	****									
	7	Cim	70	3,23		****	****	****	****								
	28	Geo	72,5	3,37			****	****	****								
	28	Cim	70	3,54			****	****	****								
	7	Geo	70	4,39				****	****	****							
	28	Geo	70	4,66				****	****	****							
	7	Cim	60	4,84					****	****							

7	Geo	60	5,78	****
28	Geo	60	9,15	****
28	Cim	60	9,24	****
7	Cim	0	35,12	****
7	Geo	0	38,98	****
28	Cim	0	46,15	****
28	Geo	0	57,65	****

Fonte: A autora, 2025.

Os resultados desse teste evidenciaram uma clara tendência de redução da resistência à compressão com o aumento do teor de EPS, tanto nas misturas cimentícias quanto nas geopoliméricas. As formulações de referência (0% EPS) apresentaram os maiores valores de resistência, com médias superiores a 46 MPa para o cimento e 57 MPa para o geopolímero, diferindo estatisticamente de todas as demais. Esse resultado evidencia o impacto expressivo da incorporação do EPS na integridade estrutural da matriz, já que o material polimérico introduz vazios e descontinuidades que comprometem a capacidade de suporte a esforços compressivos.

As amostras com 60% e 70% de EPS formaram um grupo intermediário, apresentando resistências entre 4,8 e 9,2 MPa. Dentro desse intervalo, algumas formulações cimentícias e geopoliméricas apresentaram comportamento estatisticamente semelhante, como o Geo 60 e o Cim 60, ou o Geo 70 e o Cim 70, indicando que, nesses teores intermediários, o tipo de ligante exerce influência menos pronunciada sobre o desempenho mecânico.

Já as misturas com teores mais elevados, entre 72,5% e 80% de EPS, apresentaram as menores resistências, variando de 0,47 a 3,5 MPa, e não apresentando diferença significativa entre si. Esse comportamento sugere que, em níveis elevados de substituição, a estrutura celular do EPS passa a dominar a resposta mecânica do compósito, tornando a influência do ligante praticamente secundária. Sob o ponto de vista técnico, a redução acentuada da resistência limita o uso dessas formulações em elementos estruturais solicitados. No entanto, os resultados indicam potencial para aplicações não estruturais, como painéis leves, enchimentos e elementos de isolamento, nos quais a baixa densidade e o bom desempenho térmico do EPS são propriedades desejáveis.

Destacam-se as formulações Cim 60 e Geo 60, que, mesmo aos 7 dias de cura já apresentam resistência à compressão superior ao valor mínimo estabelecido

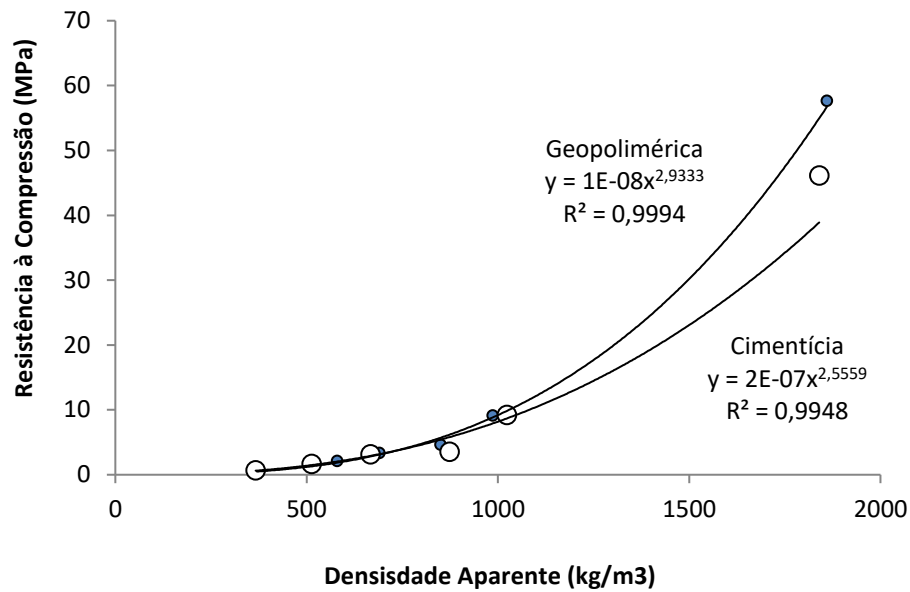
pela NBR 15270 (ABNT, 2023) para blocos de vedação, fixado em 4,0 MPa. Esse desempenho reforça que o uso de agregados leves, como o EPS, pode ser incorporado mantendo uma resistência satisfatória, conforme a finalidade da aplicação, ao mesmo tempo em que contribui para a redução do consumo de matérias-primas convencionais e para práticas mais sustentáveis no desenvolvimento de materiais de construção.

4.4. RESISTÊNCIA MECÂNICA VERSUS DENSIDADE APARENTE

Nos resultados apresentados no Gráfico 10, observa-se uma relação diretamente proporcional entre a densidade aparente e a resistência à compressão para ambas as matrizes analisadas. À medida que a densidade aumenta, verifica-se um crescimento expressivo da resistência mecânica, evidenciando que materiais mais densos apresentam menor quantidade de vazios e, conseqüentemente, uma microestrutura mais compacta e coesa.

A curva superior ($y = 1E-08x^{2,9333}$), corresponde à matriz geopolimérica, apresenta valores de resistência significativamente superiores para a mesma faixa de densidade quando comparada à matriz cimentícia. Esse comportamento indica que, mesmo em condições de menor densificação, a matriz geopolimérica possui melhor eficiência na transmissão de esforços e maior integridade estrutural, possivelmente em função de ligações químicas mais estáveis.

Gráfico 10 – Resistência à compressão vs densidade aparente



Fonte: A autora, 2025.

Ambas as correlações apresentam elevados coeficientes de determinação ($R^2 = 0,9994$ para a matriz geopolimérica e $R^2 = 0,9948$ para a matriz cimentícia), revelando forte dependência entre os parâmetros e excelente ajuste dos modelos exponenciais aos dados experimentais. Assim, constata-se que a densidade aparente constitui um bom indicador da qualidade microestrutural dos compósitos, refletindo diretamente em seu desempenho à compressão.

De modo geral, o comportamento observado reforça a tendência de que o aumento da densificação, associado à redução da porosidade, promove substancial melhoria nas propriedades mecânicas, sendo mais acentuado nas formulações geopoliméricas devido à maior eficiência de ligação em sua matriz.

6. CONCLUSÃO

Com base na análise integrada dos resultados obtidos, foi possível constatar que a adição de poliestireno expandido (EPS) exerceu influência direta sobre as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos desenvolvidos. A densidade aparente foi reduzida progressivamente com o aumento do teor de EPS, confirmando a eficiência do material na produção de compósitos leves. Por outro lado, verificou-se redução proporcional da resistência à compressão, atribuída a maior porosidade e a menor aderência entre as esferas de EPS e a matriz ligante.

Nos ensaios de exposição térmica, as amostras geopoliméricas apresentaram um comportamento mais estável do que as cimentícias, preservando a integridade superficial e resistindo melhor as temperaturas elevadas. A 200 °C, as pérolas de EPS ainda eram observadas na superfície, enquanto a 400 °C ocorreu sua decomposição completa, formando vazios e aumentando a porosidade do material. Mesmo com a volatilização do polímero, as matrizes geopoliméricas mantiveram coesão e estabilidade estrutural superiores, o que confirma a maior resistência térmica dos compósitos ativados alcalinamente em relação aos convencionais à base de cimento Portland.

Os resultados obtidos evidenciam que a associação entre geopolímero EPS constitui uma alternativa tecnicamente viável para o desenvolvimento de materiais leves e termoestáveis, adequados para aplicações não estruturais. Além do potencial funcional, destaca-se o benefício ambiental pela diminuição do uso de matérias-primas e da redução de emissões associadas à produção de cimento Portland.

Entre as alternativas estudadas, a formulação Geo 70 destacou-se como a opção mais vantajosa. Esta mistura apresentou uma combinação equilibrada entre leveza e desempenho mecânico, demonstrando redução significativa da densidade aparente sem comprometer totalmente a integridade estrutural do compósito. Manteve valores de resistência superiores aos traços com teores mais elevados de EPS (72,5%, 75% e 80%), que exibiram maior dispersão e fragilidade, posicionando-se entre os grupos estatisticamente mais favoráveis segundo a ANOVA. Além disso, evidenciou boa uniformidade da matriz geopolimérica, menor incidência de falhas superficiais e comportamento mais estável após exposição térmica a 200 °C e 400 °C, confirmando a superioridade térmica do sistema geopolimérico frente ao cimentício.

Também se destacou por proporcionar um ponto de equilíbrio ideal entre redução de massa específica, desempenho mecânico aceitável e benefícios ambientais associados a diminuição do uso de matérias-primas e ao menor impacto da matriz geopolimérica.

Dessa forma, a formulação Geo 70 demonstra potencial aplicação em compósitos leves destinados a finalidades não estruturais, privilegiando a sustentabilidade, ao uso de materiais com menor densidade e o desempenho térmico. Os resultados obtidos reforçam a relevância da combinação entre geopolímeros e EPS como alternativa técnica e ambientalmente favorável, indicando caminhos promissores para o desenvolvimento de materiais inovadores na construção civil.

6.2. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar o impacto do poliestireno advindo de reaproveitamento em volumes diferentes;
- Testar o uso de fibras naturais como reforço para a propriedade mecânica (resistência à compressão);
- Avaliar o uso de tratamento superficial no poliestireno expandido para melhorar sua aderência com a matriz.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO – ABRAPEX. Manual de utilização EPS na construção civil. São Paulo: Pini, 2006. 124 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. Uma breve história do cimento Portland. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/historia/>. Acesso em: 20 set. 2025.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, ISSN 1678-8621, abr./jun. 2014.

BUSCHLE & LEPPER S.A. Produtos Químicos. Disponível em: <https://www.buschle.com.br/pt/products>. Acesso em: 01 nov. 2025.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. In: Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, pp. 13-21. ISBN: 978-65-87108-26-1. Disponível em: <https://doi.org/10.7476/9786587108612.0002>. Acesso em: 05 out. 2025.

CESARI, V. F. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CINCOTTO, M. A. **Reações de hidratação e pozolânicas**. Concreto: ciência e tecnologia. Tradução. São Paulo: IBRACON, 2022. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/0c40321b-bb62-47e7-9930-ae6114aeebd8/Rea%C3%A7%C3%B5es%20de%20hidrata%C3%A7%C3%A3o%20e%20pozol%C3%A2nicas.pdf>. Acesso em: 01 out. 2025.

CUNHA, M. J. F. M. **Durabilidade de geopolímeros monofásicos**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2013.

DAVIDOVITS, J. 30 years of successes and failures in geopolymer applications: Market trends and potential breakthroughs. Geopolymer Institute. Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Austrália, 2002.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Properties**. Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralogy, Compiègne, France. 1988.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers: inorganic polymeric new materials**. Journal of Thermal Analysis. v. 37, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements, Alkaline Cements and concretes**. 1994 - Kiev, Ukraine, p. 131-144, 1994.

DUXSON, P.; MALLICOAT, S. W.; LUCKEY, G. C.; KRIVEN, W. M., VAN DEVENTER, J. S. J. **The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2007.

FAZARDO, P. A. Desenvolvimento de geopolímeros leves reforçados com fibras de sisal. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura). Centro Tecnológico de Joinville. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2024.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. **Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements**. *Fuel*, v. 84, n. 16, p. 2273–2282, 2005.

GROTE, Z. V., SILVEIRA, J. L. **Processo térmico de reciclagem de poliestireno expandido (isopor): uma realidade para a redução de custos e a conservação de energia**. In: Proceedings of Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Uberlândia, MG, 2001.

HE, J.; JIE, Y.; ZHANG, J.; YU, Y.; ZHANG, G. **Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash based geopolymer composites**. Cement and Concrete Composites, v. 37, p. 108 – 118, mar. 2013.

KONG, D. L. Y.; SANJAYAN, J. G. **Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures**. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 10, p. 986–991, 2008.

MARCONATO, F. A. **Análise do comportamento de argamassa com incorporação de poliestireno expandido**. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura). Centro Tecnológico de Joinville. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2022.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014. 782 p.

MORAES, Carolina Brandão. BRASIL, Paula de Castro. Estudo da viabilidade do Poliestireno Expandido (EPS) na produção de edificações com baixo impacto ambiental. In: 4º SEMINÁRIO NACIONAL DE CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS. Anais... Passo Fundo/RS, nov. 2015. Disponível em: <<https://www.imed.edu.br/Uploads/Estudo%20da%20Viabilidade%20do%20Poliestireno%20>>. Acesso em: 20 out. 2025.

NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J.; SHAIKH, F. U. A. **Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate**. *Ceramics International*, v. 41, n. 4, p. 5696-5704, mai. 2015.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibra de celulose e PVA**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

ODLER, I. Hydration, setting and hardening of Portland cement. In: LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 4. ed. [S.l.]: Elsevier, 2003. p. 157-250.

PINTO, A. T. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. GEO-POL, GEOPOLYMER SYSTEM. Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 2006.

PIREZ, R. **Desenvolvimento de argamassas com adição de poliestireno expandido**. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura). Centro Tecnológico de Joinville. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2017.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland: estudo em pasta**. Tese de D.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

RICKARD, W. D. A.; VAN RIESSEN, A.; WALLS, P. **Thermal character of geopolymers synthesized from metakaolin and fly ash**. *Journal of Materials Science*, v. 47, p. 4876–4883, 2012.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

ROSSETTO, M. **Desenvolvimento de geopolímeros com incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água**. 2017. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura). Centro Tecnológico de Joinville. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2017.

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

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas** – 2ª edição revisada e ampliada. Editora Edgard Blücher Ltda. v. 1, p. 340, 1989.

SCHWAAB, S. **Efeito de cinzas volantes, escória de alto forno e ativadores nas propriedades de cimentos geopoliméricos**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência e

Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville. 2019.

SHI, C.; KRIVENKO, P. V; ROY, D. **Alkali-activated cements and concretes**. London and New York: Taylor&Francis Group, 2006.

SILVA, M. P. *et al.* **Avaliação da estabilidade térmica do poliestireno expandido (EPS) reciclado em materiais compósitos**. Revista Matéria, v. 23, n. 2, 2018.

SIMÕES, A., *et al.* **Ciência e Engenharia de Materiais de Construção**. 1. ed. atual. São Paulo: IST Press, 2012. 1057 p.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **História**. Disponível em: <http://snic.org.br/historia.php>. Acesso em: 20 set. 2025.

SOUSA, S. M. **Efeito da ativação alcalina dos aluminossilicatos nas propriedades mecânicas e microestruturais de compósitos argilosos pesados**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2011.

TESSARI, Janaina. **Utilização de Poliestireno Expandido e Potencial de Aproveitamento de seus Resíduos pela Construção Civil**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Ligantes geopoliméricos: uma alternativa ao cimento Portland?** Revista INGENIUM, n. 116, p. 66-68, nov./dez. 2009.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. 2013. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

WALLAH, S.E.; RANGAN, B.V. **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long term properties**. Faculty of Engineering Curtin University of Technology. Perth, Austrália, 107 p., 2006.