

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

PEDRO ABREU FAZARDO

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS LEVES REFORÇADOS COM FIBRAS
DE SISAL

Joinville

2024

PEDRO ABREU FAZARDO

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS LEVES REFORÇADOS COM FIBRAS
DE SISAL

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: Prof. Dr. Luciano Senff.

Coorientador: Eng. Vinícius Ramon Krause

Joinville

2024

PEDRO ABREU FAZARDO

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS LEVES REFORÇADOS COM FIBRAS
DE SISAL

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), 9 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Senff
Orientador

Eng. Vinícius Ramon Krause
Universidade Federal de Santa Catarina
Coorientador

Profa. Dra. Anelize Borges Monteiro
Universidade Federal de Santa Catarina
Membra

Prof. Dr. Claudimir A. Carminatti
Universidade Federal de Santa Catarina
Membro

Profa. Dra. Valéria Bennack
Universidade Federal de Santa Catarina
Membra

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

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Mariana e Izaias, pelo amor incondicional, pelos sábios conselhos e pelo apoio constante ao longo da minha jornada. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao Professor Luciano Senff, expresso meu mais sincero agradecimento pela paciência, dedicação e orientação indispensáveis para a realização deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos meus amigos Marcelo Sebben, Gabrieli Remor, Guilherme Tonette, Larissa Santos, Thiago de Oliveira, Maria Sagaz, Mateus Naoki, Lucas Pereira, Mônica Nunes e Sabrina Finkler, obrigado por estarem ao meu lado durante esta caminhada. A parceria nos estudos, os trabalhos em grupo e os momentos de descontração tornaram esta experiência ainda mais especial.

Agradeço também aos membros da banca examinadora por gentilmente aceitarem o convite e contribuírem com seu conhecimento neste momento tão significativo.

Por fim, à Universidade Federal de Santa Catarina e a todos os professores, meu profundo reconhecimento pelos conhecimentos transmitidos e pela formação acadêmica que tanto me engrandeceu. Sou grato por cada aprendizado e oportunidade vivida neste espaço.

RESUMO

No que diz respeito ao desenvolvimento sustentável, a construção civil está em constante busca de materiais para reduzir os impactos ambientais causados pela utilização do cimento Portland, já que a sua produção é uma das principais fontes de emissões de CO₂ na atmosfera. Uma das alternativas que tem tomado destaque são os polímeros inorgânicos ou geopolímeros, que são matérias que devido a polimerização, ganham rigidez quando são submetidos a soluções alcalinas. A produção de geopolímeros, a partir de fontes ricas em sílica e alumina, representa uma nova fronteira na pesquisa de materiais. Sua fabricação menos poluente e a sua matriz porosa possibilitam a criação de materiais leves e multifuncionais com propriedades personalizadas e por isso, tem impulsionado o seu desenvolvimento global. Entretanto, a formação de poros na composição gera uma queda significativa na resistência mecânica, de modo que a adição de fibras é uma boa alternativa para tornar viável a incorporação de geopolímeros na construção civil. Neste estudo, o metacaulim foi utilizado como principal fonte de aluminossilicato, enquanto o pó de alumínio atuou como agente porogênico. A solução ativadora alcalina é composta pelo hidróxido de sódio juntamente com o silicato de sódio. Para o reforço das misturas geopoliméricas foram adicionadas fibras de sisal. Os resultados obtidos foram validados pela metodologia estatística ANOVA e mostram que a adição de pó de alumínio exerce uma influência considerável na densidade aparente e na absorção de água, especialmente em concentrações mais altas, enquanto as fibras não apresentaram impacto significativo nessas propriedades. As pastas poliméricas porosas alcançaram 2,26 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de cura, chegaram a valores de densidade de 510 kg/m³ e absorção de água de 47,68%. A análise de otimização de múltiplas variáveis indicou que, para o uso do material em blocos de vedação interna, níveis de pó de alumínio próximos a 0,147% e teores de fibras de sisal em torno de 0,3% são ideais para maximizar a resistência, minimizar a porosidade e otimizar as propriedades dos geopolímeros.

Palavras-chave: Geopolímeros. Pó de alumínio. Fibras de sisal. ANOVA

ABSTRACT

Regarding sustainable development, the construction industry is constantly seeking materials to reduce the environmental impacts caused by the use of Portland cement, as its production is one of the main sources of CO₂ emissions into the atmosphere. One alternative that has gained prominence is inorganic polymers or geopolymers, which are materials that, through polymerization, gain rigidity when subjected to alkaline solutions. The production of geopolymers from sources rich in silica and alumina represents a new frontier in materials research. Their less polluting fabrication process and porous matrix enable the creation of lightweight and multifunctional materials with customized properties, thus driving their global development. However, pore formation in the composition leads to a significant decrease in mechanical strength, so the addition of fibers is a good alternative to make the incorporation of geopolymers in construction feasible. In this study, metakaolin was used as the primary source of aluminosilicate, while aluminum powder acted as the pore-forming agent. The alkaline activating solution consisted of sodium hydroxide combined with sodium silicate. For reinforcing the geopolymeric mixtures, sisal fibers were added. The results obtained were validated using the ANOVA statistical methodology and show that the addition of aluminum powder has a considerable influence on bulk density and water absorption, especially at higher concentrations, while the fibers did not have a significant impact on these properties. The porous polymeric pastes achieved 2.26 MPa of compressive strength at 28 days of curing, density values of 510 kg/m³, and water absorption of 47.68%. The multi-variable optimization analysis indicated that, for the material to be used in internal sealing blocks, aluminum powder levels close to 0.147% and sisal fiber content around 0.3% are ideal to maximize strength, minimize porosity, and optimize the properties of the geopolymers.

Keywords: Geopolymers. Aluminum powder. Sisal fibers. ANOVA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aeroporto Brisbane West Wellcamp, Austrália	17
Figura 2 - Modelo de ativação de Geopolímeros.....	20
Figura 3 – Classificação das Fibras	22
Figura 4 - Planta de Sisal	23
Figura 5 - apresentação dos materiais usados. a) NaOH, b) Pó de alumínio, c) Na_2SiO_3 , d) Metacaulim, e) Fibras de Sisal.....	26
Figura 6 - Distribuição granulométrica do pó de alumínio	28
Figura 7 - Fibra de Sisal	28
Figura 8 - Fluxograma do processo de produção dos corpos de prova	30
Figura 9 - Corpos de prova nos moldes	31
Figura 10 - Materiais Utilizados	31
Figura 11 - Prensa CBR Usimachi equipada com um LVDT Lemaqs e um Datalogger Owntec	33
Figura 12 - Tendência à normalidade dos resultados de densidade aparente dos geopolímeros.....	35
Figura 13 - Densidade aparente dos geopolímeros aos 28 dias de cura	37
Figura 14 – Variação residual dos resultados de densidade aparente	38
Figura 15 - Estrutura dos corpos de prova geopoliméricos: (a) 0,0 PA + 0,0 FB; (b) 0,175 PA + 0,0 FB; (c) 0,35 PA + 0,0 FB	39
Figura 16 - (a) Densidade aparente x pó de alumínio (b) Densidade aparente x fibras de sisal (c) Densidade aparente x fibras e pó de alumínio.	40
Figura 17 - Tendência à normalidade dos resultados de absorção de água.....	41
Figura 18 - Absorção de água dos geopolímeros aos 28 dias de cura	43
Figura 19 - Variação residual dos resultados de absorção de água aos 28 dias de cura	44
Figura 20 – (a) Absorção de água x pó de alumínio (b) Absorção de água x fibras de sisal (c) Absorção de água x fibras e pó de alumínio.	45
Figura 21 - Tendência à normalidade dos resultados de resistência à compressão .	46
Figura 22 - Resistência à compressão dos geopolímeros aos 28 dias de cura	49
Figura 23 - Dispersão dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias de cura	50

Figura 24 - Estrutura dos corpos de prova geopoliméricos em destaque a presença das fibras.....	51
Figura 25 – (a) Resistência à compressão x pó de alumínio (b) Resistência à compressão x fibras de sisal (c) Resistência à compressão x fibras e pó de alumínio	52
Figura 26 - Resistência à compressão x densidade aparente.....	53
Figura 27 - Resistência à compressão x absorção de água.....	54
Figura 28 - Perfis de predição e desejabilidade do sistema	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos geopolímeros e suas aplicações	18
Tabela 2 - Composição Química do Metacaulim	26
Tabela 3 - Características do hidróxido de sódio	27
Tabela 4 - Composição química do silicato de sódio	27
Tabela 5 - Informações técnicas do pó de alumínio	27
Tabela 6 - Proporções para a mistura de referência	29
Tabela 7 - Misturas utilizadas para o desenvolvimento de geopolímeros porosos.....	30
Tabela 8 - Análise de variância para a densidade aparente	36
Tabela 9 - Efeito dos fatores na densidade aparente	36
Tabela 10 - Análise de variância para a absorção de água	42
Tabela 11 - Efeito dos fatores na absorção de água	42
Tabela 12 - Análise de variância para resistência à compressão.....	47
Tabela 13 - Efeito dos fatores na resistência à compressão	48
Tabela 14 - Parâmetros utilizados na otimização simultânea das respostas das amostras de geopolímeros reforçados com fibras.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C – Graus Celsius

A – Área

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – Absorção de água

Al – Alumínio

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

Al₂Si₂O₅(OH)₄ – Caulinita

CO₂ – Dióxido de carbono

CP – Corpo de Prova

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

DA – Densidade Aparente

DTP – Distribuição Total das Partículas

FB – Fibra de Sisal

g – gramas

g/cm³ – Gramas por centímetros cúbicos

GPa – Gigapascal

H₂O – Água

H₂O₂ – Peróxido de hidrogênio

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

LabiConS – Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável

LMS – Laboratório de Mecânica dos Solos

MK – Metacaulim

Mol/L – Mol por Litro

MPa – Megapascal

ms – Massa seca

Msss – Massa saturada de superfície seca

Na₂SiO₃ – Silicato de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

N-A-S-H – Aluminossilicato de sódio hidratado

P – Pressão

PA – Pó de alumínio

RC – Resistencia à compressão

RCTA – Resistência à compressão à temperatura ambiente

Si – Silício

SiO₂ – Dióxido de silício

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SS – Soma

V – Volume

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 GEOPOLÍMEROS	16
2.2 METACAULIM E CAULIM	19
2.3 ATIVADORES ALCALINOS	19
2.4 GEOPOLIMEROS LEVES.....	21
2.5 USO DE FIBRAS.....	21
2.6 FIBRAS DE SISAL	23
3. METODOLOGIA	25
3.1 MATERIAIS	25
3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	29
3.2.1 Definição e produção das amostras	29
3.2.2 Propriedades no estado endurecido	32
<u>3.2.2.1 Densidade aparente e Absorção de água</u>	<u>32</u>
<u>3.2.2.2 Resistência à Compressão</u>	<u>33</u>
3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	34
4. APRESENTAÇÃO DE DADOS	35
4.1 DENSIDADE APARENTE (DA).....	35
4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA (ABS)	41
4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (RC).....	45
4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA VERSUS PROPRIEDADES FÍSICAS.....	53
4.4.1 Densidade Aparente x Resistência à compressão	53
4.4.2 Absorção de água x Resistência à compressão	53
4.5 OTIMIZAÇÃO DE MULTIPLAS VARIÁVEIS	54
5. CONCLUSÃO	58
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e o aquecimento global, impulsionados pelo aumento exponencial de gases de efeito estufa, são as maiores preocupações deste século (Novais, 2016a). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2014), o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO_2) e de outros gases de efeito estufa na atmosfera são os principais responsáveis pela elevação das temperaturas médias anuais observada nas últimas décadas.

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2022), cada tonelada de cimento produzida gera, em média, 611 kg de CO_2 , representando um impacto ambiental significativo, apesar da relevância econômica desse material.

Como uma alternativa promissora ao cimento Portland, os geopolímeros desenvolvidos por Davidovits em 1978, surgem como uma opção menos poluente (Torgal, 2012). Utilizando materiais naturais e resíduos industriais, esses compostos reduzem consideravelmente o impacto ambiental da construção civil e apresentam propriedades mecânicas e durabilidade comparáveis às do cimento convencional (Davidovits, 2015).

Os resíduos utilizados possuem características que variam de acordo com sua composição química, origem e tamanho das partículas, aspectos esses que podem influenciar nas diferentes propriedades do material. No caso das fibras de reforço, essas características podem afetar a resistência, enquanto, no uso de pó de alumínio, elas interferem no tempo de endurecimento, na trabalhabilidade e na porosidade do material produzido (Junior, 2022).

Os geopolímeros são materiais inorgânicos obtidos pela ativação alcalina de aluminossilicatos, resultando em estruturas tridimensionais com ligações covalentes (Davidovits, 1991). Suas vantagens incluem alta resistência à compressão, à corrosão por ácidos, ao fogo, estabilidade térmica e capacidade de imobilização de materiais tóxicos e perigosos.

A produção de geopolímeros leves, ou polímeros inorgânicos, tem atraído interesse por seu potencial como material de construção mais sustentável em comparação ao concreto convencional. Estudos com adição de pó de alumínio como formador de poros demonstraram que apesar de melhorar a distribuição e uniformidade da matriz porosa, foi observada uma redução significativamente a resistência

mecânica (Klettenberg, 2018). Nesse contexto, o uso de fibras como reforço nas pastas geopoliméricas é uma alternativa promissora para ampliar sua aplicação na construção civil.

Com base nas vantagens do uso de geopolímeros, este trabalho concentra-se na elaboração de pastas geopoliméricas feitas a partir de metacaulim como fonte de aluminossilicato, introduzindo o pó de alumínio (PA) como agente formador de poros, e adição de fibras de sisal (FB) para reforço estrutural.

1.1 OBJETIVOS

Para enfrentar os desafios relacionados aos elevados impactos ambientais gerados pela produção de cimento Portland, é proposta a definição de alguns objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é analisar a influência nas propriedades físicas e mecânicas de geopolímeros, com a adição de pó de alumínio como agente formador de poros, e incorporação de fibras de sisal como reforço estrutural.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência da adição de pó de alumínio em diferentes proporções;
- Avaliar a influência das diferentes concentrações de fibras de sisal como agente de reforço do geopolímero poroso através de ensaios resistência à compressão;
- Analisar o desempenho das pastas geopoliméricas em termos de propriedades físicas (densidade aparente e absorção de água) e mecânica (resistência à compressão) após 28 dias de cura;
- Empregar a metodologia estatística (ANOVA) para validação dos resultados, e fazer a otimização das variáveis para achar níveis ideais para a otimização do sistema composicional.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos relacionados aos geopolímeros, abordando suas características, métodos de produção, aplicações e propriedades. Inicialmente, são descritas as propriedades e usos dos geopolímeros na construção civil, destacando seu desempenho em termos de resistência e sustentabilidade. Na sequência, discutem-se os materiais utilizados na síntese geopolimérica e os processos químicos envolvidos na sua formação. Além disso, são explorados os geopolímeros leves, com foco na introdução de porosidade por agentes formadores de poros, e o uso de fibras como uma estratégia eficaz para aprimorar as propriedades mecânicas desses materiais.

2.1 GEOPOLÍMEROS

Os geopolímeros são moléculas inorgânicas de grande dimensão, sintetizadas por meio de reações de policondensação ativada, que podem ocorrer em ambientes altamente alcalinos ou ácidos, utilizando matérias-primas ricas em silício (Si) e alumínio (Al) (Davidovits, 1991). Esses materiais destacam-se 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 (Sotelo-Piña, *et al.*, 2018).

O termo "geopolímero" foi introduzido pelo professor Joseph Davidovits em 1978 para descrever um polímero obtido a partir de matérias-primas inorgânicas. O desenvolvimento inicial desses materiais visava criar um polímero capaz de resistir a altas temperaturas e ao fogo, características frequentemente ausentes em polímeros orgânicos (Skaf, 2008).

As fontes para produção desse material variam desde origens naturais de aluminossilicatos, como a caulinita e argilas, a resíduos industriais, como as cinzas volantes, escórias metalúrgicas, sílica amorfa e cinzas de casca de arroz. Sua síntetização é realizada a temperaturas inferiores a 120 °C, resultando em um baixo consumo energético em comparação com a produção de materiais cerâmicos tradicionais, que exige uma maior quantidade de energia (Sotelo-Piña, *et al.*, 2018).

As aplicações dos geopolímeros são diversas, como exemplo do aeroporto Brisbane West Wellcamp em Toowoomba na Austrália (Figura 1), que se tornou a construção com maior uso de geopolímero (Leite, 2016). A empresa responsável pelo fornecimento do material geopolimérico, chamada Wagners, obteve, após estudos preliminares, resistência média à flexão de 4,80 MPa aos 28 dias.

Figura 1 - Aeroporto Brisbane West Wellcamp, Austrália



Fonte: rmaeng.com (2023).

Quarenta anos após a sua descoberta, a diversidade de geopolímeros aumentou significativamente, e estes materiais estão se consolidando como um novo campo de estudo nas áreas de química e ciência dos materiais. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais cadeias poliméricas formadas por reagentes comuns e suas respectivas aplicações.

Tabela 1 - 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	
	Zeólita			Encapsulamento de resíduos tóxicos	
	Polissialato-siloxo		Sintética	Sílica ativa	Fundição de equipamentos
				Alumina	Equipamento aeroespacial
Polissialato-disiloxo	Sintética	Zeólita	Suporte de membranas		
		Caulim	Materiais de isolamento		
		Metacaulim	Revestimentos refratários		
Fosfatos	Fosfato	Ácida	Natural	Sílica ativa	Revestimentos monolíticos
	Fosfato-siloxo			Sintética	Alumina
	Poli-ferro-sialatos				
Ferro-sialatos	Poli-ferro-sialatos	Alcalina	Lama vermelha (bauxita)		Imobilização de resíduos perigosos
			Escórias de alto-forno		Tijolos
					Agentes ligantes e cimentos
					Reparos de artesanatos e esculturas
			Escórias de alto-forno		Adsorção de metais pesados
					Argamassas e concretos
Construção de pavimentos					
Orgânico-inorgânico	Poli-organo-siloxo	Alcalina e Ácida	Rede polimérica orgânica	Petróleo	
				Álcool Polivinílico	Concreto de alta resistência à compressão
				Resinas epóxi	Imobilização de metais pesados
				Lignina	Fonte de Gás e Óleo
	Ácido húmico			Concreto de alta resistência à flexão	
	Querogênio		Fonte de SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Metacaulim	
				Caulim	

Fonte: Sotelo-Piña *et al.* (2018).

Roy (1999) e Aleem e Arumairaj (2012) afirmaram que existe potencial de aplicação dos concretos geopoliméricos na indústria de pré-fabricados, devido ao maior controle de manuseio e cura dos materiais nesses locais, além da capacidade de utilização do geopolímero em compósitos reforçados com fibras, lajes pré-fabricadas para pavimentação, tijolos e tubos pré-fabricados.

Rangan (2014) afirma que os concretos geopoliméricos possuem boa resistência ao ataque químico e, por isso, são vantajosos para utilização em ambientes agressivos, como os marítimos, solos ricos em sulfatos e locais com alta concentração de dióxido de carbono. Além disso, também podem apresentar elevada

eficiência na mineração, sistemas de esgoto e indústrias de pré-moldados, devido à alta resistência aos ácidos apresentados por esse material.

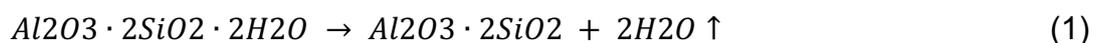
2.2 METACAULIM E CAULIM

O Metacaulim de Alta Reatividade, comumente conhecido como Metacaulim (MK), é amplamente reconhecido como uma adição mineral altamente eficaz em concretos e produtos à base de cimento Portland. Seu uso visa aprimorar tanto as resistências mecânicas quanto a durabilidade das estruturas fabricadas com esses materiais (Rocha, 2005). A matéria-prima para a produção do metacaulim é o caulim, uma argila resultante da alteração de diversas rochas amorfas e cristalinas, sendo a caulinita o principal argilomineral presente no caulim (Maccarini, 2015).

A composição química dos caulins aproxima-se de $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, o que corresponde a cerca de 45,54% de SiO_2 , 39,50% de Al_2O_3 , 13,96% de H_2O e outros elementos em menores quantidades (MONTE *et al.*, 2003). O Caulim é obtido através do beneficiamento de argilas caulínicas, cujos teores de caulim, em geral, situam-se acima de 50% (Rocha, 2005).

Para a produção de metacaulim, o caulim sofre um tratamento térmico, chamado de calcinação. Segundo Davidovits (1994), com a transformação do caulim em metacaulim, o material se torna muito mais reativo, com propriedades pozolânicas, ou seja, ele possui composição silico-aluminosa e depende de uma ativação alcalina para obter propriedades cimentícias.

A calcinação, basicamente, remove a água presente na caulinita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), o que altera a estrutura do material, transformando-o em uma fonte amorfa de aluminossilicatos ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), conhecida como metacaulinita. Esse processo, chamado de desidroxilação, está representado na Equação 1. (Ilić, *et al.*, 2010).



2.3 ATIVADORES ALCALINOS

A produção de cimento geopolimérico exige a combinação de um material à base de aluminossilicato, um reagente alcalino (como silicatos solúveis de sódio ou

potássio) e água (Davidovits, 2013). O hidróxido de sódio (NaOH) é o ativador de hidróxido mais comumente utilizado na síntese de geopolímeros, sendo tanto o mais barato quanto o mais amplamente disponível entre os hidróxidos alcalinos.

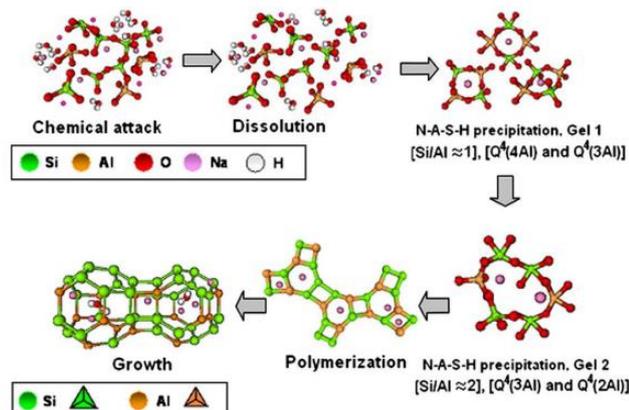
Segundo Fernández (2009), o tipo de material utilizado como reagente químico e a quantidade de íons hidroxila presentes na solução após a adição de água são fatores que influenciam diretamente o desenvolvimento da resistência do geopolímero, de modo que o aumento na concentração molar tende a resultar em uma maior resistência do material.

A concentração do reagente usado na formulação do geopolímero ainda é um tema muito estudado e de muita incerteza no meio científico. De acordo com Konmitsas e Zaharaki (2007), o excesso de ativador pode levar à formação de carbonato de sódio quando exposto ao ar. Para Olivia *et al.* (2014), a concentração de NaOH geralmente varia entre 5 e 16 molar. Maccarini (2015) ainda complementa que a relação ideal Sólido/Líquido para pastas de metacaulim ativadas com NaOH é 1,4.

Diferentemente da hidratação do cimento Portland, que resulta no gel C-S-H, o processo de ativação alcalina dos geopolímeros é completamente distinto. Glukhovsky (1967) divide esse processo em três estágios: o primeiro é a destruição-coagulação, seguido pela coagulação-condensação, e, por fim, o estágio de condensação-cristalização.

O produto do terceiro estágio, que assume uma forma cristalina, é um aluminossilicato alcalino hidratado $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$, do tipo gel (N-A-S-H gel). A descrição detalhada desse modelo está ilustrada na Figura 2.

Figura 2 - Modelo de ativação de Geopolímeros



Fonte: Shi (2010).

2.4 GEOPOLÍMEROS LEVES

O conceito de geopolímeros leves baseia-se na introdução de poros ou vazios na mistura, permitindo, através de diversas técnicas, a criação de diferentes tipos desse material. Com aplicações amplas na construção civil e em outras indústrias, os geopolímeros leves são especialmente valorizados como isolantes térmicos, sendo suas propriedades de leveza e resistência ao fogo atrativas para fins comerciais (Novais, 2016b).

A produção de geopolímeros porosos geralmente inclui a adição de agentes formadores de poros, como peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e pós de alumínio e zinco, diretamente na pasta de geopolímero. Esses agentes impactam o processo de geopolymerização, influenciando a consistência e a resistência dos materiais resultantes (Novais, 2016b).

A dissolução do alumínio em soluções alcalinas gera gás hidrogênio, formando vazios na estrutura dos geopolímeros, enquanto o silicato de sódio age como inibidor de corrosão ao criar uma camada de aluminossilicato que estabiliza o potencial da solução. A eficácia da porosidade depende da concentração de alumínio e das condições de reatividade e cura da pasta, fatores essenciais em compósitos porosos (Ngouloure *et al.*, 2015).

Essa característica torna os geopolímeros promissores em diversas aplicações, como demonstrado por Rui Novais (2016) no uso desses materiais como solução tampão em tratamentos de efluentes, devido à sua capacidade de prolongar o tempo de atuação e à facilidade de remoção. Contudo, a criação de estruturas porosas nos geopolímeros geralmente compromete a resistência mecânica dos compósitos, um desafio que tende ser mitigado pela incorporação de fibras como estratégia para melhorar a resistência sem prejudicar a funcionalidade dos materiais.

2.5 USO DE FIBRAS

Os geopolímeros, além de ser uma alternativa mais sustentável devido à sua menor emissão de carbono na atmosfera, oferecem algumas vantagens importantes em relação ao cimento Portland. Entre essas, destacam-se sua maior resistência a ataques de ácidos e a durabilidade em ciclos de congelamento e descongelamento.

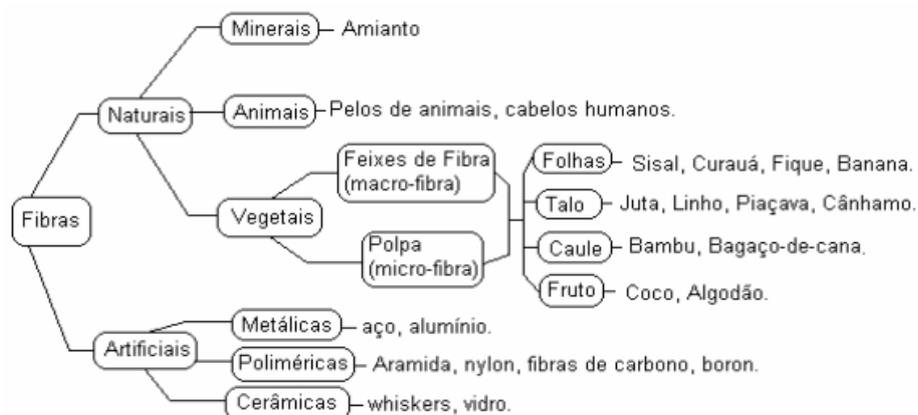
Contudo, apesar dessas propriedades positivas, os geopolímeros ainda apresentam certa fragilidade quando submetidos a forças externas. Em particular, sua resistência à compressão e à flexão tende a ser relativamente baixa em composições porosas (Junior, 2022).

Para superar essas limitações, pesquisadores têm explorado a incorporação de fibras na matriz geopolimérica como uma forma de melhorar o desempenho mecânico desses materiais. Assaedi *et al.* (2015) observaram um aumento de 369% na resistência à compressão ao utilizar um geopolímero de cinza volante reforçado com tecido de linho, correspondente a 4,1% em massa de fibras de linho.

A busca por novos reforços naturais para compósitos à base de geopolímeros representa um desafio inovador e promissor. O uso de fibras naturais, em especial, vem sendo estudado intensivamente para aprimorar as propriedades físicas, mecânicas e químicas desses compósitos, de forma a atender às demandas do mercado e expandir as aplicações dos geopolímeros em setores variados (Moe e Kin, 2002; Aquino *et al.*, 2003).

As fibras vegetais provêm de fontes renováveis e abundantes, principalmente nos trópicos. A sua considerável biodegradabilidade pode contribuir para um saudável ecossistema e seu baixo custo e razoável desempenho atendem aos interesses econômicos de muitas indústrias. A Figura 3 mostra, esquematicamente, as principais fontes das fibras por classe.

Figura 3 – Classificação das Fibras



Fonte: Toledo (2000).

2.6 FIBRAS DE SISAL

O sisal (Figura 4), é uma planta cultivada em regiões semiáridas que tem amplos usos comerciais. No Brasil, os principais produtores são os estados da Paraíba e especialmente a Bahia, onde está localizado o maior polo produtor e industrial do sisal no mundo. Do sisal, utiliza-se principalmente a fibra das folhas que, após o beneficiamento, é destinada principalmente à indústria de cordoaria (Correia, 2011).

Figura 4 - Planta de Sisal



Fonte: wikipedia.org (2024).

A produção de fibras de sisal começa com a remoção da polpa que envolve a fibra da folha, feita por raspagem mecânica. Em seguida, apenas 4% do material se converte em fibra na etapa de desfibramento. Após isso, as fibras são secas em fios de arame e passam pelo batimento, processo que remove o pó restante. Por fim, as fibras são enfardadas para comercialização (Alves, 2018).

As propriedades mecânicas do reforço fibroso em compósitos poliméricos dependem, principalmente, de três fatores: módulo de resistência da fibra, estabilidade química da matriz polimérica e ligação efetiva entre matriz e reforço na transferência de forças através da interface (Alves, 2018).

Silva, Mobasher e Toledo Filho (2009) investigaram o uso de fibras de sisal como reforço em uma matriz cimentícia. As fibras, lavadas e cortadas em 40

centímetros, foram organizadas em camadas, compondo 10% do volume da argamassa. A mistura utilizou 50% de cimento Portland, 30% de metacaulim e 20% de resíduos de tijolos de argila, além de um aditivo superplastificante e 5% de fibras. Após 24 horas de desmoldagem e 28 dias de cura úmida, observaram que as fibras de sisal ajudaram a controlar fissuras, promovendo craqueamento múltiplo e melhor desempenho mecânico. A resistência à tração e o módulo de elasticidade do compósito foram de 12 Megapascal (MPa) e 34,17 Gigapascal (GPa), respectivamente.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais, métodos e equipamentos utilizados na produção das pastas geopoliméricas, com o propósito de avaliar o efeito de diferentes proporções de pó de alumínio e da adição de fibras de sisal como reforço nas amostras. Para isso, foi desenvolvido um plano experimental no qual esses componentes foram testados tanto separadamente em formulações distintas quanto de forma combinada, com o objetivo de caracterizar as propriedades do material final.

Todos os ensaios laboratoriais necessários para a produção dos corpos de prova foram conduzidos no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabIConS), situados na UFSC Joinville.

3.1 MATERIAIS

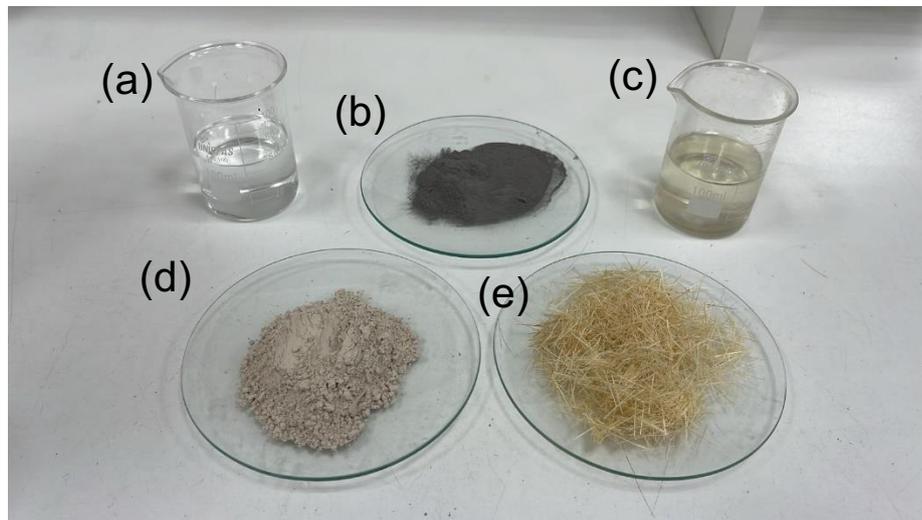
Pastas geopoliméricas são compostas pela combinação de materiais ricos em aluminossilicatos com uma solução ativadora alcalina. Neste estudo, buscou-se desenvolver alternativas para substituir a pasta de cimento Portland por um aglomerante estruturalmente similar, mas com menor impacto ambiental, como os geopolímeros.

Para isso, a pasta proposta foi formulada com metacaulim como aglomerante, desempenhando uma função similar à do cimento Portland, uma solução ativadora composta por NaOH (10 molar) e Na_2SiO_3 , além de pó de alumínio (PA) para geração de porosidade na estrutura. Fibras de sisal (FB) foram incorporadas como reforço estrutural.

Além disso, o desenvolvimento das misturas incluiu etapas de diferentes proporções de adição de pó de alumínio e de fibras de sisal, com o objetivo de obter um material poroso e reforçado. Os testes realizados após 28 dias de cura avaliaram a resistência mecânica (compressão), bem como propriedades físicas (densidade aparente e absorção de água).

A Figura 5 apresenta todos os materiais usados para a produção dos corpos de provas das argamassas.

Figura 5 - apresentação dos materiais usados. a) NaOH, b) Pó de alumínio, c) Na_2SiO_3 , d) Metacaulim, e) Fibras de Sisal



Fonte: Autor (2024).

Para a produção dos corpos de prova, foi empregado o metacaulim denominado Metacaulim HP, fornecido pela empresa Metacaulim Brasil. Esse material está em conformidade com as especificações da norma NBR 15894/10. A composição química do metacaulim foi analisada por CERMAT (2015) por meio de ensaio de fluorescência de raios-X, com os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição Química do Metacaulim

METACAULIM										
Óxidos	Al₂O₃	CaO	Fe₂O₃	K₂O	MgO	MnO	Na₂O	P₂O₅	SiO₂	TiO₂
Teor (%)	32,6	0,08	2,26	2,13	0,59	< 0,05	< 0,05	0,06	57	1,51
Perda ao fogo						2,62%				
Área Específica						32700 m ² /kg				

Fonte: CERMAT (2015).

O hidróxido de sódio (NaOH), conhecido como soda cáustica, e o silicato de sódio (Na_2SiO_3) foram empregados como ativadores alcalinos no processo de polimerização das argamassas. O hidróxido de sódio, com concentração de 10 Mol/L, e o silicato de sódio, com 98% de pureza, foram fornecidos pela empresa Buschle &

Lepper S/A e pela Quimidrol, respectivamente. As especificações técnicas desses produtos estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - 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 4 - 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 (SiO_2)/(Na_2O)	3,02	3,59
Água (%)	61,00	63,00

Fonte: Buschle & Lepper S/A (2022).

Para promover a formação de poros nas pastas geopoliméricas, utilizou-se o pó de alumínio fornecido pela empresa Alcoa, localizada em Poços de Caldas, Minas Gerais. Esse foi incorporado às formulações junto com os demais componentes. As informações técnicas desse material estão descritas na Tabela 5.

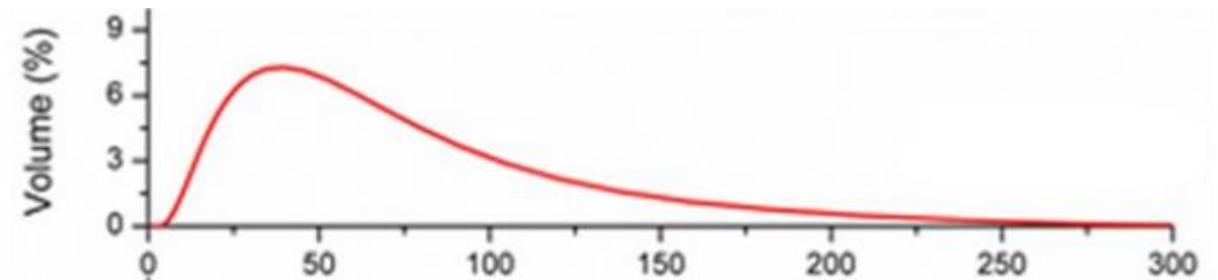
Tabela 5 - Informações técnicas do pó de alumínio

Al (%)	Fe (%)	Si (%)	Outros Metais Total (%)
99,7	0,21	0,05	0,02

Fonte: Alcoa do Brasil (2019).

A análise granulométrica da amostra de pó de alumínio foi realizada por Klettenberg (2018) no Laboratório do Curso de Farmácia da Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis. Para determinar a Distribuição Total das Partículas (DTP), ou seja, a distribuição de tamanho das partículas na amostra, foi utilizado o equipamento Mastersizer 2000. A distribuição granulométrica do pó de alumínio aplicado nas formulações está representada na Figura 6.

Figura 6 - Distribuição granulométrica do pó de alumínio



Fonte: Klettenberg (2018).

Neste estudo, foram produzidas pastas geopoliméricas reforçadas com fibras de sisal fornecidas pelo Prof. Dr. Claudimir A. Carminatti, conforme ilustrado na Figura 7. As fibras foram recebidas como são encontradas no mercado e, posteriormente, cortadas com o auxílio de uma guilhotina, com o objetivo de deixá-las no comprimento de 14 milímetros.

Figura 7 - Fibra de Sisal



Fonte: Autor (2024).

Avaliou-se o impacto da quantidade de fibras na densidade aparente, na absorção de água e na resistência à compressão. Esta pesquisa busca aprofundar o conhecimento sobre a influência das fibras, em conjunto com o efeito do pó de alumínio, nas propriedades dos geopolímeros, contribuindo para reduzir a lacuna de informações nessa área.

3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão detalhados os métodos empregados no desenvolvimento dos geopolímeros leves com a adição das fibras de sisal.

3.2.1 Definição e produção das amostras

Foram desenvolvidas nove formulações para avaliar os efeitos do pó de alumínio, como agente formador de poros, e da adição de fibras de sisal como reforço estrutural. Com base nesses testes, buscou-se estabelecer uma relação entre o efeito combinado desses materiais na matriz geopolimérica porosa.

Inicialmente, uma formulação de referência foi proposta (Tabela 6), baseada nas proporções de propriedades físicas e químicas recomendadas por Davidovits (1994) para evitar eflorescência.

Tabela 6 – Proporções, em massa, para a mistura de referência

MK	NaOH	Na₂SiO₃	Razão S/L
55%	15%	30%	1,22

Fonte: Autor (2024).

A partir dela, foram desenvolvidas misturas, adicionando apenas fibras de sisal (FB) em 0,50% e 1,00% (em massa), pó de alumínio fino (PA) em 0,175% e 0,35% (em massa), e, por fim, uma combinação de ambos. A Tabela 7 apresenta todas as formulações utilizadas na presente pesquisa.

Tabela 7 - Misturas utilizadas para o desenvolvimento de geopolímeros porosos

MK (%)	NaOH (%)	Na ₂ SiO ₃ (%)	PA (%)	FB (%)
55,00	15,00	30,00	0,175	-
55,00	15,00	30,00	0,35	-
55,00	15,00	30,00	-	0,50
55,00	15,00	30,00	-	1,00
55,00	15,00	30,00	0,175	0,50
55,00	15,00	30,00	0,175	1,00
55,00	15,00	30,00	0,35	0,50
55,00	15,00	30,00	0,35	1,00

Fonte: Autor (2024).

O processo de produção dos corpos de prova cúbicos, de aresta medindo aproximadamente 4 centímetros seguiu a sequência apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma do processo de produção dos corpos de prova



Fonte: Autor (2024).

Primeiro, a solução ativadora (NaOH+ Na₂SiO₃) foi misturada mecanicamente por 2 minutos. Em seguida, essa solução foi adicionada ao metacaulim e misturada por mais 10 minutos. Para garantir homogeneidade, a mistura foi pausada com aproximadamente 5 minutos, por 1 minuto, para uma agitação manual, removendo o material das laterais do recipiente, e depois levada novamente ao misturador. Em seguida, foram adicionadas as quantidades de pó de alumínio e misturados por 1 minuto. A incorporação das fibras ocorreu no 1 minuto final.

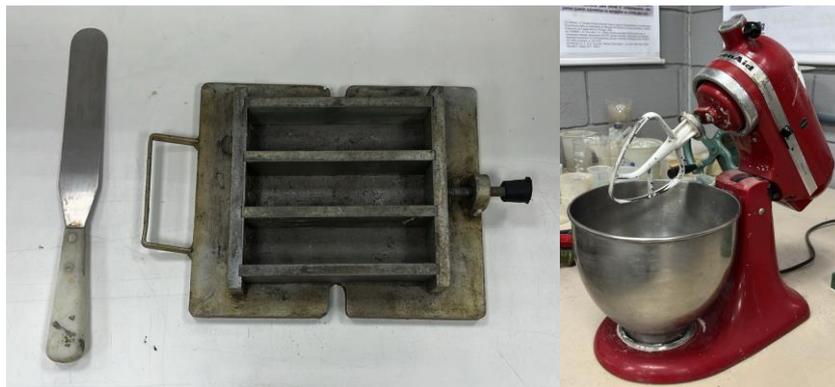
Após esse processo, a mistura foi despejada no molde de corpo de prova prismático, com separadores a cada 4 centímetros para formar blocos cúbicos, como mostra a Figura 9. Cada formulação gerou 5 corpos de prova (CP). Os equipamentos e materiais utilizados estão representados na Figura 10.

Figura 9 - Corpos de prova nos moldes



Fonte: Autor (2024).

Figura 10 - Materiais Utilizados



Fonte: Autor (2024).

Os corpos de prova ficaram 24 horas em temperatura ambiente de aproximadamente 22 °C e após esse período foram desenformados e posicionados em uma sala com temperatura controlada (aproximadamente 24 °C) até que alcançassem 28 dias de cura.

3.2.2 Propriedades no estado endurecido

Após a cura dos corpos de prova, realizada ao longo de 28 dias, foram realizados ensaios para analisar as propriedades mecânicas do material (resistência à compressão). Além disso, foram avaliadas as propriedades físicas, como a densidade aparente e absorção de água.

3.2.2.1 Densidade aparente e Absorção de água

Para obtenção da densidade aparente, as amostras foram levadas à estufa a $50^\circ \pm 1^\circ\text{C}$ por 24 horas. Em seguida, foram realizadas as medidas dos corpos de prova e os resultados das densidades foram determinadas seguindo a equação 2

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{m_s}{V} * 1000 \quad (2)$$

Onde:

M_s é a massa seca, em gramas;

V é o volume da amostra, em cm^3 ;

A análise da absorção de água foi realizada de acordo com a norma NBR 9778 (Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazio e massa específica) (ABNT, 2005). Esses ensaios foram aplicados às matrizes geopoliméricas conforme as formulações descritas, após um período de 28 dias de cura.

Para o ensaio de absorção de água, foram utilizados os mesmos corpos de prova previamente secos em estufa e cuja massa seca (M_s) já havia sido determinada. Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 72 horas, assegurando a saturação completa. Antes de determinar a massa saturada com superfície seca (M_{SSS}), as superfícies das amostras foram cuidadosamente secas para evitar interferências nos resultados.

Após a obtenção de todas as massas, utilizou-se a Equação 3 para determinar a absorção de água.

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

M_{ss} é massa saturada com superfície seca, em gramas;

M_s é a massa seca, em gramas;

3.2.2.2 Resistência à Compressão

Para o rompimento dos corpos de prova porosos foi utilizado uma Prensa CBR Usimachi, equipada com os seguintes dispositivos: uma Célula de carga MK de 5 toneladas para medição de esforços aplicados, um LVDT Lemaqs com curso de 25 milímetros para medições de deslocamento, e um Datalogger Owntec, responsável pelo registro e processamento dos dados obtidos durante os ensaios. A Figura 11 apresenta os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Universidade Federal de Santa Catarina, em Joinville/SC.

Figura 11 - Prensa CBR Usimachi equipada com um LVDT Lemaqs e um Datalogger Owntec



Fonte: Autor (2024)

Os ensaios de compressão para as amostras densas foram feitos na Perville Engenharia e Empreendimentos utilizando uma prensa hidráulica calibrada com capacidade máxima de 100 toneladas força.

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos em conformidade com os critérios estabelecidos pela norma NBR 11222/2002, que trata da determinação das resistências à flexão e à compressão de materiais refratários densos não conformados à temperatura ambiente. A resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA) foi calculada utilizando a Equação 4.

$$RCTA = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Onde:

P é a carga atingida no momento da ruptura, em Newtons;

A é a área de aplicação de carga, em milímetros quadrados;

Os ensaios de ruptura dos corpos de prova foram realizados após o período de cura de 28 dias, seguindo os critérios estabelecidos para a avaliação. Para cada traço, foram utilizados três corpos de prova, garantindo representatividade nos resultados obtidos e maior confiabilidade nas análises realizadas.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Para a interpretação dos resultados das propriedades físicas e à resistência mecânica dos compósitos geopoliméricos porosos, um procedimento estatístico denominado análise de variância (ANOVA) foi aplicado com o uso do software Statistica. Através dessa metodologia foi possível avaliar os erros relacionados ao procedimento experimental (erro puro). Além disso, a identificação das fontes de variação referente à adição de diferentes percentuais de pó de alumínio e fibras de sisal foram também realizadas. A metodologia permite comparar as médias de diferentes grupos independentes e verificar se há diferenças estatisticamente significativas entre eles.

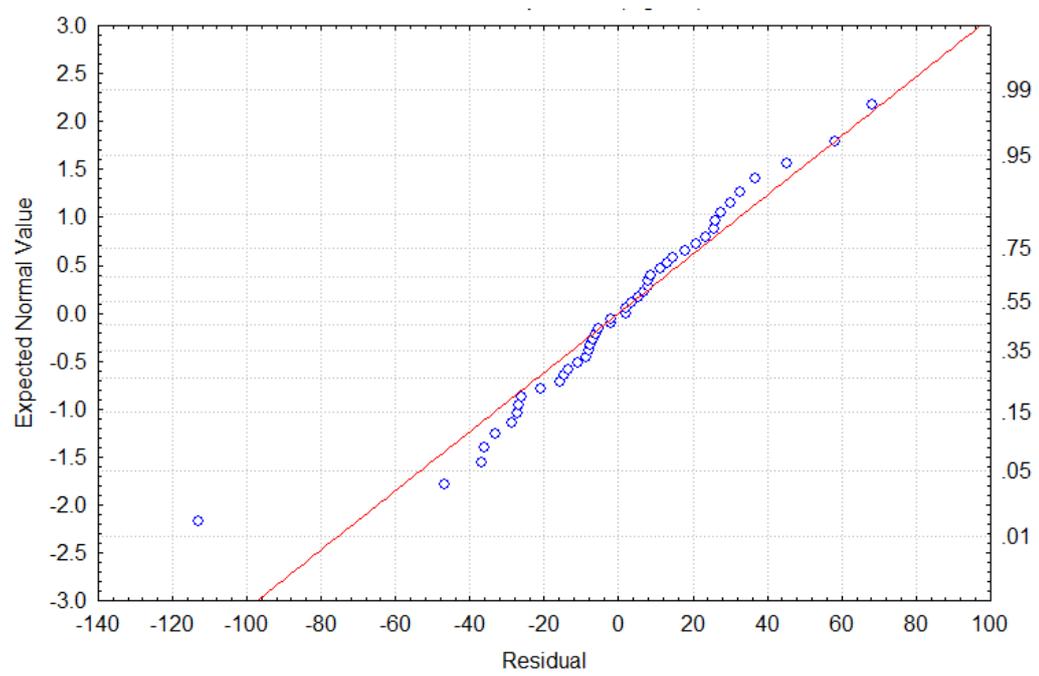
4. APRESENTAÇÃO DE DADOS

Neste capítulo, será realizada a apresentação dos resultados obtidos neste trabalho, como as propriedades físicas e mecânicas dos geopolímeros para as diferentes adições propostas em seu estado endurecido.

4.1 DENSIDADE APARENTE (DA)

Observa-se que os resultados obtidos para a densidade aparente apresentaram uma distribuição bem próxima à normalidade, em que praticamente todos os valores estão alinhados sobre a reta, como mostra a Figura 12. Esse resultado é especialmente relevante, pois indica que quanto mais próximo da normalidade os dados se encontram o procedimento de análise pela ANOVA pode ser realizado. Essa característica reflete a consistência dos ensaios realizados e reforça a validade das conclusões relacionadas a essa propriedade.

Figura 12 - Tendência à normalidade dos resultados de densidade aparente dos geopolímeros



Fonte: Autor (2024).

Os dados laboratoriais permitiram a construção da tabela de análise de variância (Tabela 8), cujos resultados indicam que o p-valor associado ao pó de alumínio (PA) foi inferior a 0,05. Isso mostra que esse fator exerce uma influência estatisticamente significativa para a densidade aparente dos corpos de prova, evidenciando que ao menos uma das médias é significativamente diferente das demais. Em contraste, o p-valor para as fibras (FB) foi superior a 0,05, indicando que sua variação não apresentou um impacto relevante sobre a densidade.

Tabela 8 - Análise de variância para a densidade aparente

	SS	GL	MS	F	p
(1)AL (%) L+Q	9306035	2	4653017	4359,067	0,000000
(2)Fb (%) L+Q	3063	2	1532	1,435	0,251428
1*2	10607	1	10607	9,937	0,003259
Lack of Fit	2432	3	811	0,760	0,524214
Pure Error	38428	36	1067		
Total SS	9360565	44			

Fonte: Autor (2024).

No contexto da Análise de Variância (ANOVA), o valor de SS (Soma de Quadrados) é um indicativo da variância dos resultados e da contribuição de cada fator no total dessa variância. Observa-se que o pó de alumínio (AL) apresentou uma contribuição expressiva para o SS total, reforçando sua importância como fator determinante no comportamento do sistema.

Com o objetivo de detalhar os efeitos calculados de ambos os fatores, a Tabela 9 apresenta a magnitude e o impacto relativo de cada um isoladamente no sistema avaliado.

Tabela 9 - Efeito dos fatores na densidade aparente

Efeito	
Mean/Interc.	890,30
(1)AL (%) (L)	-993,84
AL (%) (Q)	-435,67
(2)Fb (%) (L)	8,22
Fb (%) (Q)	-15,99
1L by 2L	46,06

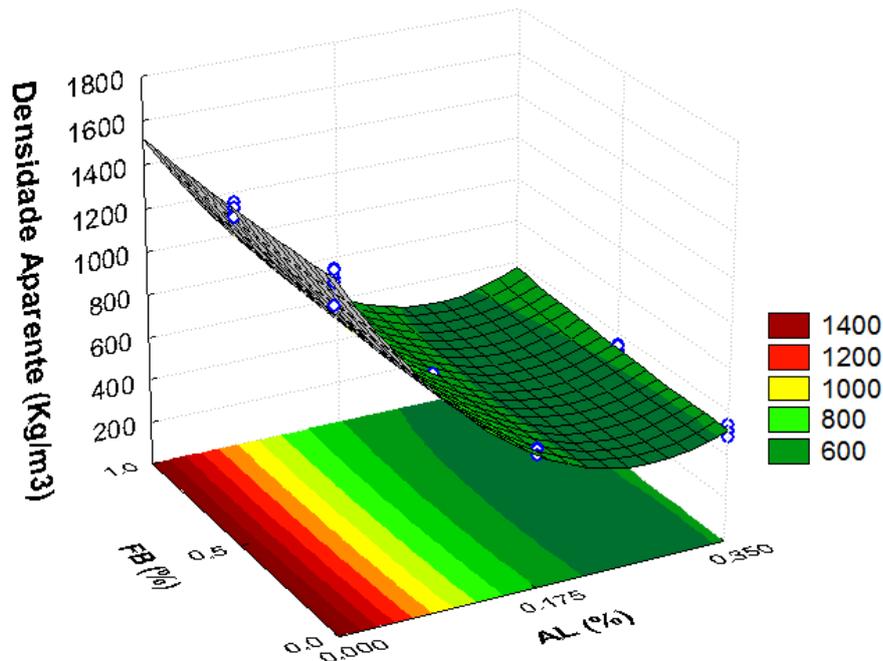
Fonte: Autor (2024).

Os resultados indicam que o efeito calculado de -993,84 quantifica o impacto do pó de alumínio na densidade aparente. O coeficiente negativo mostra que o aumento na quantidade de pó de alumínio na mistura está diretamente relacionado à redução da densidade. Esse comportamento pode ser atribuído à geração de uma estrutura mais porosa devido à liberação de gases logo após o contato do pó de AL com a pasta geopolimérica.

Por outro lado, o efeito calculado das fibras, com um valor de 8,22, apresenta uma magnitude significativamente menor, o que indica uma influência pouco relevante sobre a densidade aparente. Essa diferença evidencia que a variação no teor de fibras não exerce um impacto significativo nos resultados analisados, ao menos nos teores testados neste estudo.

Os valores médios de densidade aparente, apresentados na Figura 13, mostram claramente que o corpo de prova de referência apresenta uma densidade aparente superior às demais. Isso a priori já era esperado, considerando que a ausência de pó de alumínio na formulação elimina a formação de poros que contribuem para a redução da densidade.

Figura 13 - Densidade aparente dos geopolímeros aos 28 dias de cura



$$DA \text{ (Kg/m}^3\text{)} = 1556,70 - 7950,25 \text{ AL} + 14225,98 \text{ AL}^2 - 101,80 \text{ FB} + 63,96 \text{ FB}^2 + 263,20 \text{ ALFB}$$

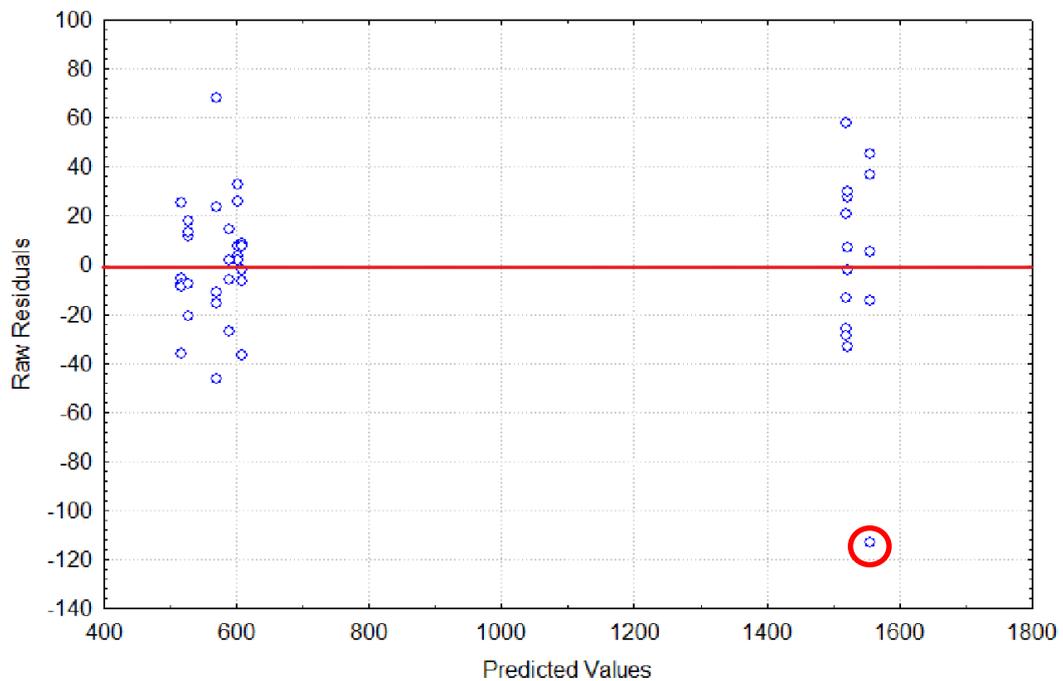
$$R^2 = 0,996 \text{ e } R^2_{\text{ajustado}} = 0,995$$

Fonte: Autor (2024).

Observa-se que na Figura 13, enquanto o efeito das fibras se mantém praticamente constante, o comportamento do pó de alumínio segue uma tendência quadrática. Esse padrão indica que sua influência não é linear, mas aumenta de forma mais acentuada conforme aumenta a dosagem.

A Figura 14 apresenta variação residual para os resultados obtidos para densidade aparente dos geopolímeros aos 28 dias de cura. Observa-se uma distribuição razoável, que na prática, é uma importante informação para a validação do modelo, atendendo aos critérios necessários para uma análise estatística consistente e confiável.

Figura 14 – Variação residual dos resultados de densidade aparente



Fonte: Autor (2024).

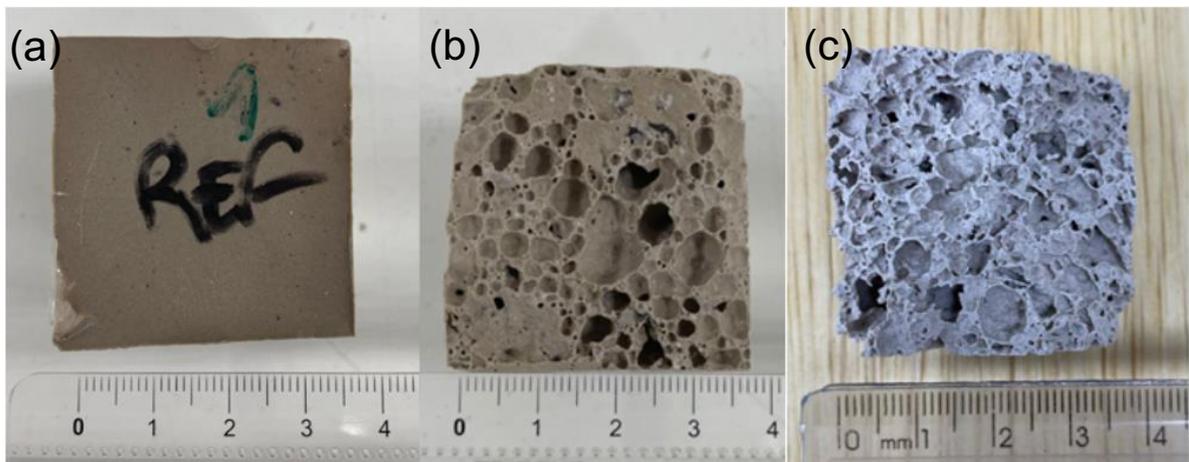
As amostras 0,175 PA + 0,0 FB e 0,35 PA + 0,0 FB apresentaram densidades aparentes de 615,58 kg/m³ e 510 kg/m³, respectivamente, o que corresponde a uma redução significativa de 60,25% e 67,05% em comparação com a amostra de referência 0,0 PA + 0,0 FB. Essa redução é atribuída à formação de uma matriz porosa nos corpos de prova, gerada pela adição do agente porogênico.

Esses resultados são consistentes com dados da literatura, como os obtidos por Hartmann (2016) e Júnior (2022). Hartmann (2016) desenvolveu argamassas geopoliméricas com adição de 0,3%, em massa, de pó de alumínio, obtendo uma

densidade aparente de 1317 kg/m^3 aos 28 dias, valor influenciado pela presença de areia na composição, que aumenta a densidade devido ao peso do agregado. Já Júnior (2022) alcançou densidades aparentes de 830 kg/m^3 e 780 kg/m^3 em geopolímeros contendo 0,15% e 0,30% de pó de alumínio, respectivamente, evidenciando a significativa redução de densidade com o aumento da porosidade.

De forma semelhante, a Figura 15 destaca o impacto da adição de pó de alumínio na estrutura interna das amostras deste estudo, reforçando a relação entre o teor do agente porogênico e a densidade aparente.

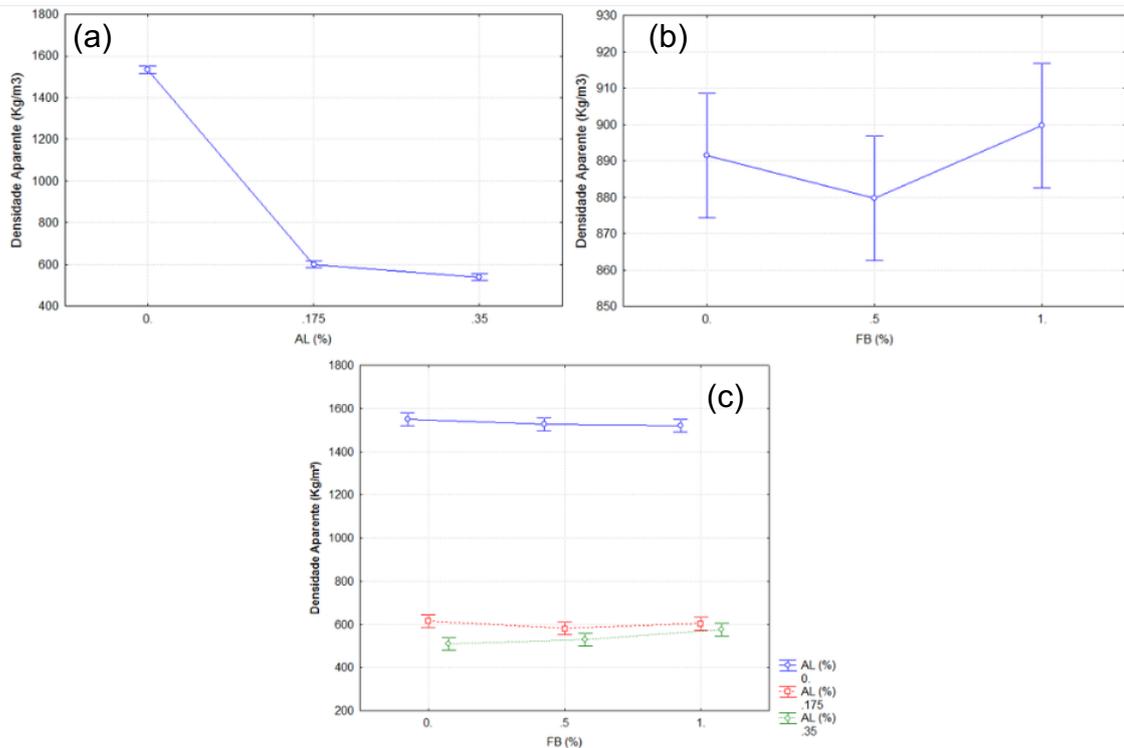
Figura 15 - Estrutura dos corpos de prova geopoliméricos: (a) 0,0 PA + 0,0 FB; (b) 0,175 PA + 0,0 FB; (c) 0,35 PA + 0,0 FB



Fonte: Autor (2024).

Nos gráficos apresentados a seguir, Figura 16 (a, b) ilustra os efeitos isolados, enquanto a Figura 16 (c) apresenta o efeito combinado.

Figura 16 - (a) Densidade aparente x pó de alumínio (b) Densidade aparente x fibras de sisal (c) Densidade aparente x fibras e pó de alumínio.



Fonte: Autor (2024).

A análise dos intervalos de confiança das médias para os diferentes níveis de teor de alumínio (0, 0,175 e 0,35) revela que não há sobreposição entre eles. Isso indica que as três médias são estatisticamente distintas. Tal resultado reforça a importância de um controle rigoroso na dosagem desse componente durante o processo de mistura.

Ao observar o comportamento das médias, nota-se que o intervalo de 0 a 0,175 de AL exerce o maior impacto sobre a densidade, fato evidenciado pela inclinação acentuada da reta nesse trecho do gráfico. Pequenas variações no teor de alumínio dentro dessa faixa geram alterações consideráveis na densidade. Por outro lado, no intervalo entre 0,175 e 0,35 de AL, a inclinação se torna menos pronunciada, sugerindo uma menor sensibilidade da densidade a mudanças no teor de alumínio nessa região.

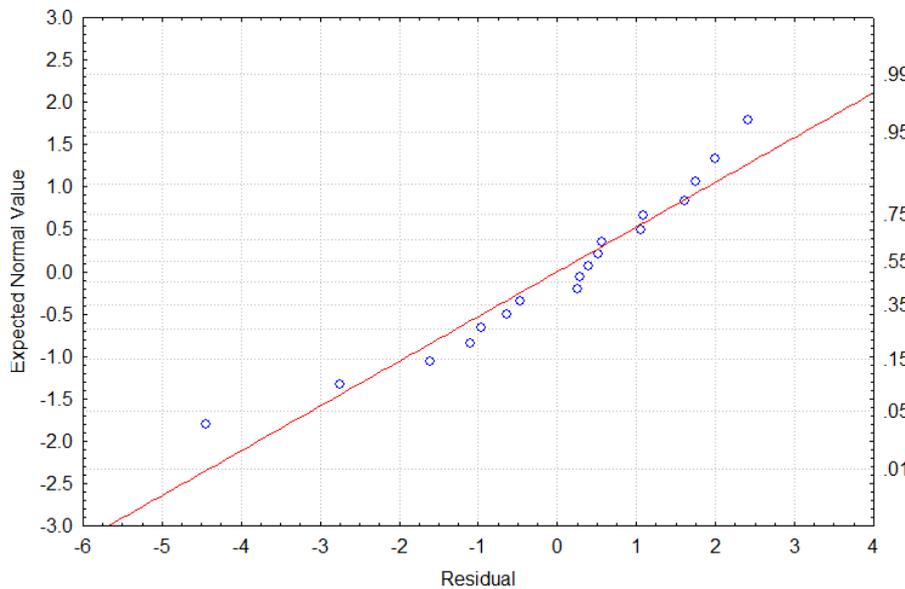
Por outro lado, a análise do fator fibras (FB) apresenta um comportamento distinto. A partir dos gráficos e da análise estatística da ANOVA, observa-se que os

intervalos de confiança das médias se sobrepõem completamente, indicando a ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos avaliados.

4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA (ABS)

Quanto à absorção de água, os dados revelaram uma distribuição semelhante à normalidade comparativamente à densidade aparente, mas ainda suficientemente consistente para análise conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Tendência à normalidade dos resultados de absorção de água



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 10 da ANOVA indicou que o pó de alumínio exerce um impacto estatisticamente significativo ($p < 0,05$) sobre a absorção de água, enquanto as fibras novamente não apresentaram influência relevante ($p > 0,05$). A SS do pó de alumínio evidenciou sua contribuição predominante na variância total.

Tabela 10 - Análise de variância para a absorção de água

	SS	GL	MS	F	p
(1)AL (%) L+Q	2375,52	2	1187,76	340,08	0,000000
(2)FB (%) L+Q	12,06	2	6,03	1,73	0,231953
1*2	1,02	1	1,02	0,29	0,602706
Lack of Fit	19,80	3	6,60	1,89	0,201849
Pure Error	31,43	9	3,49		
Total SS	2439,83	17			

Fonte: Autor (2024).

Os efeitos calculados (Tabela 11) mostram que o aumento no teor de pó de alumínio resulta em maior absorção de água, com um coeficiente de regressão de 28,10, evidenciando sua relevante função como agente porogênico. Pelo contrário, as fibras apresentaram um coeficiente de regressão de apenas 2,00, indicando uma contribuição mínima. Esse resultado ressalta a importância de controlar rigorosamente a dosagem de pó de alumínio em formulações onde a absorção de água é um parâmetro crítico.

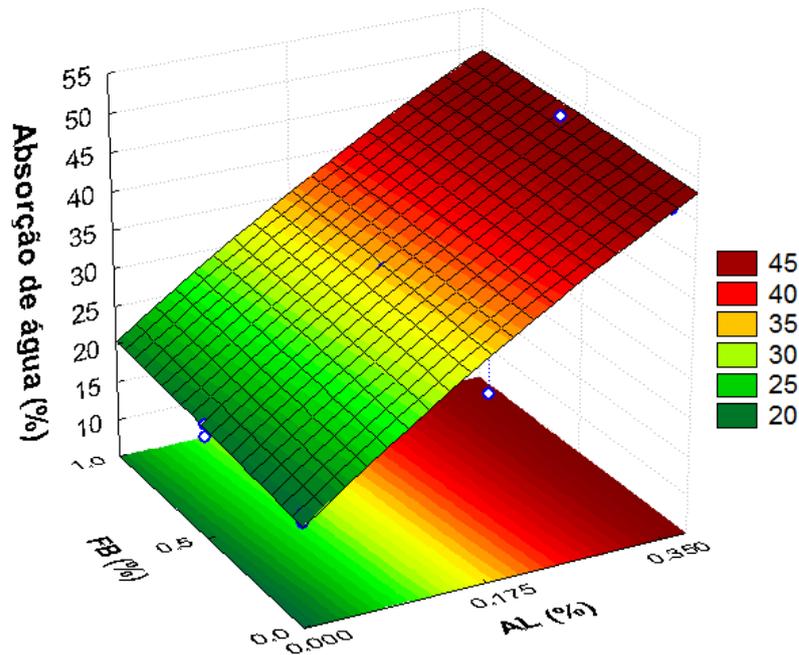
Tabela 11 - Efeito dos fatores na absorção de água

Efeito	
Mean/Interc.	33,59
(1)AL (%) (L)	28,10
AL (%) (Q)	1,30
(2)Fb (%) (L)	2,00
Fb (%) (Q)	0,10
1L by 2L	-0,71

Fonte: Autor (2024).

Os resultados das médias das porcentagens de absorção de água estão apresentados na Figura 18. Conforme previsto, os corpos de prova sem a adição do agente formador de poros apresentaram menores porcentagens de absorção em comparação aos geopolímeros porosos.

Figura 18 - Absorção de água dos geopolímeros aos 28 dias de cura



$$\text{ABS (\%)} = 17,7154 + 97,2176\text{AL} - 42,5633\text{AL}^2 + 3,1334\text{FB} - 0,4194\text{FB}^2 - 4,0731\text{AL}*\text{FB}$$

$$R^2 = 0,98 \text{ e } R^2_{\text{ajustado}} = 0,97$$

Fonte: Autor (2024).

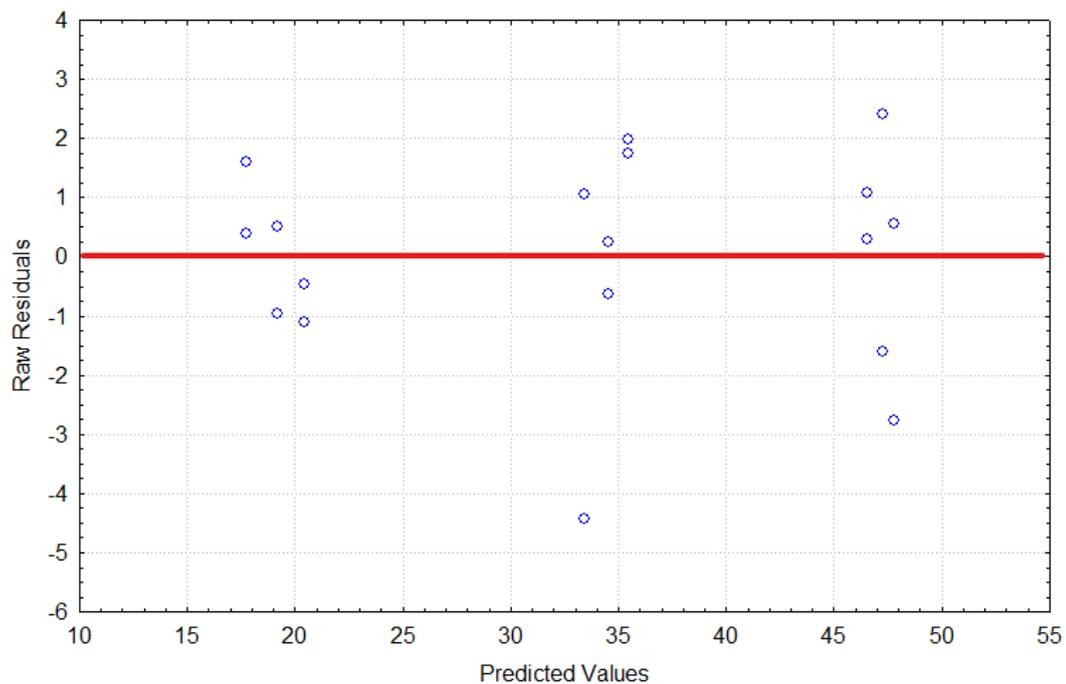
Os valores de absorção de água obtidos foram de 31,74% e 47,22% para as amostras 0,175 PA + 0,0 FB e 0,35 PA + 0,0 FB, respectivamente. Esses resultados evidenciam o impacto do aumento do teor de pó de alumínio na porosidade do material, demonstrando uma relação direta entre a quantidade de agente porogênico e a absorção de água. Comparando com a literatura, Júnior (2022) reportou absorções de água de 34,30% e 37,35% em geopolímeros contendo 0,15% e 0,30% de pó de alumínio, valores próximos aos encontrados neste estudo. Por outro lado, Klettenberg (2018), ao investigar argamassas geopoliméricas com adições de 0,75g de pó de alumínio, encontrou absorções de 27,96%.

Ao analisar a influência do pó de alumínio nas propriedades dos materiais, verifica-se que a densidade aparente apresenta um comportamento quadrático, com reduções mais acentuadas em maiores dosagens, enquanto a absorção de água segue um padrão contínuo e linear. Isso reforça a importância de um controle preciso no teor de pó de alumínio para atingir o equilíbrio entre densidade e porosidade, otimizando as propriedades do material conforme as propriedades desejadas nos materiais desenvolvidos.

Adicionalmente, os coeficientes de regressão obtidos para as variáveis analisadas destacam a influência predominante do pó de alumínio em comparação às fibras. O coeficiente associado ao teor de pó de alumínio é significativamente mais elevado, indicando que sua variação tem um impacto muito mais expressivo na absorção de água. Contudo, como a variação da superfície de resposta para a absorção de água é menos acentuada do que a observada para a densidade, os coeficientes de regressão apresentam valores menores, refletindo a menor sensibilidade dessa propriedade às variações no material.

A Figura 19 apresenta a variação residual dos resultados obtidos para a densidade aparente dos geopolímeros. A análise gráfica evidencia a formação de três grupos distintos, com uma transição mais gradual entre eles. Esse comportamento sugere uma relação contínua entre os fatores analisados e absorção de água, reforçando a consistência dos dados e a adequação do modelo estatístico utilizado na ANOVA para descrever essas variações.

Figura 19 - Variação residual dos resultados de absorção de água aos 28 dias de cura

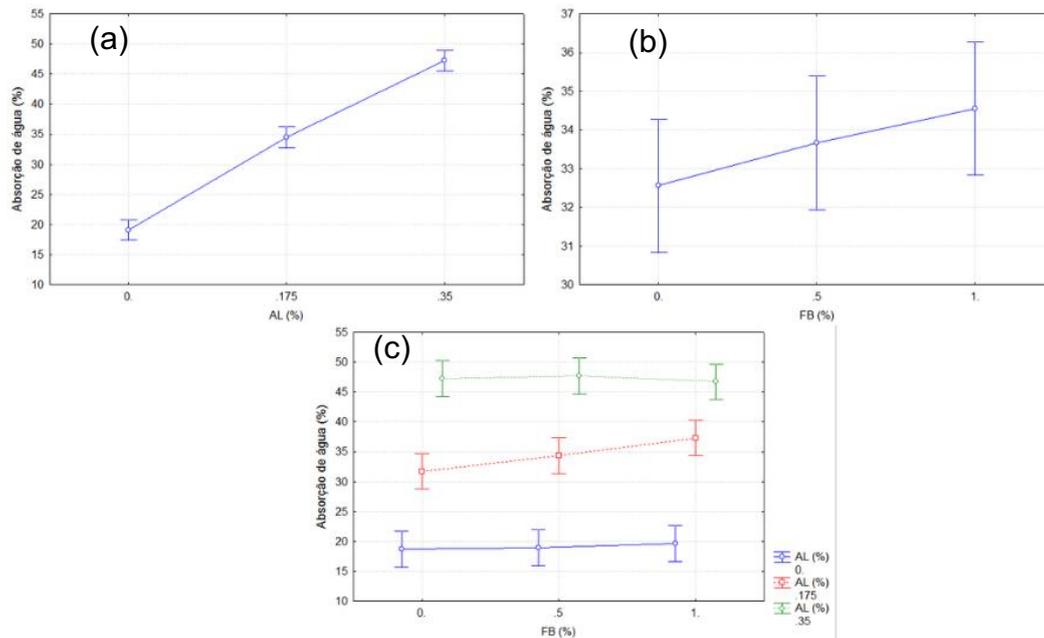


Fonte: Autor (2024).

A Figura 20(a) evidencia que as misturas com maior teor de pó de alumínio apresentam os maiores valores de absorção de água, devido à estrutura mais porosa

dos corpos de prova. As formulações 0,175 PA + 0,0 FB e 0,35 PA + 0,0 FB apresentaram aumentos de 70% e 152%, respectivamente, em comparação à amostra de referência. Por outro lado, a variação no teor de fibras resultou em diferenças mínimas de absorção, com incrementos de apenas 8% a 18%, dependendo da dosagem de PA.

Figura 20 – (a) Absorção de água x pó de alumínio (b) Absorção de água x fibras de sisal (c) Absorção de água x fibras e pó de alumínio.



Fonte: Autor (2024).

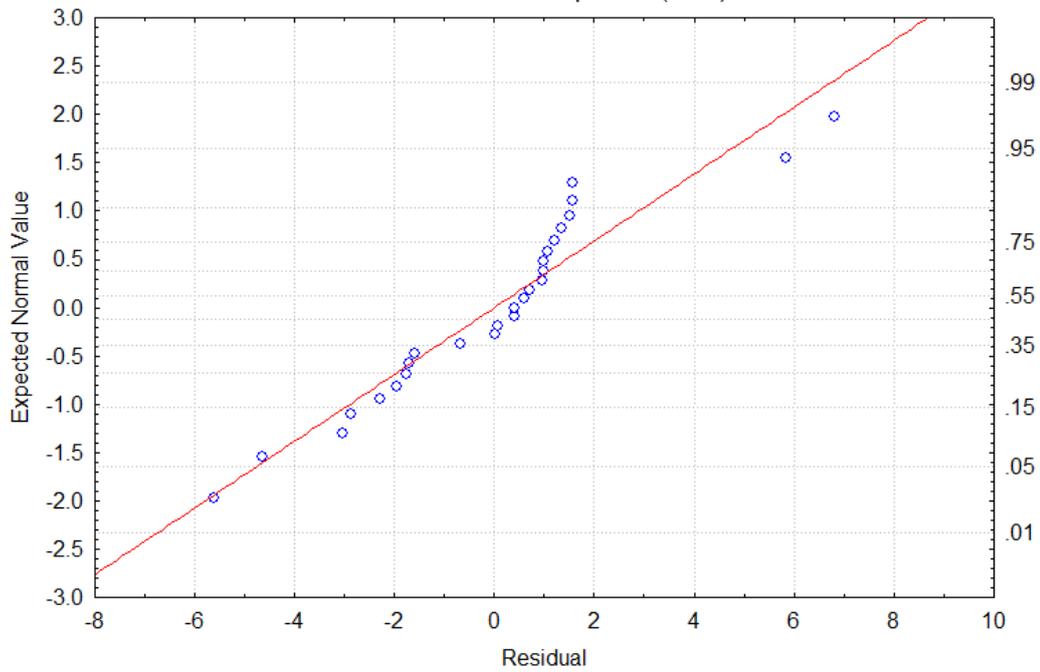
Também foi possível observar que houve sobreposição entre os intervalos de confiança para as médias correspondentes aos diferentes níveis de teor de alumínio nos três intervalos avaliados. Esse resultado destaca a necessidade de um controle criterioso na dosagem desse componente ao longo do processo de mistura, uma vez que variações sutis podem impactar significativamente na absorção de água do material.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (RC)

Para a investigação dos resultados, utilizou-se da mesma forma que as propriedades físicas, o método de análise de variância. A Figura 21 apresenta a

tendência normalidade das resistências à compressão atendendo ao critério para aplicabilidade do método.

Figura 21 - Tendência à normalidade dos resultados de resistência à compressão



Fonte: Autor (2024).

De modo geral, os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão foram os que mais se desviaram da normalidade, embora ainda apresentem uma distribuição suficientemente adequada para análise estatística. Apesar do afastamento parcial, os dados seguem uma tendência linear consistente e mantêm uma distribuição relativamente equilibrada, o que assegura a confiabilidade dos resultados.

Para análise da influência da adição de pó de alumínio e de fibras de sisal nos resultados obtidos, aplicou-se a análise de variância (ANOVA). Os resultados obtidos para a resistência mecânica do material são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 12 - Análise de variância para resistência à compressão

	SS	df	MS	F	p
(1)AL (%) L+Q	5412,57	2	2706,29	357,30	0,000000
(2)FB (%) L+Q	65,25	2	32,62	4,31	0,029610
1*2	85,95	1	85,95	11,35	0,003422
Lack of Fit	48,08	3	16,03	2,12	0,133855
Pure Error	136,34	18	7,57		
Total SS	5748,18	26			

Fonte: Autor (2024).

A ANOVA para os ensaios de compressão mostrou que tanto o pó de alumínio (AL) quanto as fibras (FB) apresentou p-valores inferiores a 0,05, indicando influência estatisticamente significativa sobre a resistência à compressão. No entanto, a análise da Soma de Quadrados (SS) revelou que o AL foi o principal fator, contribuindo com 94,2% da variância total (5412,57). Isso demonstra que o AL tem um impacto expressivo na formação da estrutura porosa, que reduz a resistência do material.

As fibras, com um SS de 65,25 (1,1% da variância), apresentaram influência muito menor, reforçando que seu efeito na compressão é limitado. A interação entre AL e FB também foi estatisticamente significativa, mas contribuiu apenas com 1,5% da variância (85,95).

Com base na Tabela 13, os resultados da análise evidenciam que o fator AL (%) exerce um impacto muito mais significativo. O efeito linear de AL apresenta um valor de -30,38, demonstrando que, para cada incremento nos teores de pó de alumínio, há uma redução substancial na resistência. Este valor elevado, em magnitude absoluta, destaca que o agente formador de poros é o principal responsável pelas alterações na resistência à compressão.

Tabela 13 - Efeito dos fatores na resistência à compressão

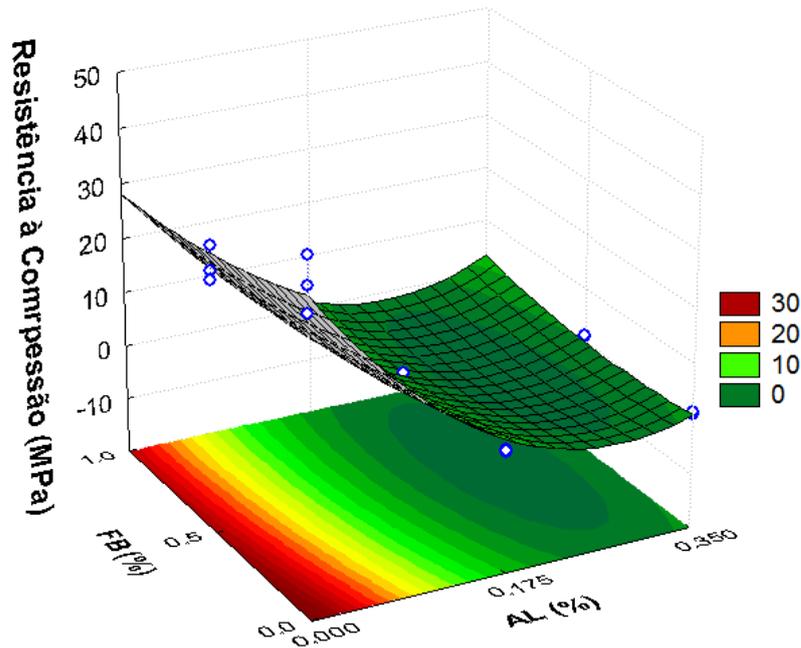
Efeito	
Mean/Interc.	11,65
(1)AL (%) (L)	-30,38
AL (%) (Q)	-14,49
(2)FB (%) (L)	-3,00
FB (%) (Q)	-2,03
1L by 2L	5,35

Fonte: Autor (2024).

Na Figura 22, observa-se que as maiores médias de resistência estão associadas aos corpos de prova sem a adição do agente formador de poros, que apresentaram valores de 38,28 MPa, 28,33 MPa e 28,38 MPa para as composições 0,0 PA + 0,0 FB, 0,0 PA + 0,5 FB e 0,0 PA + 1 FB, respectivamente. Em contrapartida, os geopolímeros leves do presente estudo, com adições de 0,175 PA + 1 FB e 0,35 PA + 1 FB, atingiram valores de resistência à compressão de 2,26 MPa e 1,82 MPa, respectivamente.

Ao comparar com os resultados de Júnior (2022), que utilizou fibras de vidro em geopolímeros com adições de 0,15 PA + 1 FB e 0,30 PA + 1 FB, foram obtidas resistências de 11,30 MPa e 11,53 MPa, respectivamente. A diferença pode ser atribuída à utilização de fibras de vidro, que apresentam alta rigidez e resistência à tração, contribuindo significativamente para o reforço da matriz geopolimérica. Além disso, o tipo de fibra, o comprimento e a dispersão das mesmas afetam diretamente a eficiência do reforço mecânico.

Figura 22 - Resistência à compressão dos geopolímeros aos 28 dias de cura



$$RC \text{ (MPa)} = 36,52 - 267,70AL + 473,17AL^2 - 16,47FB + 8,12FB^2 + 30,59AL*FB$$

$$R^2 = 0,97 \text{ e } R^2_{\text{ajustado}} = 0,96$$

Fonte: Autor (2024).

A superfície de resposta revela a relação entre a resistência à compressão, o teor de pó de alumínio (AL) e o teor de fibras (FB). Observa-se que o aumento do AL resulta em uma redução significativa na resistência, especialmente entre 0% e 0,175%, devido ao aumento da porosidade na matriz do material. A partir de 0,175%, o impacto do AL se estabiliza, indicando uma menor influência adicional sobre a resistência.

O termo linear de $-267,70AL$ indica que o aumento do teor de pó de alumínio causa uma redução inicial significativa na resistência, enquanto o coeficiente positivo de $473,17AL^2$ sugere uma tendência de estabilização ou leve recuperação em teores mais elevados, como observado na superfície. Este padrão é consistente com a formação de uma matriz porosa pelo AL, que inicialmente reduz a resistência, mas atinge um ponto onde os efeitos adicionais são menos intensos.

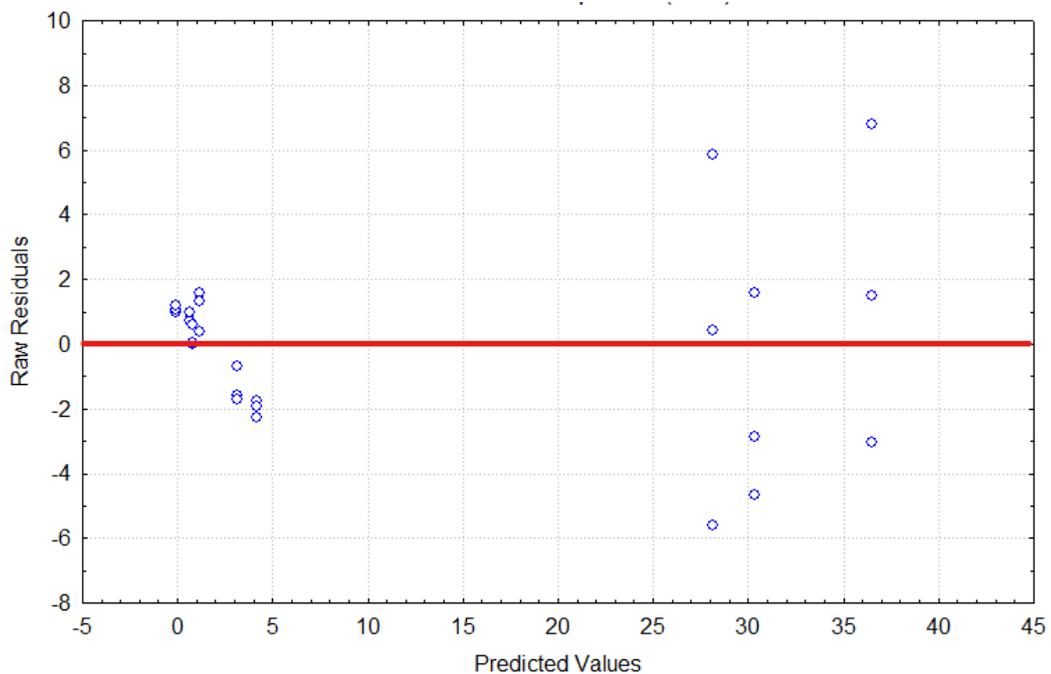
Para as fibras, o termo linear $-16,47FB$ mostra que o aumento da FB inicialmente reduz a resistência, possivelmente devido à dificuldade de homogeneização da matriz. No entanto, o termo quadrático $+8,12FB^2$ indica uma recuperação em níveis mais altos de FB, embora o efeito seja pequeno em magnitude. Isso reflete o impacto limitado das fibras, conforme observado na análise da ANOVA.

O termo de interação $30,59AL \cdot FB$ sugere que a combinação de AL e FB pode trazer benefícios em certas proporções, compensando parcialmente os efeitos negativos isolados. Esse comportamento é visualizado na superfície de resposta, onde a interação gera uma transição mais suave nas regiões intermediárias.

Portanto, a equação evidencia que o AL é o principal fator determinante da resistência à compressão, com efeitos muito mais significativos que os da FB. O controle rigoroso do teor de AL é essencial para evitar reduções excessivas na resistência, enquanto a adição de FB deve ser ajustada cuidadosamente para garantir equilíbrio entre reforço estrutural e distribuição homogênea.

O gráfico da distribuição de resíduos para os resultados de resistência à compressão (Figura 23) indica que o modelo apresenta boa precisão para valores baixos de resistência à compressão, com resíduos próximos a zero, mas há maior dispersão para valores preditos mais altos, sugerindo menor precisão nessa faixa.

Figura 23 - Dispersão dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias de cura



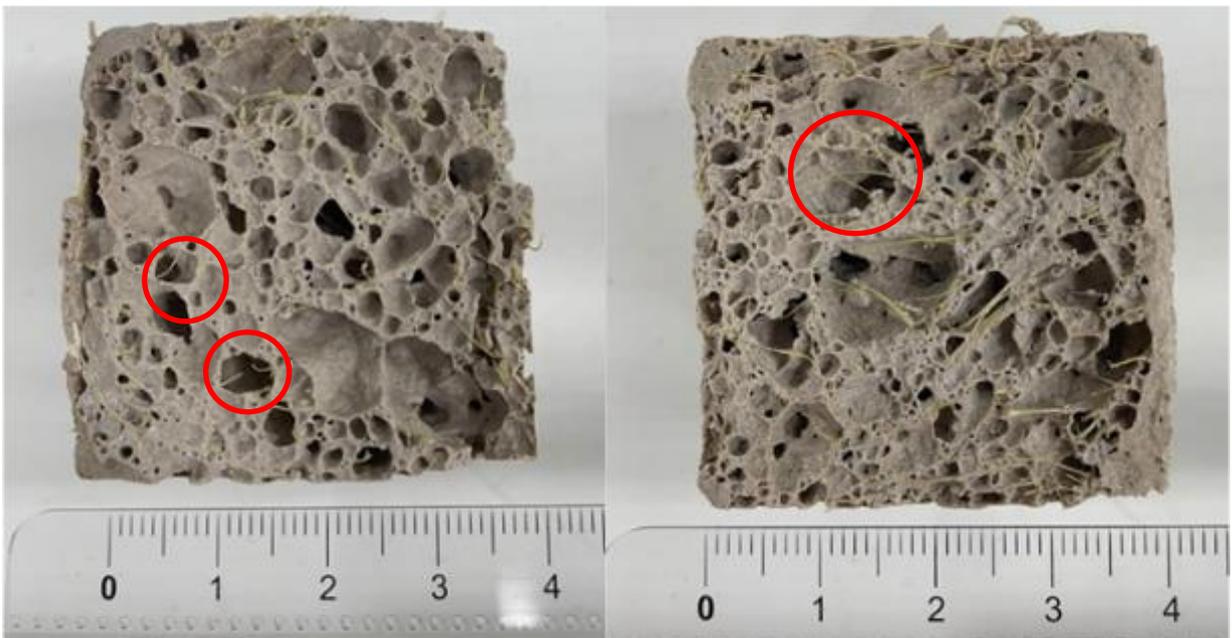
Fonte: Autor (2024).

Verificou-se que os corpos de prova apresentaram uma significativa redução na resistência à compressão quando comparadas as diferentes formulações. Em relação à amostra de referência (0,0 PA + 0,0 FB), as amostras contendo 0,175 PA +

0,0 FB e 0,35 PA + 0,0 FB registraram uma diminuição de 94,34% e 97,34%, respectivamente. Além disso, ao comparar as formulações 0,175 PA + 0,0 FB com 0,35 PA + 0,0 FB, constatou-se uma redução de 53,27% na resistência à compressão. Esses resultados evidenciam o impacto do aumento do teor de pó de alumínio na resistência mecânica dos corpos de prova.

Por outro lado, foi constatado um aumento na resistência à compressão à medida que a quantidade de fibras na mistura foi ampliada. Esse incremento atingiu 4,15% ao comparar as amostras 0,175 PA + 0,0 FB e 0,175 PA + 1,0 FB, e 7,94% ao comparar as formulações 0,35 PA + 0,0 FB e 0,35 PA + 1,0 FB. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de as fibras promoverem um intertravamento entre os poros, contribuindo para uma estrutura mais resistente, como ilustrado na Figura 24.

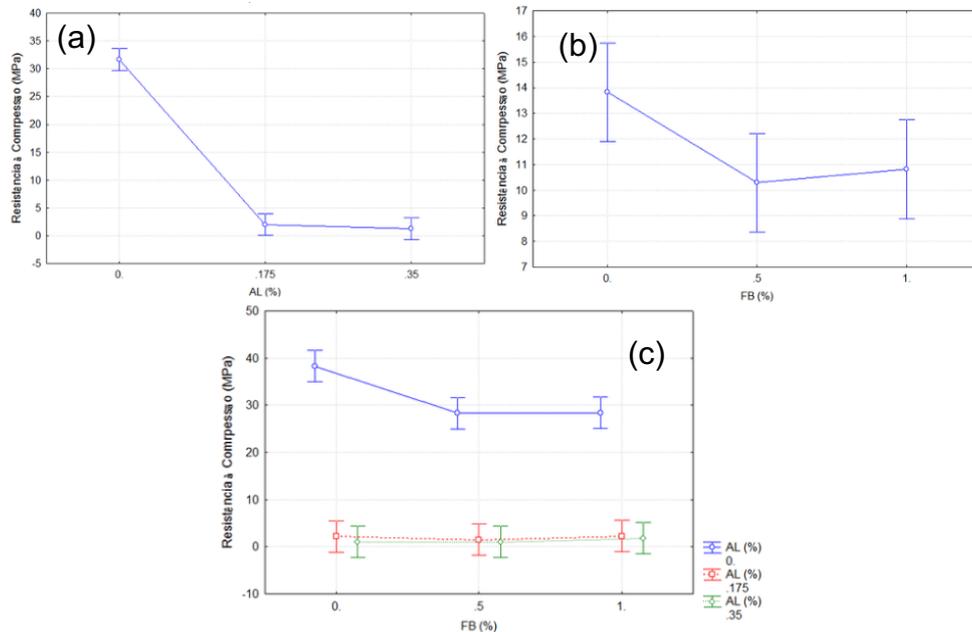
Figura 24 - Estrutura dos corpos de prova geopoliméricos em destaque a presença das fibras



Fonte: Autor (2024).

Com o auxílio da análise de variância (ANOVA), foi possível avaliar o comportamento da resistência à compressão em função do fibras de sisal e da variação dos teores de pó de alumínio. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 25 que detalham as variações na resistência em função desses parâmetros, permitindo uma melhor compreensão do impacto das fibras e do pó de alumínio nas propriedades mecânicas do material.

Figura 25 – (a) Resistência à compressão x pó de alumínio (b) Resistência à compressão x fibras de sisal (c) Resistência à compressão x fibras e pó de alumínio



Fonte: Autor (2024).

No gráfico superior esquerdo (Figura 25a), observa-se que a resistência à compressão diminui abruptamente com o aumento do teor de alumínio (AL), especialmente quando a teor AL vai de 0%, com uma queda acentuada à medida que o teor de alumínio aumenta. No gráfico superior direito (Figura 25b), a resistência à compressão varia levemente com o aumento da FB, mas sem grandes alterações.

O gráfico inferior mostra a interação entre AL e FB, revelando que a resistência à compressão (Figura 25c), se mantém quase constante para valores de FB maiores, independentemente do teor de alumínio. A presença dos intervalos de confiança indica que a variabilidade dos resultados é relativamente baixa dentro dos valores experimentais, especialmente para os valores mais baixos de AL. Essas tendências sugerem que o teor de alumínio tem um impacto mais significativo na resistência à compressão do que o fator FB.

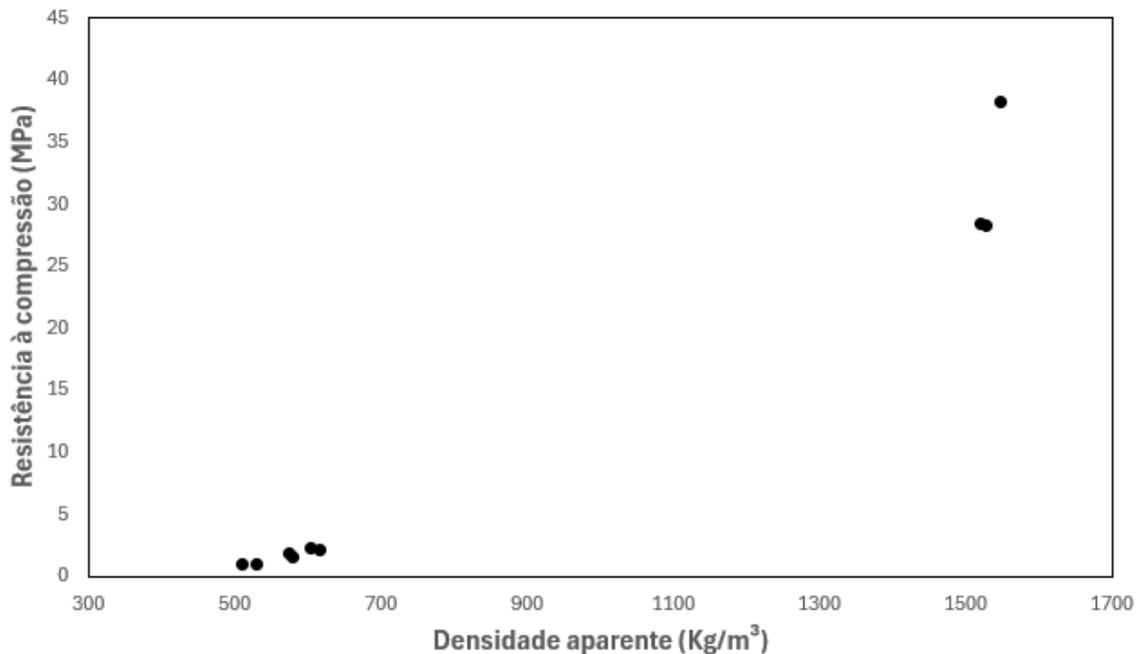
4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA VERSUS PROPRIEDADES FÍSICAS

Neste capítulo, será apresentada a correlação entre as propriedades físicas e a resistência mecânica dos geopolímeros.

4.4.1 Densidade Aparente x Resistência à compressão

A relação entre resistência à compressão e densidade aparente, apresentada na Figura 26, indica uma tendência clara: à medida que a densidade aumenta a resistência à compressão também cresce. Contudo, não foi desenvolvido um modelo matemático para descrever essa correlação, devido à ampla variação observada entre os limites inferiores e superiores de ambas as propriedades, o que comprometeria a precisão e a representatividade de um modelo ajustado.

Figura 26 - Resistência à compressão x densidade aparente



Fonte: Autor (2024).

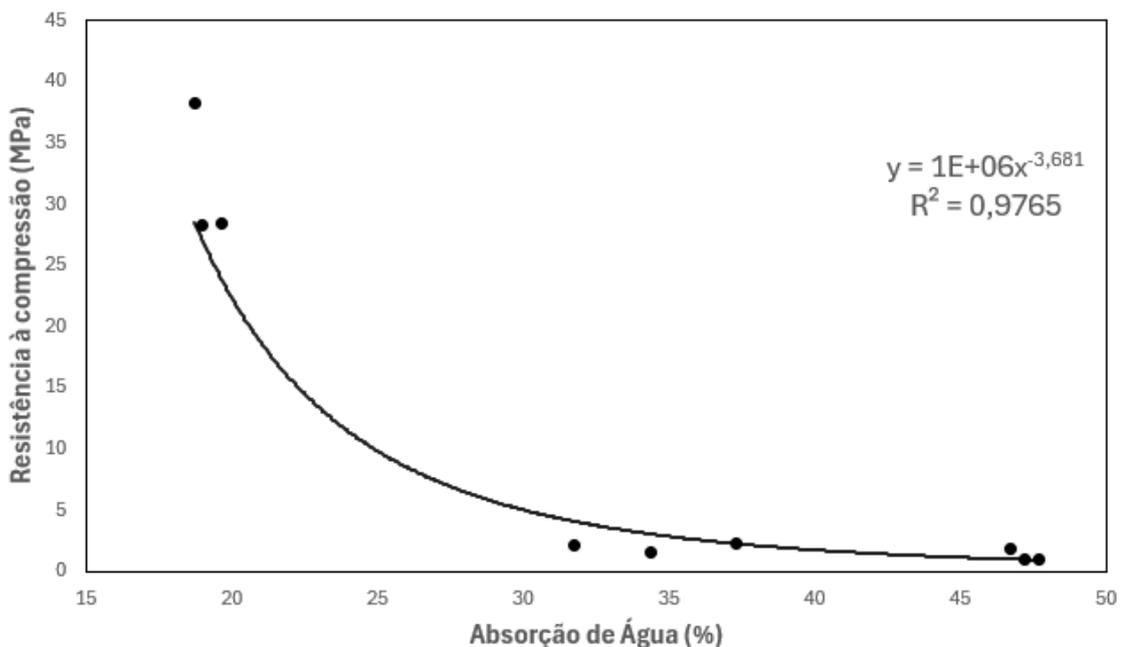
4.4.2 Absorção de água x Resistência à compressão

A Figura 27 evidencia uma relação direta entre resistência à compressão e absorção de água, em que o aumento da absorção resulta em menores valores de

resistência, isso porque a alta porosidade permite maior absorção e também enfraquece a estrutura do material.

A linha de tendência do gráfico é representada por uma função potencial com coeficiente de determinação $R^2=0,9765$, indicando um forte ajuste entre os dados. Dessa forma, a resistência a compressão apresentou maiores valores com menores valores de absorção de água, enquanto grandes valores de absorção tentem a atingir uma consistência na resistência à compressão.

Figura 27 - Resistência à compressão x absorção de água



Fonte: Autor (2024).

4.5 OTIMIZAÇÃO DE MULTIPLAS VARIÁVEIS

Os gráficos de perfis de predição e desejabilidade, comumente utilizados em análises de otimização de variáveis em experimentos, mostram no nosso caso, o impacto de duas variáveis independentes, AL (%) e FB (%). As respostas para o presente trabalho foram: Resistência à Compressão (MPa), Densidade Aparente (kg/m^3) e Absorção de Água (%). Além de apresentar a Desejabilidade como um índice consolidado que varia entre 0 e 1.

A Tabela 14 define os intervalos inferiores, médios e superiores definidos para os três parâmetros analisados: resistência à compressão, densidade aparente e absorção de água. Esses intervalos foram estabelecidos com base em critérios

técnicos e requisitos funcionais para blocos de vedação interna, de forma a atender às necessidades específicas dessa aplicação. Os valores entre parênteses representam os valores de desejabilidade.

Tabela 14 - Parâmetros utilizados na otimização simultânea das respostas das amostras de geopolímeros reforçados com fibras.

Respostas	Limite Inferior	Média	Limite Superior	s,t
Densidade Aparente (Kg/m³)	510 (1)	700 (1)	900 (0)	1,1
Absorção de água (%)	19 (1)	25 (1)	48 (0)	
Resistência à compressão (MPa)	1 (0)	4,5 (1)	7 (0)	

Fonte: Autor (2024).

Em relação à resistência à compressão, foi definido um valor de 4,5 MPa, considerado ideal para a aplicação proposta. Dessa forma, os intervalos inferior e superior foram definidos de forma a permitir variações para mais ou para menos, embora valores muito distantes de 4,5 MPa, tanto para cima quanto para baixo, estão fora do interesse dessa pesquisa.

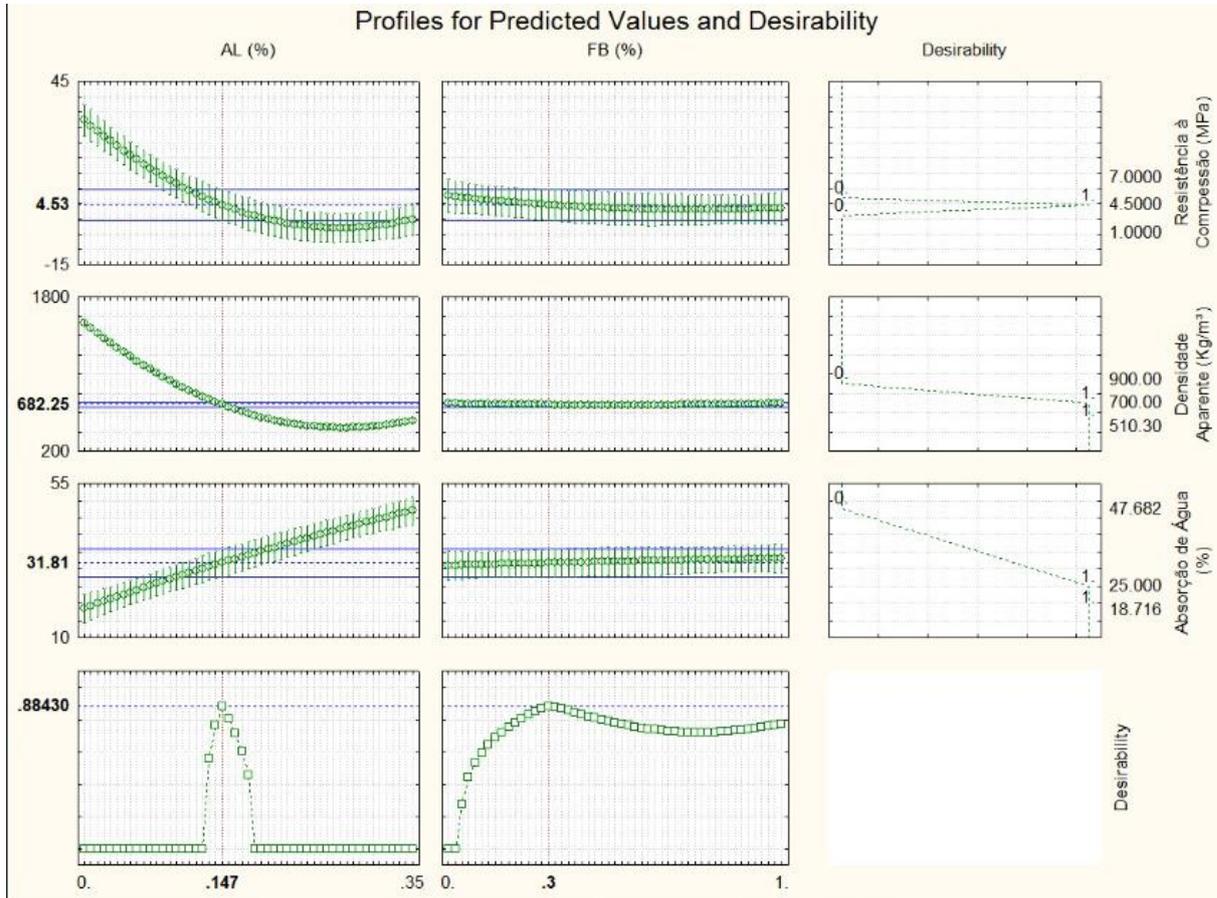
Quanto à densidade aparente, o intervalo desejável foi determinado com base em uma referência de 700 kg/m³. Valores inferiores a 700 Kg/m³ são interessantes, pois indicam materiais mais leves, mas resultados acima desse valor até 900 Kg/m³ já não são vantajosos, pois isso poderia comprometer a leveza do material, que é o diferencial em relação aos materiais mais comuns encontrados no mercado.

Para a absorção de água, estabeleceu-se um intervalo ideal de 25%. No entanto, resultados abaixo de 25%, até o valor de 18,71%, são aceitáveis, pois indicam menor porosidade e, portanto, uma melhor resistência à umidade. Dessa forma, níveis de absorção próximos ao limite ideal de 25% são vistos como os mais apropriados para assegurar a funcionalidade do material, especialmente porque ele não estará em contato direto com a água.

A análise estatística (Figura 28) permitiu avaliar as variações dentro dos intervalos definidos e determinar a significância das diferenças entre os parâmetros. A ANOVA demonstrou que as variações nos dados de resistência à compressão, densidade aparente e absorção de água são estatisticamente significativas, e que os

valores dentro dos intervalos estabelecidos resultam em propriedades otimizadas para a aplicação em blocos de vedação interna.

Figura 28 - Perfis de predição e desejabilidade do sistema



Fonte: Autor (2024).

A resistência à compressão diminui de forma expressiva à medida que os níveis de AL aumentam, enquanto FB apresenta impacto mínimo nessa variável. Esse padrão indica uma redução na desejabilidade em valores elevados de AL, considerando que o objetivo principal é maximizar a resistência. De maneira similar, a densidade aparente também sofre uma queda significativa com o aumento de AL, mas, assim como ocorre com a resistência, é pouco influenciada pelas variações de FB.

Em contraste, a Absorção de Água aumenta progressivamente com o acréscimo de AL, evidenciando uma maior capacidade de absorção em níveis mais altos dessa variável. Novamente, as fibras têm um efeito limitado sobre essa resposta.

Esses resultados destacam a importância de um controle rigoroso sobre o uso do pó de alumínio para otimizar tanto a resistência quanto a densidade, ao mesmo tempo em que se busca reduzir a absorção.

Por fim, o gráfico de otimização de múltiplas variáveis faz uma interatividade entre as 3 variáveis. O valor sugerido para AL está em torno de 0,147%, enquanto o ponto ótimo para as fibras é próximo de 0,3%, indicando que essa combinação maximiza a desejabilidade global do sistema. Esses resultados são especialmente relevantes no contexto de superfícies de resposta (RSM), oferecendo suporte para a definição dos níveis ideais das variáveis que atendam aos objetivos experimentais.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste estudo evidenciam a relevância dos fatores analisados, como o pó de alumínio (PA) e as fibras de sisal (FB), sobre as propriedades físicas e mecânica dos geopolímeros. Através da aplicação da análise de variância (ANOVA), observou-se que o pó de alumínio tem um impacto significativo tanto na densidade aparente quanto na absorção de água, com um efeito mais pronunciado em dosagens mais elevadas.

O aumento da quantidade de PA resulta em uma maior formação de vazios na estrutura do material, o que, por sua vez, compromete sua resistência à compressão. A absorção de água foi maior nas amostras com maior teor de PA, atingindo valores médios de 47,68% para os corpos de prova 0,35PA + 0,5FB, confirmando o comportamento esperado de maior porosidade associada a esse componente.

A resistência mecânica apresentou uma relação inversa com a porosidade, sendo que as amostras mais densas apresentaram maior resistência. A análise dos coeficientes de regressão e da interação entre PA e FB reforça a necessidade de um controle rigoroso da dosagem desses componentes, visto que pequenas variações no teor de PA podem resultar em alterações expressivas nas propriedades mecânicas do material. Embora as fibras tenham mostrado uma influência limitada sobre a densidade e a resistência, seu efeito positivo na estrutura porosa foi observado quando utilizadas em maior quantidade, contribuindo para a resistência à compressão em algumas formulações.

Esses resultados reforçam a necessidade de controlar cuidadosamente os níveis de PA e FB para equilibrar resistência, densidade e porosidade, garantindo a qualidade e durabilidade dos geopolímeros em aplicações práticas. A aplicação da metodologia de superfícies de resposta (RSM) mostrou-se uma ferramenta fundamental para definir os níveis ideais das variáveis e atender aos objetivos experimentais.

A análise da desejabilidade revelou que níveis mais baixos de AL, próximos a 0,147%, são os mais indicados para maximizar a resistência e minimizar a porosidade, enquanto o teor de FB ideal foi estimado em torno de 0,3%, resultando na melhor

combinação de propriedades desejadas. Esse equilíbrio entre as variáveis é essencial para otimizar a formulação dos geopolímeros, garantindo seu máximo desempenho.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar o impacto do aumento na proporção no teor de fibra;
- Testar fibras com diferentes comprimentos e diâmetros para identificar o tamanho mais eficiente em termos de reforço e distribuição na matriz geopolimérica;
- Realizar ensaios de longo prazo (superiores a 28 dias) para verificar a estabilidade e a resistência das fibras em geopolímeros.

REFERÊNCIAS

- ALEEM, M.I.; ARUMAIRAJ, P.D. **Geopolymer concrete – A review**. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. v. 1, n. 2, p. 118-122, 2012. Disponível em: <https://www.ijeset.com/media/14N2-GEOPOLYMER-CONCRETE-A-REVIEW.pdf>. Acesso em: 28 outubro 2024.
- ALVES, S. C. L. **GEOPOLÍMERO À BASE DE METACALUM COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE SISAL**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia,2018.
- ALZEER, M.; MACKENZIE, K. Synthesis and mechanical properties of novel composite of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax). **Applied Clay Science**, issue 75–76, p. 148–152, may 2013 2013.
- AQUINO, R.C.M.P.;MONTEIRO, S.N.; D^oALMEIDA, J.R.M. Evaluation of the Critical Fiber Length of Piassava (*Attalea funifera*) Fibers using the Pullout Test. 2003. **Journal of Materials Science Letters**, v. 22, n. 21, p. 1495-1497, nov. 2003
- ASSAEDI, H.; *et al.* Characterisation of mechanical and thermal properties in flax fabric reinforced geopolymer composites. **Journal of Advanced Ceramics**, v. 4, n. 4, p. 1-10, sep. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11222**. Materiais refratários densos não-conformados - Determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT 2010.
- CORREIA, S. A. E. **Compósitos de Matriz Geopolimérica Reforçados com Fibras Vegetais de Abacaxi e de Sisal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa,2011.
- DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry and Applications. **Geopolymer Institute**.5 ed., 1991.
- DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**. v. 37, p. 1633-1656, 1991.
- DAVIDOVITS, J. **PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS**. Geopolymer institute. Alkline Cements and Concretes, KIEV Ukraine, 1994, p, 2
- DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement, a review**, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2013. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/library/technical-papers/21-geopolymer-cement-review-2013/>. Acesso em: 14 outubro 2024.

FERNÁNDEZ - JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; REVUELTA, D. **ALKALI ACTIVATION OF INDUSTRIAL BY-PRODUCTS TO DEVELOP NEW EARTH-FRIENDLY CEMENTS**. 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009). Bath, Reino Unido: 2009.

GLUKHOVSKY, V. D. **Soil Silicate Articles and Structures**, Ucrânia, p. 156, 1967.
 ILIĆ, B. R.; MITROVIĆ, A. A.; MILIČIĆ, L. R. **Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin**. Institute for Testing of Materials, Belgrade, Sérvia, 2010.
 Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/275922964_Thermal_treatment_of_kaolin_clay_to_obtain_metakaolin. Acesso em: 28 outubro 2024.

HARTMANN, A, E. **ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA UTILIZANDO PÓ DE ALUMÍNIO COMO AGENTE FORMADOR DE POROS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

ILIĆ, B, R.; MITROVIĆ, A, A.; MILIČIĆ, L, R. **Thermal Treatment of Kaolin Clay to Obtain Metakaolin**. Institute for Testing of Materials, Belgrado, Sérvia, 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers**. Disponível em:
https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf.
 Acesso em: 7 setembro 2024.

JUNIOR, V, S. **DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS LEVES REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville. 2022.

KLETTENBERG, E, V. **AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE PÓ DE ALUMÍNIO COMO AGENTE GERADOR DE POROS EM UMA ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville. 2018.

KOMMITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: **A Review and Prospects for the Minerals Industry**. Minerals Engineering. p. 20. 2007.

LEITE, M, J. **A INFLUÊNCIA DA VERMICULITA EM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA COM ADIÇÃO DE NANOTITÂNIA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

MACCARINI, H, S. **DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMERO A PARTIR DO USO DE METACAULIM**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

MOE, T.; KIN, L. **Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo–glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites**. 2002.

MONTE, M. B. M; PAIVA, P. R. P; TRIGUEIRO, F. E. **Técnicas Alternativa para Modificação do Caulim**. Rio de Janeiro: Cento de Tecnologia Mineral (CETEM), Série Rochas e Minerais Industriais, Vol 8, 50 p., 2003.

NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos**. 2006. 149f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/pg1/MonografiaMateriais_Pozolanicos.pdf. Acesso em: 28 outubro 2016.

NGOULOURE Z.N.M. *et al.*, **Recycled natural wastes in metakaolin based porous geopolymers for insulating applications**, Journal of Building Engineering, 3, 58–69, 1 July 2015. Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 28 outubro de 2024.

NOVAIS, R.M, L.H. BURUBERRI, G. ASCENSÃO, M.P. SEABRA, J.A. LABRINCHA, **Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity**, J. Clean, 2016a

NOVAIS, R.M; ASCENSÃO, G; SEABRA, M.P; LABRINCHA J.A. **Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers**. Department of Materials and Ceramic Engineering/CICECO – Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, Aveiro, Portugal, 2016b.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H. **Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete**. Conference on Constitution and Building Technol International. p.15. 2014.

RANGAN, B.V. **Geopolymer concrete for environmental protection**. The Indian Concrete Journal. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/286116300_Geopolymer_concrete_for_environmental_protection. Acesso em: 28 outubro 2024.

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.

ROY, D.M. **Cement and Concrete Research**. v. 29, n.2, p. 249-254, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884698000933?via%3Dihub>. Acesso em: 28 outubro 2016.

Shi, C. **Classification and characteristics of alkali-activated cements**. Jinan, China, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/263266897>. Acesso em: 28 outubro 2024.

SILVA, F.A.; MOBASHER, B.; TOLEDO FILHO, R.D. **Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites**.2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>. Acesso em: 28 outubro 2024.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2022**. 2022. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2022.pdf. Acesso em: 22 junho 2024.

SKAF, T. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2008

SOTELO-PINÃ, C.; AGUILERA - GONZÁLEZ, N, E; MARTÍNEZ – LUÉVANOS, A. **Geopolymers: Past, Present, and Future of Low Carbon Footprint Eco-Materials**, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332548849_Geopolymers_Past_present_and_future_of_low_carbon_footprint_eco-materials. Acesso em: 14 outubro 2024.

TOLEDO FILHO, R.D.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G.L.; GHAVAMI, K. **Durability of alkali sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites**. 2000. TORRALBA, F.P. **Betões Geopoliméricos: Um material com elevadas potencialidades para o reaproveitamento de agregados reciclados**.2012. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/19847>. Acesso em: 7 setembro 2024.