

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ARTHUR DE SOUSA LIMA VASCONCELOS

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS
GEOPOLIMÉRICAS COM A INCORPORAÇÃO DE PÓ DE
VIDRO E FIBRA METÁLICA**

SÃO CARLOS

2025

ARTHUR DE SOUSA LIMA VASCONCELOS

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS
GEOPOLIMÉRICAS COM A INCORPORAÇÃO DE PÓ DE
VIDRO E FIBRA METÁLICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva
Ferreira

Área de concentração: Construção Civil

SÃO CARLOS

2025

RESUMO

A crescente necessidade de alternativas ao cimento Portland impulsiona o desenvolvimento de compósitos sustentáveis. Este estudo avaliou argamassas geopoliméricas à base de metacaulim, incorporando resíduo de pó de vidro, adição de alumina e reforço com fibras metálicas retas, visando investigar a viabilidade técnica e o aproveitamento de resíduos sólidos. Foram desenvolvidas formulações com substituição parcial de 20% do metacaulim por pó de vidro e adição de alumina, e teores de fibras metálicas de 1,0%, 1,5% e 2,0% em volume. O programa experimental contemplou ensaios de índice de consistência no estado fresco e, no estado endurecido, resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico, densidade de massa e resistência à tração por duplo puncionamento. Caracterizações microestruturais foram realizadas por DRX, FTIR e MEV. Os resultados demonstraram que a adição de 2,0% de fibras metálicas promoveu incremento significativo na resistência à tração na flexão em 176,69% (15,43 MPa) e na resistência à compressão axial em 46,82% (66,21 MPa). Entretanto, a formulação com 1,5% de fibras exibiu o melhor desempenho global em propriedades mecânicas, além de proporcionar aumento da tenacidade e melhoria do comportamento pós-fissuração, reduzindo a fragilidade inicial das argamassas, sem comprometer o índice de consistência no estado fresco em relação à referência. A caracterização microestrutural evidenciou a consolidação de géis de aluminossilicato de sódio hidratado (N-A-S-H) com estrutura bem definida na composição de referência. A incorporação parcial de pó de vidro e alumina resultou no incremento da fase amorfa, conforme demonstrado pela análise de Rietveld, indicando alterações na estrutura da matriz geopolimérica, o que se refletiu na redução das propriedades mecânicas. Não obstante, as formulações contendo pó de vidro apresentaram desempenho adequado para aplicações de caráter estrutural, corroborando a viabilidade técnica da valorização de subprodutos industriais em sistemas geopoliméricos como alternativa sustentável para o setor da construção civil.

Palavras-chave: metacaulim; fibras de aço; argamassas geopoliméricas; pó de vidro; alumina.

ABSTRACT

The growing need for alternatives to Portland cement is driving the development of sustainable composites. This study evaluated geopolymer mortars based on metakaolin, incorporating glass powder waste, added alumina and reinforced with straight metal fibers, with the aim of investigating the technical feasibility and use of solid waste. Formulations were developed with a partial substitution of 20% of the metakaolin with glass powder and added alumina, and metal fiber contents of 1.0%, 1.5% and 2.0% by volume. The experimental program included tests of consistency index in the fresh state and in the hardened state, axial compressive strength, flexural tensile strength, diametrical compressive strength, dynamic modulus of elasticity, mass density and double punching tensile strength. Microstructural characterizations were carried out using XRD, FTIR and SEM. The results showed that the addition of 2.0% metal fibers promoted a significant increase in flexural tensile strength of 176.69% (15.43 MPa) and axial compressive strength of 46.82% (66.21 MPa). However, the formulation with 1.5% fibers exhibited the best overall performance in terms of mechanical properties, as well as providing increased toughness and improved post-cracking behavior; reducing the initial fragility of the mortars, without compromising the consistency index in the fresh state in relation to the reference. Microstructural characterization showed the consolidation of hydrated sodium aluminosilicate (N-A-S-H) gels with a well-defined structure in the reference composition. The partial incorporation of glass powder and alumina resulted in an increase in the amorphous phase, as shown by Rietveld analysis, indicating changes in the structure of the geopolymer matrix, which was reflected in a reduction in mechanical properties. Nevertheless, the formulations containing glass powder showed adequate performance for structural applications, corroborating the technical viability of using industrial by-products in geopolymer systems as a sustainable alternative for the construction sector.

Key words: *metakaolin; steel fibers; geopolymer mortars; glass powder; alumina.*



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Arthur de Sousa Lima Vasconcelos, realizada em 09/05/2025.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira (UFSCar)

Profa. Dra. Leila Aparecida de Castro Motta (UFU)

Profa. Dra. Ana Paula da Luz (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Nesta jornada de descobertas e desafios, meu reconhecimento se estende a muitas pessoas e instituições que foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

À minha família, ofereço meu mais profundo agradecimento pelo apoio incondicional que sempre me dedicaram, não apenas durante o mestrado, mas ao longo de toda a minha vida. Aos meus amados pais, por cada sacrifício, por todo o esforço incansável investido em minha educação e por sempre acreditarem em mim. Vocês são a base de tudo. À minha irmã, Andressa, pela sinceridade que me faz crescer e pelo companheirismo.

Aos queridos amigos do GEGEOS, GESEC e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), quero expressar meu sincero agradecimento. Poder contar com o apoio, as trocas de conhecimento, o encorajamento constante e as risadas compartilhadas tornaram cada etapa desta jornada acadêmica mais leve e significativa. Vocês foram fundamentais para manter meu foco, determinação e, sem dúvida, para que esta conquista se tornasse possível.

À minha orientadora, Professora Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira, minha admiração e profundo agradecimento. Sua orientação precisa, serenidade exemplar, os insights valiosos que tantas vezes iluminaram caminhos que passavam despercebidos, e sua imensa paciência foram cruciais para o aperfeiçoamento e a concretização deste trabalho. Agradeço imensamente a oportunidade e a confiança depositada.

Ao dedicado pessoal do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), um agradecimento especial. Ao amigo e técnico José Roberto, pela parceria valiosa, pela ajuda sempre precisa, pela orientação e pelos conselhos que tanto me guiaram durante os ensaios. E como esquecer das agradáveis e revigorantes "resenhas" durante o café do Zé, momentos que aliviaram a tensão. À Lorayne Silva, agradeço imensamente a paciência e o companheirismo incansável durante o dia a dia de laboratório. Além disso, sou grato por compartilhar seu conhecimento sobre o mundo dos geopolímeros. À Mariana Nucitelli, minha gratidão pela ajuda sempre presente nos momentos em que precisei de seu apoio. E, por fim, à Silvete Mari Soares e Gabriela Silva Dias, meu muito obrigado por acreditarem em mim e abrirem as portas para o meu desenvolvimento pessoal e iniciação no mundo acadêmico.

À empresa Metacaulim do Brasil, agradeço a essencial disponibilização do material, sem o qual esta pesquisa não teria sido viável.

Ao Professor Dr. Guilherme Parsekian e ao Ricardo Luiz Canato, agradeço a disponibilização do Laboratório de Sistemas Estruturais, permitindo a realização dos ensaios mecânicos.

Ao PPGE Civ da UFSCar, e em especial à Profa. Dra. Gláucia Dalfré, obrigado pelo companheirismo e pela agilidade e sempre prestativa nos trâmites administrativos. Ao Ricardo Correia, técnico administrativo do DECiv, pela dedicação e conversas do dia a dia. Aos demais professores do PPGE Civ que cruzaram meu caminho durante o mestrado, agradeço a convivência, as experiências compartilhadas e os aprendizados valiosos que levarei comigo.

Agradeço imensamente ao Rodrigo Magalhães, pelas conversas enriquecedoras sobre o tema e pelo apoio fundamental na realização de ensaios no Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar. Igualmente, agradeço ao Breno Parente Bezerra por sua colaboração. Ao técnico Thiago, também do DEMa, obrigado pela presteza e ajuda essencial no corte dos corpos de prova.

Agradeço igualmente às Professoras Dra. Ana Paula da Luz e Dra. Leila Motta por suas valiosas contribuições a este trabalho. Seu olhar crítico e questionador sobre os geopolímeros, bem como a análise criteriosa dos dados apresentados, foram fundamentais para o aprimoramento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Rafael Salomão, agradeço imensamente a disponibilidade do laboratório da USP e pelas discussões esclarecedoras sobre o tema, que foram fundamentais para o avanço desta pesquisa. Estendo meus agradecimentos ao Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira, e em seu nome, ao Luís Martos, pelo auxílio imprescindível nos ensaios de granulometria, contribuindo significativamente para a qualidade dos resultados obtidos.

Ao SET - Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da USP, e especialmente ao Gustavo Lopes da Rocha, muito obrigado pelo auxílio indispensável e pela expertise demonstrada durante os ensaios com Sonelastic, cruciais para a análise detalhada das argamassas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), agradeço o indispensável apoio financeiro para a realização deste trabalho, por meio da bolsa de estudos (processo nº 88887.838965/2023-00, vigente de 01/04/2023 a 31/03/2025) e do Código de Financiamento 001. Este fomento foi crucial para a dedicação integral a esta pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - NOMENCLATURAS DA TRANSFORMAÇÃO DA ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL DO SÍLICO-ALUMINATO DE AMORFA PARA SEMICRISTALINA.....	26
FIGURA 2 - CATEGORIZAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE MAA EM COMPARAÇÃO COM CIMENTO PORTLAND E CIMENTO SULFOALUMINOSO. A GRADAÇÃO EM ESCALA DE CINZA INDICA A CONCENTRAÇÃO RELATIVA DE ÁLCALIS (NA E/OU K), ONDE TONS MAIS ESCUROS CORRESPONDEM A MAIORES TEORES DESSES ELEMENTOS.....	28
FIGURA 3 - MECANISMOS E PRODUTOS DA ATIVAÇÃO ALCALINA DE PRECURSORES DO TIPO ALUMINOSSILICATOS. SISTEMAS RICOS EM CÁLCIO SEGUEM A VIA AZUL (ESQUERDA), COM SUBPRODUTOS INFLUENCIADOS PELO TEOR DE MAGNÉSIO, ENQUANTO SISTEMAS COM BAIXO CÁLCIO ADOTAM A VIA VERDE (DIREITA).....	28
FIGURA 4 - PLANTA DO LOCAL E FOTOGRAFIA AÉREA DO PAVIMENTO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO DO AEROPORTO DE TOOWOOMBA.....	30
FIGURA 5 - PRODUÇÃO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO.....	31
FIGURA 6 - RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E A IDADE DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS À BASE DE METACAULIM EM DIFERENTES COMBINAÇÕES DE ATIVADORES ALCALINOS.....	35
FIGURA 7 - CONVERSÃO DE CAULINITA EM PRODUTOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO.....	36
FIGURA 8 - APARÊNCIA DE FIBRAS TÍPICAS USADAS PARA REFORÇAR COMPÓSITOS MAA. FA = FIBRA DE AÇO.....	40
FIGURA 9 - DIAGRAMA ILUSTRANDO O FENÔMENO DO PONTEAMENTO DE FISSURAS POR FIBRAS EM COMPÓSITO GEOPOLIMÉRICO.....	41
FIGURA 10 - DIAGRAMA PRISMA SOBRE A <i>STRING</i> UTILIZADA.....	43
FIGURA 11 - PRODUÇÃO ACUMULADA E ANUAL DOS ARTIGOS SOBRE GEOPOLÍMERO À BASE DE METACAULIM REFORÇADOS COM FIBRA METÁLICA.....	44
FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO DE PUBLICAÇÕES DE ARTIGOS POR PAÍSES SOBRE GEOPOLÍMERO À BASE DE METACAULIM REFORÇADOS COM FIBRA METÁLICA.....	45
FIGURA 13 - NUVEM DE PALAVRAS CONSIDERANDO AS PALAVRAS-CHAVES MAIS FREQUENTES ENCONTRADAS NOS ARTIGOS (AUTORES).....	46
FIGURA 14 - MATERIAIS SECOS UTILIZADOS NAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS: METACAULIM, PÓ DE VIDRO (PASSANTE NA PENEIRA #200), ALUMINA HIDRATÁVEL, FIBRA DE AÇO RETA E AREIA FINA.....	59
FIGURA 15 - ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	60
FIGURA 16 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	61
FIGURA 17 - ETAPAS DE BENEFICIAMENTO DO VIDRO.....	63
FIGURA 18 - PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DO PÓ DE VIDRO: A) LAVAGEM E RETIRADA DOS RÓTULOS DAS GARRAFAS; B) SECAGEM AO AR DAS GARRAFAS; C) QUEBRA DAS GARRAFAS EM CACOS EM UMA BETONEIRA COM BOLAS DE AÇO; D) MOAGEM FINAL EM MOINHO DE BOLAS; E) PRODUTO OBTIDO DA MOAGEM.....	63
FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS PRECURSORES DETERMINADA POR GRANULOMETRIA A LASER: ALUMINA ALPHABOND 300 (LINHA ROXA), METACAULIM HP ULTRA (LINHA LARANJA) E PÓ DE VIDRO (LINHA VERDE).....	66
FIGURA 20 - FTIR DOS MATERIAIS PRECURSORES.....	67
FIGURA 21 - DRX DOS MATERIAIS PRECURSORES.....	69

FIGURA 22 - MICROGRAFIAS ELETRÔNICAS DE VARREDURA DOS MATERIAIS PRECURSORES: COMPARAÇÃO ENTRE METACULIM E ALUMINA AMORFA SOB AMPLIAÇÃO DE 500X.	70
FIGURA 23 - MICROGRAFIAS DO PÓ DE VIDRO EM DIFERENTES ESCALAS: 30 MM E 5 MM.	71
FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.	73
FIGURA 25 - PROCEDIMENTO DO PREPARO DA SOLUÇÃO ALCALINA.	78
FIGURA 26 - PROCEDIMENTO GERAL DE MISTURA DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS COM E SEM FIBRA DE AÇO.	79
FIGURA 27 - PROCESSO DE MISTURA: (A) MATERIAIS PRONTOS PARA SEREM MISTURADOS; (B) ARGAMASSADEIRA UTILIZADA NO PROCEDIMENTO.	79
FIGURA 28 - MOLDES PRISMÁTICOS SELADOS COM FILME PLÁSTICO APÓS A MOLDAGEM.	80
FIGURA 29 - RECIPIENTE UTILIZADO PARA ARMAZENAMENTO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS.	80
FIGURA 30 - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRA: AMOSTRA DO TRAÇO MC80PV20-AL-FM2.0.	82
FIGURA 31 - APARATO E CORPO DE PROVA DURANTE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO EM 3 PONTOS.	82
FIGURA 32 - APARATO E CORPO DE PROVA DURANTE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL: (A) VISÃO GERAL; (B) DETALHE DO CORPO DE PROVA.	83
FIGURA 33 - APARATO COM CORPO DE PROVA DURANTE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO LONGITUDINAL: (A) VISÃO GERAL; (B) MICROFONE POSICIONADO NA EXTREMIDADE DO CORPO DE PROVA.	84
FIGURA 34 - CORPO DE PROVA DURANTE ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.	85
FIGURA 35 - DISCOS DE AÇO CARBONO E PLACAS DE MADEIRA UTILIZADAS COMO GABARITO.	86
FIGURA 36 - ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO (EDP): APARATO UTILIZADO DURANTE O ENSAIO: AMOSTRA 4 DO MC100-PV0-FM1.0.	86
FIGURA 37 - NÍVEIS DE DESLOCAMENTO ADOTADOS PARA A VERIFICAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RESIDUAIS.	88
FIGURA 38 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS.	90
FIGURA 39 - COMPARAÇÃO GRÁFICA DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS ENTRE AS FORMULAÇÕES ANALISADAS.	92
FIGURAS 40 - CORPOS DE PROVA ROMPIDOS APÓS O ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DE IDADE: (A) MC100-PV-FM1.0; (B) MC100 PV- FM1.5; (C) MC100-PV-FM2.0; E (D) MC80-PV20-AL-FM2.0.	94
FIGURAS 41 - CORPOS DE PROVA ROMPIDOS APÓS O ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DE IDADE: (A) AMOSTRA DO MC100-PV0 E (B) AMOSTRA DO MC80-PV20-AL.	95
FIGURA 42 - RELAÇÃO ENTRE O VOLUME DE FIBRAS E A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DA LITERATURA E OS RESULTADOS DO PRESENTE ESTUDO.	96
FIGURA 43 - COMPARAÇÃO GRÁFICA DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS ENTRE AS FORMULAÇÕES ANALISADAS.	99
FIGURA 44 - RELAÇÃO ENTRE O VOLUME DE FIBRAS E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DA LITERATURA E OS RESULTADOS DO PRESENTE ESTUDO.	101
FIGURA 45 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS AO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO LONGITUDINAL AOS 28 DIAS DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS.	104

FIGURA 46 - COMPARAÇÃO GRÁFICA DA DENSIDADE DE MASSA APARENTE AOS 28 DIAS ENTRE AS FORMULAÇÕES ANALISADAS.	105
FIGURA 47 - AMOSTRAS DOS CORPOS DE PROVAS ROMPIDOS: (A) TRAÇO DE REFERÊNCIA, (B) MC100-PV0-FM1.5.	107
FIGURA 48 - COMPARAÇÃO GRÁFICA DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS ENTRE AS FORMULAÇÕES ANALISADAS.	109
FIGURA 49 - RELAÇÃO ENTRE O VOLUME DE FIBRAS E A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DA LITERATURA.	110
FIGURA 50 - COMPARAÇÃO GRÁFICA DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR DUPLO PUNÇIONAMENTO E CARGA MÁXIMA MÉDIA AOS 28 DIAS ENTRE AS FORMULAÇÕES ANALISADAS.	113
FIGURA 51 - CORPOS DE PROVA ROMPIDOS APÓS O ENSAIO DE DUPLO PUNÇIONAMENTO AOS 28 DIAS DE IDADE: (A) AMOSTRA DO MC100-PV0-FM1.0 COM 2 FISSURAS (B) AMOSTRA DO MC100-PV0-FM1.5 COM 3 FISSURAS; (C) AMOSTRA DO MC80-PV20-AL-FM2.0 COM 2 FISSURAS.	114
FIGURA 52 - ANÁLISE DAS CARGAS RESIDUAIS (KN) EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO VERTICAL (0,5–4,0 MM) PARA GEOPOLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE AÇO. OS VALORES PERCENTUAIS INDICAM A RAZÃO ENTRE A CARGA RESIDUAL E A CARGA MÁXIMA DE REFERÊNCIA (PF).	116
FIGURA 53 - DIAGRAMA DE CARGA VERSUS DESLOCAMENTO VERTICAL E ENERGIA VERSUS DESLOCAMENTO VERTICAL DAS ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRA.	119
FIGURA 54 - DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) DAS PASTAS DOS GEOPOLÍMEROS MC100PV0 (COR VERMELHA) E MC80PV20-AL (COR AZUL).	120
FIGURA 55 - DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) DAS PASTAS DOS GEOPOLÍMEROS MC100PV0 (COR VERMELHA) E MC80PV20-AL (COR AZUL) NO INTERVALO DE 20 A 40°.	120
FIGURA 56 - ESPECTRO DE FTIR DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS MC100PV0 (EM VERMELHO) E MC80PV20-AL (EM AZUL): (A) ABRANGENDO A FAIXA DE 4000 A 500 CM ⁻¹ ; (B) ABRANGENDO A FAIXA DE 1500 A 500 CM ⁻¹	123
FIGURA 57 - ESPECTRO DE FTIR DAS PASTAS GEOPOLIMÉRICAS MC100PV0 (EM VERMELHO) E MC80PV20-AL (EM AZUL).	126
FIGURA 58 - MEV DA ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA MC100PV0, OBTIDAS EM DIFERENTES NÍVEIS DE AMPLIAÇÃO (114X, 228X, 456X E 1000X).	127
FIGURA 59 - MEV DA ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA MC80PV20-AL, OBTIDAS EM DIFERENTES NÍVEIS DE AMPLIAÇÃO (125X, 250X, 500X E 1000X).	129
FIGURA 60 - IMAGENS DE MEV DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS MC100PV0 E MC80PV20-AL, OBTIDAS COM AMPLIAÇÃO DE 500X.	129
FIGURA 61 - ANÁLISE COMPARATIVA POR EDS - ORDENADA POR PERCENTUAL EM MASSA DE ELEMENTO (MAIOR PARA MENOR) DA ARGAMASSA MC100PV0 NA ESCALA DE 25 MICRÔMETROS.	130
FIGURA 62 - IMAGENS DE MEV DA ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA MC100PV0-FM1.0 OBTIDAS NAS AMPLIAÇÕES DE 100X E 250X.	132
FIGURA 63 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO <i>VERSUS</i> RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA AS FORMULAÇÕES MC100-PV0-FM1.0, MC100-PV0-FM1.5 E MC100-PV0-FM2.0, COM LINHA DE TENDÊNCIA REPRESENTADA PELA EQUAÇÃO $Y=1,3158X-72,112$ ($R^2=0,922$).	133
FIGURA 64 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL <i>VERSUS</i> RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR DUPLO PUNÇIONAMENTO PARA AS FORMULAÇÕES MC100-PV0-FM1.0, MC100-PV0-FM1.5 E MC100-PV0-FM2.0, COM LINHA DE TENDÊNCIA REPRESENTADA PELA EQUAÇÃO $Y=0,1531X - 7,144$ ($R^2=0,9363$).	134
FIGURA 65 - CORRELAÇÕES ENTRE O VOLUME DE FIBRAS DE AÇO E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS FORMULAÇÕES MC100PV0-FM (1,0%, 1,5% E 2,0% DE ADIÇÃO DE FIBRA DE AÇO): (A) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL; (B) RESISTÊNCIA	

À TRAÇÃO NA FLEXÃO; (C) MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO; (D)
TENSÃO DE TRAÇÃO POR DUPLO PUNÇONAMENTO; (E) CARGA MÁXIMA DE
FISSURAÇÃO; (F) TENACIDADE..... 136

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO.	43
TABELA 2 - REVISTAS COM MAIOR NÚMERO DE TRABALHOS SOBRE GEOPOLÍMERO À BASE DE METACAULIM REFORÇADOS COM FIBRA METÁLICA (AUTORES).	45
TABELA 3 - LISTA DOS 10 ARTIGOS MAIS CITADOS ENCONTRADOS COM O PROTOCOLO DE BUSCA (AUTORES).....	46
TABELA 4 - DADOS DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS, COMPOSIÇÃO E TIPO DE FIBRA METÁLICA EXTRAÍDAS DOS 21 ARTIGOS SELECIONADOS.	48
TABELA 5 - ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TEORES ÓTIMOS DE FIBRAS EM GEOPOLÍMEROS. LEGENDA:✓ MELHORA SIGNIFICATIVA NA PROPRIEDADE EM RELAÇÃO À MATRIZ NÃO REFORÇADA; = PROPRIEDADE EQUIVALENTE À MATRIZ SEM FIBRAS; – DADO NÃO REPORTADO NO ESTUDO.	53
TABELA 6 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DO METACAULIM.	62
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO PÓ DE VIDRO.	64
TABELA 8 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ALUMINA.	65
TABELA 9 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO AGREGADO MIÚDO.	72
TABELA 10 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AGREGADO MIÚDO.	72
TABELA 11 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO UTILIZADO.	73
TABELA 12 - PROPRIEDADES DA FIBRA DE AÇO.	74
TABELA 13 - FORMULAÇÕES DAS ARGAMASSAS E PASTAS GEOPOLIMÉRICAS A SEREM ESTUDADAS.	75
TABELA 14 - QUANTIDADE DE MATERIAL PARA PRODUÇÃO DA ARGAMASSA A CADA 100G DE MATERIAL PRECURSOR.	77
TABELA 15 - MOLARIDADES E RAZÕES MOLARES DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS ESTUDADAS.	77
TABELA 16 - ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS.	81
TABELA 17 - VALORES MÉDIOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA PRELIMINAR (TRAÇO DE REFERÊNCIA: MC100-PV0).	91
TABELA 18 - DETALHAMENTO DO TESTE DE TUKEY PARA IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS ENTRE AS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS.	92
TABELA 19 - VALORES MÉDIOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA PRELIMINAR (TRAÇO DE REFERÊNCIA: MC100-PV0).	98
TABELA 20 - DETALHAMENTO DO TESTE DE TUKEY PARA IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS ENTRE AS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS.	98
TABELA 21 - VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO AOS 28 DIAS DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA PRELIMINAR (TRAÇO DE REFERÊNCIA: MC100-PV0).	103
TABELA 22 - DETALHAMENTO DO TESTE DE TUKEY PARA IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS ENTRE AS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS NO ENSAIO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO AOS 28 DIAS.	103
TABELA 23 - VALORES MÉDIOS DA DENSIDADE DE MASSA APARENTE AOS 28 DIAS DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA PRELIMINAR (TRAÇO DE REFERÊNCIA: MC100-PV0).	105

TABELA 24 - DETALHAMENTO DO TESTE DE TUKEY PARA IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS ENTRE AS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS DA DENSIDADE DE MASSA APARENTE AOS 28 DIAS.....	105
TABELA 25 - VALORES MÉDIOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS E ANÁLISE ESTATÍSTICA PRELIMINAR (TRAÇO DE REFERÊNCIA: MC100-PV0).....	108
TABELA 26 - DETALHAMENTO DO TESTE DE TUKEY PARA IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS ENTRE AS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS.....	108
TABELA 27 - VALORES MÉDIOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR DUPLO PUNÇIONAMENTO (<i>ft</i>) E A CARGA DE FISSURAÇÃO (<i>Pf</i>) AOS 28 DIAS DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS (TRAÇO DE REFERÊNCIA: MC100-PV0-FM1.0).....	113
TABELA 28 - DETALHAMENTO DO TESTE DE TUKEY PARA IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS ENTRE AS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR DUPLO PUNÇIONAMENTO AOS 28 DIAS.....	113
TABELA 29 - RELAÇÃO ENTRE A CARGA MÁXIMA DE REFERÊNCIA (PF) E AS CARGAS RESIDUAIS NOS DESLOCAMENTOS DE 0,5 A 4,0 MM PARA AS FORMULAÇÕES DE GEOPOLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE AÇO.....	117
TABELA 30 - RESULTADOS DE TENACIDADE DAS FORMULAÇÕES AOS 28 DIAS.....	117
TABELA 31 - ANÁLISE DE RIETVELD - PASTAS MC80PV20-AL E MC100PV0.....	121
TABELA 32 - DADOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE O VOLUME DE FIBRAS DE AÇO E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS FORMULAÇÕES MC100PV0-FM (1,0%, 1,5% E 2,0% DE ADIÇÃO DE FIBRA DE AÇO):.....	135
TABELA 33 - RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS PARA AS PROPRIEDADES ESTUDADAS.....	137

LISTA DE QUADRO

QUADRO 1 - NOMENCLATURA ADOTADA PARA AS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS ESTUDADAS.	75
---	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACES

#	Malha de peneiras
%	Porcentagem
%Na ₂ O	Concentrao de Na ₂ O na soluo alcalina
λ	Fator de forma (razão entre o comprimento e diâmetro da fibra)
a/agl	Relao gua/aglomerantes
a/c	Relao gua/cimento
ABNT	Associao Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AL	Alumina
CPs	Corpos de prova
CV	Coefficiente de variao
df	Diâmetro da fibra de ao
<i>d</i> ₁₀	Diâmetro da partícula abaixo do qual 10% do volume do material está presente
<i>d</i> ₅₀	Diâmetro mediano; diâmetro da partícula abaixo do qual 50% do volume do material está presente.
<i>d</i> ₉₀	Diâmetro da partícula abaixo do qual 90% do volume do material está presente
DECiv	Departamento de Engenharia Civil
DRX	Difraco de Raios-X
EDP	Ensaio de duplo puncionamento
EDS	Energia dispersiva de raios-X
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo
EMIC	Máquina Universal de Ensaio
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios-X
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
GESEC	Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construo Civil e Urbana - DECiv-UFSCar
H	Altura
IFSC/USP	Instituto de Física de São Carlos/Universidade de São Paulo
lf	Comprimento da fibra
lf/df	Relao comprimento/diâmetro da fibra de ao
LMC	Laboratório de Materiais e Componentes
MAA	Materiais ativados alcalinamente
MC	Metacaulim
MC:PV	Razão em massa de Metacaulim e P de vidro
MC100-PV0	Trao com metacaulim, 0% de p de vidro e 0% de fibra de ao.
MC100-PV0-FM1.0	Trao com metacaulim, 0% de p de vidro e 1,0% de fibra de ao (em volume).
MC100-PV0-FM1.5	Trao com metacaulim, 0% de p de vidro e 1,5% de fibra de ao (em volume).
MC100-PV0-FM2.0	Trao com metacaulim, 0% de p de vidro e 2,0% de fibra de ao (em volume).
MC80-PV20-AL	Trao com metacaulim, substituio de 20% por p de vidro e adio de alumina
MC80-PV20-AL-FM2.0	Trao com metacaulim, substituio de 20% por p de vidro, adio de alumina e 2,0% de fibra de ao (em volume).

MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Megapascal
MS	Razão molar ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)
NBR	Norma brasileira
PV	Pó de Vidro
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.2	JUSTIFICATIVA	22
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	23
1.3.1	Objetivo geral.....	23
1.3.2	Objetivos específicos	23
1.4	DELIMITAÇÕES.....	24
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	GEOPOLÍMERO	26
2.2	GEOPOLÍMEROS, CONCRETOS E COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS: APLICAÇÕES E DESEMPENHO	29
2.3	RAZÕES MOLARES	32
2.4	ATIVADORES.....	33
2.5	MATERIAIS PRECURSORES	35
2.5.1	Metacaulim.....	35
2.5.2	Pó de vidro	37
2.5.3	Alumina.....	39
2.6	COMPÓSITOS ÁLCALI-ATIVADOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	40
2.7	PESQUISAS DE COMPÓSITOS ÁLCALI-ATIVADOS REFORÇADOS COM FIBRAS METÁLICAS	42
2.7.1	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	43
2.7.2	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	47
2.7.2.1	Geopolímeros reforçados com fibras de aço convencionais	54
a)	Fibras de aço com ancoragem na extremidade (<i>Hooked-End</i>)	54
b)	Fibras de aço retas.....	54
c)	Fibras de Aço Crimpadas e Corrugadas.....	55
2.7.2.2	Geopolímeros reforçados com fibras metálicas recicladas de pneus	56
2.7.2.3	Considerações finais da revisão.....	56
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	60
3.1.1	Metacaulim.....	62
3.1.2	Pó de vidro	63

3.1.3	Alumina Hidratável.....	65
3.1.4	Caracterização dos Materiais Precusores.....	66
3.1.4.1	Granulometria dos Materiais Precusores.....	66
3.1.4.2	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	67
3.1.4.3	Difração de raios-X (DRX)	68
3.1.4.4	Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)	70
3.1.5	Silicato de Sódio e Hidróxido de Sódio	71
3.1.6	Agregado miúdo.....	71
3.1.7	Fibra metálicas	73
3.2	DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS	74
3.2.1	Balanço estequiométrico	76
3.3	PROCEDIMENTO DE MISTURA E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	77
3.4	CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	80
3.5	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS	81
3.5.1	Índice de Consistência (<i>flow table</i>)	81
3.5.2	Propriedades mecânicas	82
3.5.3	Resistência à tração na flexão e compressão axial (MPa).....	82
3.5.4	Módulo de elasticidade dinâmico e densidade de massa no estado endurecido	83
3.5.5	Densidade de massa no estado endurecido	84
3.5.6	Resistência à tração por compressão diametral.....	85
3.5.7	Módulo de resistência residual à tração (Barcelona)	85
3.5.7.1	Cálculo da resistência à tração por duplo puncionamento	87
3.5.7.2	Cálculo das resistências residuais.....	87
3.5.7.3	Cálculo da tenacidade (energia total)	88
3.6	Análise Estatística dos Resultados	88
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.1	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	90
4.1.1	Índice de consistência (<i>flow table</i>).....	90
4.2	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	91
4.2.1	Resistência à tração na flexão	91
4.2.1.1	Relação Volume de fibras <i>versus</i> Resistência à tração na flexão.....	95
4.2.2	Resistência à compressão axial	98
4.2.2.1	Relação Volume de fibras <i>versus</i> Resistência à compressão axial.....	101
4.2.3	Módulo de elasticidade dinâmico.....	103

4.2.4	Densidade de massa aparente	104
4.2.5	Resistência à tração por compressão diametral.....	107
4.2.5.1	Relação Volume de fibras <i>versus</i> Resistência à tração por compressão diametral	110
4.2.6	Resistência à tração por duplo puncionamento	112
4.2.6.1	Tenacidade (energia total)	117
4.2.7	Caracterização microestrutural dos geopolímeros	119
4.2.7.1	Difração de raios-X (DRX)	119
4.2.7.2	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	123
4.2.7.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	127
a)	Argamassas geopoliméricas sem fibras.....	127
b)	Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) da argamassa MC100PV0	130
c)	Argamassas geopoliméricas com fibras	132
4.3	CORRELAÇÕES	133
4.3.1	Resistência à compressão axial <i>versus</i> resistência à tração na flexão.....	133
4.3.2	Resistência à compressão axial <i>versus</i> Resistência à tração por duplo puncionamento (MPa).....	133
4.3.3	Correlações em argamassas geopoliméricas à base de metacaulim reforçados com fibras de aço (MC100PV0) em função do volume de fibras.....	135
4.4	RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS	137
5	CONCLUSÕES	139
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	141
	REFERÊNCIAS	143

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O déficit habitacional tem se intensificado globalmente devido a diversos fatores interconectados. O crescimento populacional, associado à necessidade de expandir a infraestrutura urbana - incluindo habitações, edifícios comerciais e sistemas de transporte - desempenha um papel fundamental nesse cenário. Ademais, o desenvolvimento econômico e a urbanização acelerada têm ampliado significativamente a demanda por soluções construtivas, pressionando a indústria da construção civil a buscar alternativas mais eficientes e sustentáveis (UNITED NATIONS, 2019).

Em 2017, a construção e as operações relacionadas a edificações foram responsáveis por cerca de 36% do consumo mundial de energia e quase 40% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes do setor energético (IEA; UNEP, 2018). A indústria do cimento, por sua vez, contribui significativamente para as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), representando cerca de 7% das emissões totais geradas pela atividade humana em todo o mundo. Porém, devido a medidas adotadas ao longo do tempo, as emissões de gás carbônico da indústria do cimento no Brasil correspondem a aproximadamente um terço da média mundial, representando cerca de 2,6% das emissões, conforme indicado pelo Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa (ROADMAP, 2019).

O cimento Portland desempenha um papel fundamental na indústria da construção, sendo amplamente utilizado na produção de argamassas e concretos. No entanto, a principal matéria-prima do cimento, o clínquer, é proveniente de fontes não renováveis, e o processo de produção requer um alto consumo de energia, apresentando potencial poluidor significativo. Majoritariamente, o processo de calcinação responsável pela formação do clínquer, é responsável por aproximadamente 66% das emissões de CO₂ (ROADMAP, 2019)

Em 2021, estima-se que houve a emissão de 590 kg de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido (IEA, 2022). Ainda que possam ser utilizados materiais cimentícios suplementares (MCS) que pode trazer benefícios às propriedades da matriz cimentícia e diminuir a dependência do clínquer na composição do cimento, é necessário encontrar aglomerantes alternativos ao cimento do ponto de vista da sustentabilidade.

O geopolímero se destaca como uma solução promissora para reduzir a emissão de gases de efeito estufa em comparação ao cimento Portland, apresentando propriedades desejáveis para a matriz geopolimérica. Além disso, permite a incorporação de resíduos na

produção de argamassas e concretos sustentáveis. Nesse contexto, essa alternativa é particularmente atrativa, pois durante sua produção podem ser utilizados materiais 'verdes', ou seja, matérias-primas projetadas para minimizar o impacto ambiental, como a cinza de casca de arroz. Adicionalmente, resíduos industriais, que muitas vezes não recebem um destino ambientalmente adequado, como pó de vidro e cinzas volantes, podem ser empregados na formulação de geopolímeros, contribuindo para a sustentabilidade na construção civil (Almutairi et al., 2021).

Segundo Aisheh *et al.* (2022), a utilização de fibras metálicas ou de polipropileno em concretos geopoliméricos de ultra-alto desempenho pode melhorar, respectivamente, o comportamento mecânico e a durabilidade desses materiais. Portanto, o uso de materiais sustentáveis que gerem menos poluição durante o seu processo de produção, assim como a adição de fibras aos materiais geopoliméricos podem trazer características desejáveis ao compósito, melhorando sua tenacidade e comportamento mecânico. Nesse sentido, busca-se nesse estudo desenvolver argamassas geopoliméricas para avaliar sua função como argamassa estrutural com a adição de fibras metálicas e pó de vidro oriundo de garrafas recicláveis.

1.2 JUSTIFICATIVA

Maury e Blumenschein (2013) apontam que a indústria cimenteira gera impactos ambientais e à saúde pública por meio da contaminação do ar, solo e recursos hídricos, além das elevadas emissões de gases de efeito estufa. Com o aumento da renda e da urbanização, cresce também a demanda por cimento, estimulando a expansão da produção. Estima-se que esse ritmo se mantenha até 2050, quando o crescimento populacional e a intensidade do uso do cimento deverão se estabilizar (ROADMAP, 2019).

Assim, a indústria cimenteira está sendo cada vez mais questionada devido aos seus impactos ambientais e sociais, abrangendo questões como emissões, saúde e segurança no trabalho (CSI, 2012). Buscando-se diminuir as emissões de gases efeito estufa e aproveitamento de resíduos sem destinação correta na natureza, o geopolímero pode ser utilizado como argamassas e concretos.

Segundo Singh e Middendorf (2020), o geopolímero é uma alternativa sustentável ao cimento Portland tradicional, com propriedades como alta resistência, durabilidade e resistência ao fogo. A formação e as propriedades dos geopolímeros dependem das características químicas e físicas dos materiais, dos ativadores alcalinos e das condições de cura. No entanto, são necessárias mais pesquisas para entender o processo de geopolimerização, o impacto da adição

de resíduos na matriz, assim como a criação de normas para regulamentação dos requisitos mínimos necessários para o seu uso.

Na análise do ciclo de vida de concretos geopoliméricos em comparação aos concretos à base de cimento Portland com adição de escória (CP II-E), Borges *et al.* (2014) observaram uma redução de 45,8% no consumo energético e uma diminuição de 72,4% nas emissões de gases de efeito estufa na produção de 1 m³ de concreto geopolimérico em relação ao concreto tradicional. Essa redução possui potencial para ser ainda mais significativa se forem incorporados materiais alternativos à solução alcalina, substituindo o silicato de sódio.

A utilização do concreto geopolimérico como substituto do concreto de cimento Portland tradicional pode resultar em uma redução significativa de aproximadamente 80% nas emissões de dióxido de carbono associadas à produção de concreto dependendo do material precursor e ativador utilizados (Hassan *et al.*, 2019). Além disso, a microestrutura do concreto geopolimérico apresenta uma menor permeabilidade aos cloretos devido à sua reduzida porosidade e estabilidade química, resultando em um desempenho superior em ambientes marinhos (Almutairi *et al.* 2021). A adição de fibras ao concreto geopolimérico proporciona características desejáveis ao compósito, melhorando seu comportamento mecânico, tanto em termos de resistência à compressão axial quanto de resistência à tração na flexão, quando utilizadas em proporções adequadas.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Qual o efeito combinado da incorporação de pó de vidro e alumina, aliado ao reforço com fibras metálicas, nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade de argamassas geopoliméricas à base de metacaulim?

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho mecânico de argamassas geopoliméricas à base de metacaulim, reforçadas com fibras metálicas e incorporando resíduo de pó de vidro e alumina, visando otimizar a composição dos materiais para potencializar suas propriedades mecânicas e promover o aproveitamento sustentável de resíduos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Investigar o efeito da adição de fibras metálicas nas propriedades mecânicas e na trabalhabilidade das argamassas geopoliméricas à base de metacaulim.

- Avaliar a influência da modificação da matriz geopolimérica por meio da substituição parcial do metacaulim por pó de vidro e adição de alumina na microestrutura e no comportamento mecânico, considerando o aproveitamento sustentável de resíduos.
- Determinar o teor ótimo de fibras metálicas para maximizar a resistência à tração na flexão, resistência à tração por duplo punção e a resistência à compressão axial das argamassas.

1.4 DELIMITAÇÕES

Com base nos materiais produzidos e utilizados, algumas delimitações são estabelecidas para orientar o estudo em direção aos objetivos propostos e possibilitar uma análise mais eficaz:

- a) Metacaulim, pó de vidro e alumina são adotados como materiais precursores.
- b) Hidróxido de sódio e silicato de sódio comercial funcionam como ativadores alcalinos.
- c) As concentrações de ativador ($MS = 1,5$ e $Na_2O = 15\%$) foram estabelecidas com base em referências bibliográficas e em ensaios preliminares conduzidos pelo grupo GESEC.
- d) Fibras de aço reta são utilizadas para reforço das argamassas geopoliméricas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está organizada em quatro capítulos, além desta introdução. No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos sobre geopolímeros e matrizes reforçadas com fibras, além de uma revisão bibliográfica dos estudos envolvendo argamassas geopoliméricas com adição de fibras metálicas. No Capítulo 3 descreve-se a metodologia empregada, abrangendo a estratégia de pesquisa, a caracterização dos materiais, as formulações estudadas, os ensaios realizados e os procedimentos de análise estatística. No Capítulo 4 são expostos e discutidos os resultados obtidos ao longo do estudo. Por fim, no Capítulo 5 são reunidas as principais conclusões da pesquisa e sugestões para investigações futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

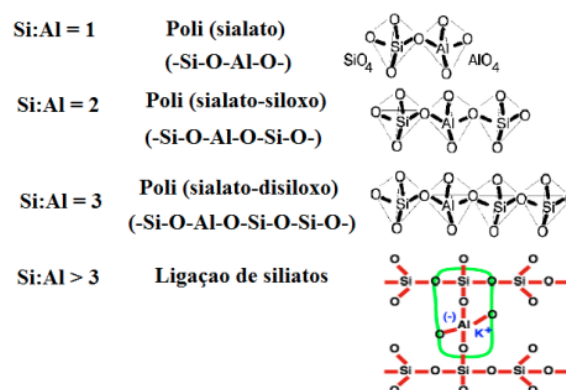
As argamassas geopoliméricas constituem uma alternativa sustentável aos materiais cimentícios convencionais, caracterizando-se pela utilização de ligantes inorgânicos poliméricos em substituição ao cimento Portland. Este capítulo apresenta uma análise abrangente dos princípios fundamentais que regem os sistemas geopoliméricos, contemplando aspectos relacionados à composição química, aos mecanismos de ativação alcalina e às propriedades mecânicas resultantes. Paralelamente, examina-se o potencial de aprimoramento das propriedades estruturais mediante o reforço com fibras, destacando-se as vantagens e limitações inerentes a essa estratégia de modificação da matriz geopolimérica.

2.1 GEOPOLÍMERO

Segundo Provis (2014), a palavra "geopolímero" foi criada pelo cientista de materiais francês Joseph Davidovits na década de 1970. Ela é derivada das palavras gregas "geo", que significa terra, e "polímero", que significa muitas partes. Davidovits usou o termo para descrever uma classe de polímeros inorgânicos que podem ser sintetizados a partir de vários minerais naturais e subprodutos industriais, como cinzas volantes e escória. Tais materiais têm a capacidade de serem empregados como alternativas ao cimento Portland convencional na fabricação de concreto e outros elementos construtivos, trazendo potenciais vantagens ambientais devido à redução do seu potencial poluidor.

Segundo Davidovits (1991), os geopolímeros são materiais inorgânicos que consistem em uma matriz polimérica tridimensional conforme mostrada na Figura 1, formada a partir da reação de um material aluminossilicato com um ativador alcalino.

Figura 1 - Nomenclaturas da transformação da estrutura tridimensional do sílico-aluminato de amorfa para semicristalina.



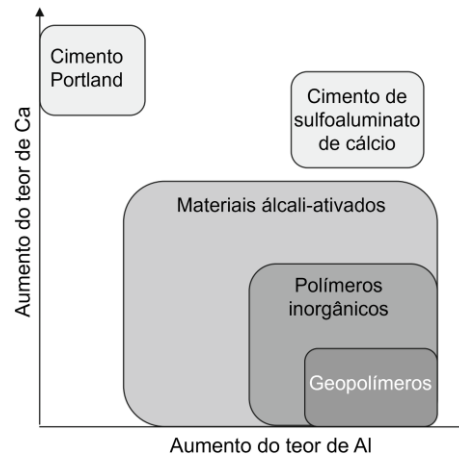
Fonte: Adaptado de Davidovits, 2002.

Tal reação química cria ligações químicas fortes, resultando em um material com propriedades mecânicas, térmicas e químicas distintas, que podem ser ajustadas por meio da seleção adequada dos materiais precursores e parâmetros de ativação. Existem diversas fontes para o material aluminossilicato, também chamado de material precursor, que vão desde minerais naturais como caulinita e argilas até resíduos industriais como cinzas volantes, escórias metalúrgicas, sílica amorfa e cinzas de casca de arroz.

Os materiais alcalinamente ativados (MAA) englobam uma classe ampla de ligantes que incluem os geopolímeros, mas também sistemas baseados em silicatos e aluminatos com maior teor de cálcio, semelhantes aos cimentos Portland. Já os geopolímeros, conforme definido por Davidovits (2018), distinguem-se por sua estrutura polimérica tridimensional, formada por redes aluminossilicáticas altamente reticuladas, com baixo teor de cálcio e alta concentração de alumínio. Os geopolímeros apresentam propriedades superiores aos cimentos Portland convencionais, destacando-se por elevada durabilidade e resistência química, especialmente a ácidos, penetração de cloretos e abrasão (Wong, 2022). Suas ligações de aluminossilicatos de sódio conferem maior estabilidade e resistência ao desgaste, e a adição de fibras e nanosílica pode aprimorar ainda mais sua performance mecânica e resistência ao dano. Sua microestrutura densa e altamente estável reduz a permeabilidade a agentes agressivos, aumentando a vida útil das estruturas.

Já os materiais alcalinos ativados à base de cálcio formam fases similares ao C-S-H dos cimentos tradicionais, mas com menor emissão de CO₂ (Van Deventer *et al.*, 2010). A Figura 2 ilustra a distinção entre materiais álcali-ativados, geopolímeros, cimentos tradicionais e cimento sulfoaluminoso, destacando diferenças estruturais e composicionais. Os materiais ativados alcalinamente (MAA) podem ser produzidos por processos de "alcalinização" (dissolução de precursores sólidos sem formação de polímeros), enquanto os geopolímeros resultam de uma geopolimerização em etapas definidas, que incluem a ativação alcalina, a dissolução de precursores (como metacaulim) e a policondensação em estruturas macromoleculares (Davidovits, 2018).

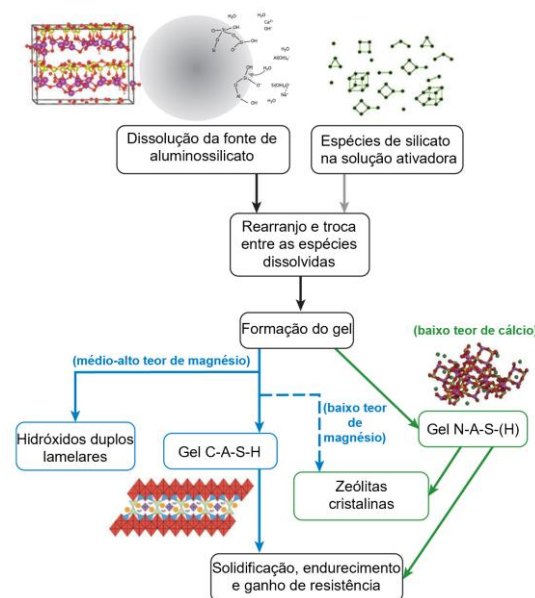
Figura 2 - Categorização dos diferentes tipos de MAA em comparação com cimento Portland e cimento sulfoaluminoso. A gradação em escala de cinza indica a concentração relativa de álcalis (Na e/ou K), onde tons mais escuros correspondem a maiores teores desses elementos.



Fonte: Adaptado de Van Deventer *et al.*, 2010.

Por outro lado, Provis e Bernal (2014) adotaram uma perspectiva mais inclusiva, reconhecendo a complexidade dos MAA e sua relação com os geopolímeros, discutindo como diferentes precursores e condições químicas podem resultar em propriedades e estruturas que, embora distintas, podem incluir características tanto de geopolímeros quanto de MAA, conforme apresentado na Figura 3. Essa diferença de abordagem destaca um debate crítico na academia sobre a terminologia e a categorização dos materiais, refletindo diferentes interpretações sobre as relações químicas e estruturais que definem esses grupos de materiais.

Figura 3 - Mecanismos e produtos da ativação alcalina de precursores do tipo aluminossilicatos. Sistemas ricos em cálcio seguem a via azul (esquerda), com subprodutos influenciados pelo teor de magnésio, enquanto sistemas com baixo cálcio adotam a via verde (direita).



Fonte: Adaptado de Provis e Bernal (2014).

A etapa subsequente na formação de um geopolímero envolve a ativação alcalina por meio de compostos de metais alcalinos, como sódio ou potássio, que podem ser adicionados na forma líquida (sistemas *two-part*) ou incorporados como sólidos (sistemas *one-part*). Para essa etapa, são comumente empregadas misturas de hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH) juntamente com silicato de sódio ou silicato de potássio (Rangan, 2014). De acordo com Duxson et al. (2007), a relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ é um fator importante na síntese de materiais geopoliméricos a partir de soluções alcalinas de silicato porque essa relação modifica significativamente o grau de polimerização das espécies dissolvidas na solução alcalina. Essa modificação, por sua vez, influencia diretamente a estrutura e as propriedades dos géis geopoliméricos formados.

Segundo Davidovits (2002), a aplicação dos geopolímeros não se restringe somente a construção civil, abrangendo outros setores como aeronáutica, indústria nuclear, isolamento térmico de construções, fornos isolados, engenharia mecânica entre outros. Cabe destacar o uso do geopolímero na renovação de edifícios históricos ou *retrofit*, onde a segurança contra incêndios é uma preocupação fundamental.

2.2 GEOPOLÍMEROS, CONCRETOS E COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS: APLICAÇÕES E DESEMPENHO

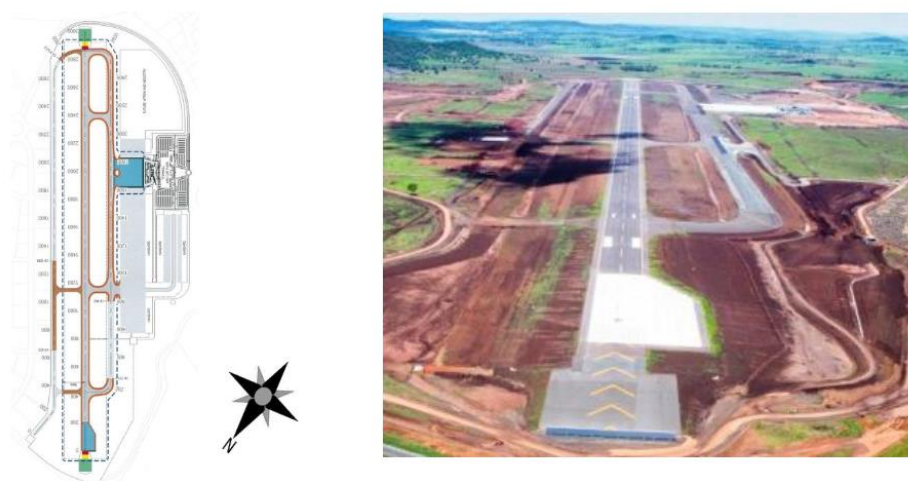
Devido ao impacto ambiental da indústria de fabricação de cimento e concreto, o interesse em pesquisas matrizes álcali ativadas e geopoliméricas aumentou nas últimas décadas. Os geopolímeros, quando utilizados como matriz e reforçados com fibras (metálicas, poliméricas, vegetais ou minerais), formam compósitos geopoliméricos que combinam a sustentabilidade da matriz inorgânica com o desempenho mecânico aprimorado pelo reforço fibroso. No entanto, ainda há obstáculos científicos na compreensão de suas reações de endurecimento, características de mistura e durabilidade a longo prazo. A disponibilidade limitada de dados de durabilidade de longo prazo e os desafios para atender às normas regulatórias atualmente impedem a aceitação mais ampla da tecnologia de geopolímeros (Singh, 2015).

Os geopolímeros destacam-se como materiais sustentáveis na construção civil, substituindo o cimento Portland por resíduos industriais (ex.: cinzas volantes, escórias) e reduzindo de 22% a 72% nas emissões de CO_2 (Saeed *et al.*, 2022; Samal, Blanco, 2021). A incorporação de fibras de reforço (vidro, basalto) nessas matrizes geopoliméricas resulta em

compósitos (FRGCs) com alta resistência à tração (>10 MPa) e flexão (>15 MPa), adequados para aplicações estruturais em ambientes agressivos (Samal; Blanco, 2021).

Em 2014, de acordo com a pesquisa de Glasby *et al.* (2015), foi implementado o uso do concreto geopolimérico na construção de pavimentos de alta resistência nas áreas de manobra e pátio de aeronaves no Aeroporto de Brisbane West Wellcamp (BWWA), conforme ilustrado nas Figura 4. Posteriormente, o aeroporto teve seu nome alterado para Toowoomba Wellcamp, destacando-se como um marco pioneiro, sendo o primeiro aeroporto público da Austrália e o maior projeto contemporâneo de concreto geopolimérico em escala global até aquela data.

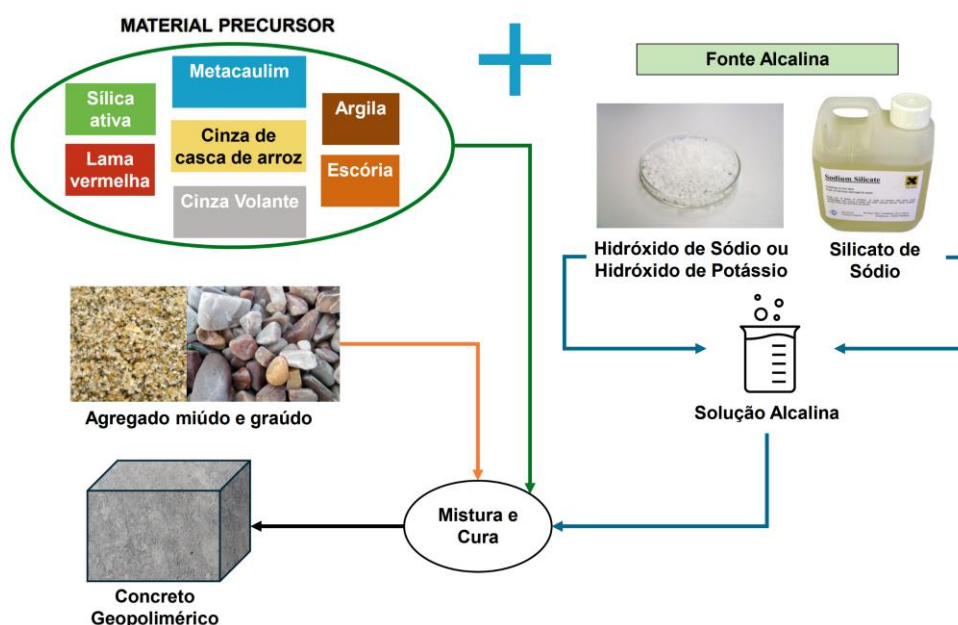
Figura 4 - Planta do local e fotografia aérea do pavimento de concreto geopolimérico do aeroporto de Toowoomba.



Fonte: Glasby *et al.* (2015).

O concreto geopolimérico pode ser empregado em estruturas de edifícios, tubos de esgoto, dormentes de ferrovias, pavimentos rodoviários, cerâmicas e outros produtos de construção (Srividya *et al.*, 2022). O concreto geopolimérico consiste na mistura de um material aluminossilicato, agregados e uma solução ativadora alcalina. Diversos subprodutos e precursores naturais têm sido empregados na produção deste compósito, resultando em propriedades mecânicas satisfatórias. O processo de fabricação do concreto geopolimérico é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Produção de concreto geopolimérico.



Fonte: Autor (2025).

Além dos avanços já consolidados, a pesquisa e o desenvolvimento de novos concretos geopoliméricos seguem ampliando suas possibilidades de aplicação. Investigações recentes têm focalizado a incorporação de fibras naturais, como sisal e juta, bem como a introdução de nanomateriais, a exemplo da nano-sílica e dos nanotubos de carbono, com o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas, térmicas e de durabilidade desses compósitos geopoliméricos (Ahmadi *et al.*, 2022; Ashour *et al.*, 2020). Tais inovações não apenas expandem o potencial de uso desses materiais em ambientes agressivos e obras de engenharia de alta exigência, mas também reforçam o compromisso com a sustentabilidade ao promover a utilização de recursos renováveis e tecnologias inovadoras.

A versatilidade dos compósitos geopoliméricos estende-se à restauração do patrimônio cultural, onde sua compatibilidade química com materiais tradicionais, como argamassas históricas, preserva integridade estética e funcional (Ricciotti *et al.*, 2017). Paralelamente, inovações como compósitos geopoliméricos emborrachados incorporam resíduos de pneus usados, combinando sustentabilidade e melhorias termoacústicas, enquanto mitigam desafios de gestão de resíduos (Luhar; Luhar, 2021). Esses avanços posicionam os geopolímeros como alternativas tecnicamente viáveis para demandas contemporâneas de engenharia e preservação histórica, atendendo critérios de desempenho mecânico, durabilidade e responsabilidade ambiental.

2.3 RAZÕES MOLARES

A otimização das razões molares em geopolímeros é fundamental para ajustar propriedades mecânicas, microestrutura e estabilidade térmica. Estudos demonstram que a relação entre as razões molares de óxidos ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) e elementares (Si/Al , Na/Al) varia conforme a composição dos precursores. Em sistemas com múltiplos materiais, como metacaulim e cinza de casca de arroz, a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ corresponde à soma das contribuições individuais de cada precursor, diferindo da relação elementar Si/Al em casos de impurezas ou combinações complexas (Juengsuwattananon *et al.*, 2019).

A razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ exerce influência crítica na resistência à compressão e na homogeneidade da matriz. Valores entre 3,5-4,0 (equivalente a uma razão atômica Si/Al de aproximadamente 1,75-2,0) maximizam a resistência mecânica - atingindo até 21,3 MPa - e promovem a estabilidade térmica, resultando em microestruturas densas e redução de fissuras sob altas temperaturas (Lahoti *et al.*, 2017). Em sistemas geopoliméricos feitos com metacaulim e cinza de casca de arroz, uma razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ próxima de 4,0 é ideal, resultando em alta resistência à compressão, acima de 50 MPa após 28 dias de cura a 30 °C. Com essa mesma razão, a resistência pode chegar a cerca de 60 MPa, aumentando gradualmente até 90 dias. Por outro lado, razões acima de 4,0 levam à formação de compostos indesejados e materiais não reagidos, obtendo resistência à compressão axial de 6 MPa, devido à presença de fases que não contribuem para a ligação da matriz (Juengsuwattananon *et al.*, 2019). Em outro estudo, Chen *et al.* (2018) constataram que adições de 0,4-0,8% em massa de poliácido de sódio (PAAS) melhoram significativamente a resistência à compressão, à flexão e a tenacidade em razões $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 2,5$; entretanto, para razões superiores a 3,0, as propriedades mecânicas declinam devido à redução na polimerização de SiO_4 e à formação de ligações Si-O-C.

Ademais, Ali, Al-Attar e Abbas (2022) demonstraram, por meio de um modelo estatístico, que a razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ desempenha papel crucial no desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto geopolimérico, identificando uma faixa ótima entre 2,0 e 3,6. Dentro desse intervalo, as reações de polimerização são favorecidas, originando estruturas estáveis de sialatos que melhoram a integridade estrutural do material. Em contrapartida, razões inferiores a 2,0 ou superiores a 3,6 comprometem as interações químicas necessárias, resultando em redes geopoliméricas menos eficazes e, conseqüentemente, em um desempenho mecânico inferior. Dessa forma, a seleção criteriosa da razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ é vital para a formulação de concretos sustentáveis com desempenho e durabilidade aprimorados.

A razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ também é determinante, com faixas ideais entre 0,60–1,20. Valores próximos a 0,73–0,83 favorecem a dissolução eficiente de precursores e a formação de gel do tipo aluminossilicato coeso (Abadel *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021). Ademais, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,0$ é crítico para evitar excesso de álcali em sistemas com cinza de casca de arroz (Juengsuwattananon *et al.*, 2019). Já a razão $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ deve ser mantida abaixo de 12 para minimizar porosidade e garantir integridade estrutural (Abadel *et al.*, 2021).

A adição de sílica ativa ajusta a razão Si/Al , porém requer calibração precisa para evitar dessincronização na dissolução de precursores (Park *et al.*, 2022). Além disso, a alcalinidade da solução é sensível a variações nas razões molares, com alto valor de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ reduzindo a resistência devido à formação de fases menos estáveis (Han *et al.*, 2023). A ativação alcalina desempenha papel crucial na dissolução e hidrólise, facilitando redes geopoliméricas densas. Técnicas como difração de Raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelaram que a cura prolongada (até 90 dias) aprimora a resistência, correlacionando-se com microestruturas mais homogêneas e redução de poros (Juengsuwattananon *et al.*, 2019).

Em síntese, a otimização conjunta das razões molares ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 3,5\text{--}4,0$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 1,0$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 12$) é essencial para desenvolver geopolímeros de alto desempenho. O controle rigoroso desses parâmetros, aliado à seleção de precursores, ativadores e métodos de cura, viabiliza aplicações em condições ambientais adversas, reforçando o potencial desses materiais na construção sustentável.

2.4 ATIVADORES

A escolha e a dosagem de ativadores alcalinos são determinantes para as propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura de geopolímeros. Esses ativadores, como hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) e silicatos solúveis, promovem a dissolução de precursores aluminossilicáticos (ex.: metacaulim, cinzas volantes) e a subsequente policondensação, formando redes tridimensionais responsáveis pela resistência do material (Błaszczyszki; Król, 2017; Petermann; Saeed; Hammons, 2010). A concentração e a combinação desses ativadores influenciam diretamente a reatividade química, a viscosidade da solução e a formação de fases cristalinas ou amorfas, aspectos críticos para aplicações estruturais (Ivanović *et al.*, 2021; Shilar *et al.*, 2022).

A natureza do ativador impacta significativamente no desempenho do geopolímero. Em sistemas à base de metacaulim, ativadores sódicos elevam a resistência com o aumento da razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e redução da relação água/sólidos, enquanto ativadores potássicos exigem

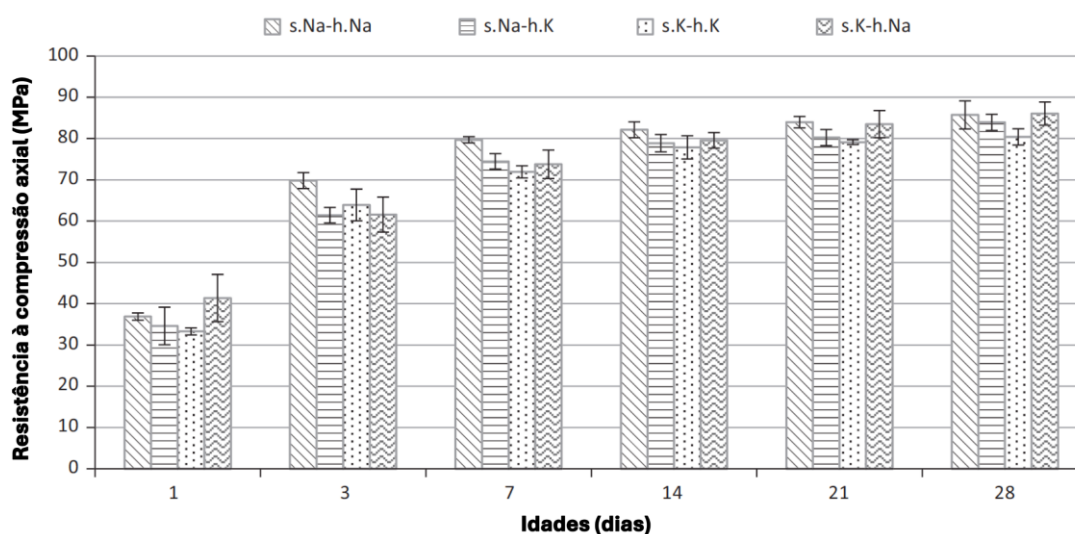
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 2,5$ para maximizar a resistência (Arce *et al.*, 2020). NaOH, com íons sódio de menor raio iônico, facilita a migração durante a geopolimerização, favorecendo maior cristalinidade e resistência a ataques químicos (ex.: sulfatos). Por outro lado, KOH, com maior basicidade, induz redes mais densas e porosidade reduzida, melhorando a resistência mecânica inicial (Petermann; Saeed; Hammons, 2010; Rocha *et al.*, 2018). Contudo, concentrações elevadas (>10 M) de ambos podem aumentar a fragilidade ou lixiviação iônica, exigindo otimização (Błaszczyski; Król, 2017).

A combinação de ativadores, como NaOH com silicato de sódio (waterglass), melhora a coesão da matriz geopolimérica devido à formação de ligações Si-O-Al mais estáveis, elevando a resistência à compressão (>40 MPa) e flexão (>8 MPa) (Petermann; Saeed; Hammons, 2010). Além disso, a razão ativador/ligante (A/B) deve ser balanceada: valores próximos a 0,40 maximizam a dissolução de precursores, com boa resistência mecânica e sem comprometer a trabalhabilidade, resultando em redes aluminossilicáticas robustas (Shilar *et al.*, 2022).

Parâmetros termodinâmicos, como viscosidade e densidade da solução ativadora, também são críticos. Soluções muito viscosas dificultam a homogeneização, enquanto densidades inadequadas limitam a penetração em partículas de resíduos, afetando a microestrutura final (Ivanović *et al.*, 2021). Em argamassas geopoliméricas, ativadores potássicos produzem microestruturas mais homogêneas, com menor porosidade e maior estabilidade térmica (Rocha *et al.*, 2018).

No estudo conduzido por Silva Rocha *et al.* (2018), que compararam diferentes ativadores alcalinos, incluindo silicato de sódio (Na_2SiO_3), silicato de potássio (K_2SiO_3), hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) em argamassas geopoliméricas à base de metacaulim, todas as formulações alcançaram resistências à compressão superiores a 70 MPa aos 7 dias e 80 MPa aos 28 dias conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Relação entre a resistência à compressão e a idade das argamassas geopoliméricas à base de metacaulim em diferentes combinações de ativadores alcalinos.



Fonte: Rocha *et al.* (2018).

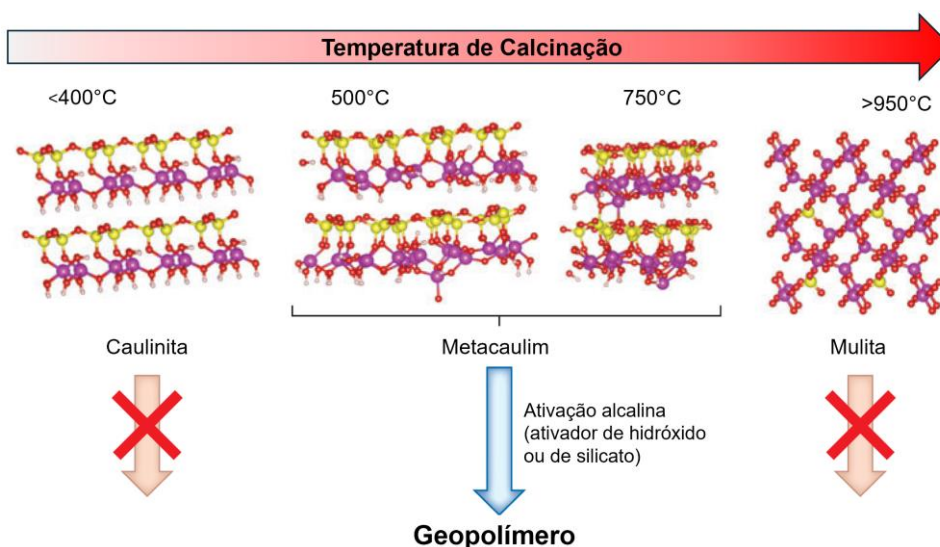
O gráfico evidencia que a resistência à compressão axial das argamassas geopoliméricas à base de metacaulim aumenta significativamente com a idade, alcançando valores superiores a 80 MPa aos 28 dias, evidenciando rápido ganho de resistência característico desses materiais. Além disso, os módulos de elasticidade obtidos variam conforme a homogeneidade da matriz, sendo maiores nos sistemas ativados com silicato de potássio, que promovem uma microestrutura mais densa e homogênea, resultando em melhor desempenho mecânico e maior rigidez do material (Rocha *et al.*, 2018).

2.5 MATERIAIS PRECURSORES

2.5.1 Metacaulim

O metacaulim, derivado da calcinação de argilas caulínicas, tem sido amplamente estudado devido às suas excepcionais propriedades pozolânicas e ao potencial de aplicação em geopolímeros. A obtenção de um metacaulim altamente reativo depende criticamente do processo de calcinação, cuja temperatura e duração são determinantes para preservar sua estrutura amorfa, essencial para a reatividade em meio alcalino. Segundo Rashad (2013), a calcinação ideal ocorre entre 600–850°C por aproximadamente 12 horas. Ademais, Provis e Bernal (2014) demonstram que tratamentos térmicos entre 500 e 800°C (Figura 7) evitam a recristalização em mullita, uma fase cristalina de menor reatividade.

Figura 7 - Conversão de caulinita em produtos de acordo com a temperatura de calcinação.



Fonte: Provis e Bernal (2014).

A qualidade do metacaulim é, ainda, influenciada pela origem geográfica da argila e pelos métodos de produção. Estudos apontam que variações na composição mineralógica - como impurezas e a presença de fases cristalinas - impactam diretamente sua reatividade. Ademais, o estudo de Cao *et al.* (2022) indica que processos de calcinação baseados em carvão podem introduzir impurezas, como coríndon e quartzo, que comprometem a atividade pozolânica, reforçando a importância de protocolos otimizados para alcançar um produto de elevada reatividade.

Na síntese de geopolímeros, o metacaulim destaca-se como precursor-chave, dada a sua alta concentração de Al_2O_3 e SiO_2 , elementos fundamentais para a formação da matriz aluminossilicática. Sua estrutura amorfa favorece a dissolução em meio alcalino, promovendo a policondensação e originando geopolímeros com propriedades mecânicas superiores (Provis; Bernal, 2014). Além disso, a aplicação de metacaulim em cimentos ativados alcalinamente oferece uma alternativa sustentável ao cimento Portland, contribuindo para a redução das emissões de CO_2 (Rakhimova; Rakhimov, 2019).

Em síntese, a utilização do metacaulim em geopolímeros depende da otimização de diversos parâmetros, como a origem da matéria-prima, os protocolos de calcinação e as condições de ativação alcalina. O ajuste desses fatores é fundamental para maximizar a reatividade do metacaulim e, conseqüentemente, aprimorar o desempenho dos geopolímeros, promovendo avanços em práticas construtivas sustentáveis e alinhadas aos princípios da economia circular.

2.5.2 Pó de vidro

Conforme descrito por Zanotto e Mauro (2017), o vidro é um material em estado fora do equilíbrio termodinâmico, caracterizado por sua estrutura amorfa e pela presença de uma transição vítrea. Denominado como *frozen liquid*, o vidro mantém a organização atômica de um líquido resfriado abaixo de uma temperatura crítica sem cristalizar. Suas propriedades são influenciadas não apenas pela composição química, temperatura e pressão, mas também pelo histórico térmico e mecânico ao qual foi submetido (Zanotto; Mauro, 2017).

A composição química do vidro varia conforme as matérias-primas utilizadas, apresentando particularidades para cada tipo. Estima-se que existam aproximadamente 380 mil tipos de vidro no mundo (Interglad, 2019). O vidro soda-cal, também conhecido como vidro comercial, constitui o tipo mais comum de vidro produzido industrialmente, sendo economicamente viável e amplamente reciclável, características que o tornam predominante na fabricação de embalagens e garrafas. Sua composição típica inclui 70–75% em peso de SiO₂, 12–16% de Na₂O e 10–15% de CaO (Bauccio, 1994; Pfaender, 1996 *apud* Hasanuzzaman *et al.*, 2016).

Em 2022, a indústria vidreira brasileira produziu, aproximadamente, 56 milhões de metros quadrados de vidros processados, gerando um faturamento em torno de R\$ 6,7 bilhões (ABRAVIDRO, 2023). Este setor contribui significativamente para a produção anual de materiais, resultando em uma considerável quantidade de resíduos de vidro. A destinação adequada desses resíduos, especialmente as embalagens de vidro, representa um desafio considerável para a sociedade brasileira.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (Snis, 2021), em 2020, foram recuperadas 99,9 mil toneladas de vidro por meio de coleta seletiva, representando 12,6% de todos os resíduos coletados entre os 1.199 municípios registrados no banco de dados. Além disso, a Portaria nº 27/96 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) estabelece que os cacos de embalagens de vidro para alimentos podem ser reciclados sem restrições para a fabricação de novas embalagens. No entanto, apesar dessas diretrizes, estima-se que apenas 45% da matéria-prima utilizada na produção de embalagens de vidro seja proveniente da reciclagem na forma de cacos (Abrabe, 2020; Cempre, 2020).

A incorporação de pó de vidro (PV) em geopolímeros à base de metacaulim (MC) destaca-se como alternativa sustentável para aprimorar propriedades mecânicas, reológicas e de durabilidade. O processo de geopolimerização, que envolve a reação de precursores

aluminosilicáticos com ativadores alcalinos, é influenciado pela adição de PV, que modifica a razão Si/Al, determinante para as características do material (Dadsetan *et al.*, 2020).

Estudos indicam que substituições de até 25% de metacaulim por pó de vidro mantêm propriedades reológicas e elevam o desempenho mecânico, com teores ideais variando conforme o objetivo (Dadsetan *et al.*, 2020). O estudo de Si *et al.* (2020), avaliou que a substituição de 5% de metacaulim por pó de vidro otimiza a resistência à compressão por meio do aprimoramento da formação de gel N-A-S-H. Teores de 10% a 20% de pó de vidro incrementam o módulo de elasticidade pela maior densificação da matriz, embora substituições superiores a 10% possam resultar em fases não reagidas devido à limitada participação do pó de vidro nas reações geopoliméricas. Adicionalmente, o pó de vidro prolonga o tempo de pega e melhora a trabalhabilidade, características vantajosas para aplicações que requerem períodos de manuseio estendidos (Si *et al.*, 2020).

Segundo Liang *et al.* (2021), as análises por MEV revelam que a incorporação de pó de vidro resulta em uma microestrutura com melhor arranjo local das partículas, apresentando preenchimento eficiente de alguns espaços interparticulares. Entretanto, os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio indicam que, embora ocorra leve elevação na porosidade total, as frações de poros de tamanhos críticos para permeabilidade mantêm-se praticamente constantes, sugerindo que a conectividade dos poros e, conseqüentemente, a permeabilidade do material sofrem apenas alterações marginais. Sob a perspectiva ambiental, o uso de pó de vidro alinha-se à economia circular, reduzindo resíduos industriais e emissões de CO₂. Sua combinação com metacaulim e cinzas volantes viabiliza materiais com desempenho comparável ou superior a formulações convencionais (Dadsetan *et al.*, 2020; Liang *et al.*, 2021).

No estudo de Alvarenga *et al.* (2022), a substituição de 12,5% de metacaulim por micropartículas de vidro impactou favoravelmente o desempenho mecânico dos compósitos, particularmente após 28 dias, com aumentos na resistência mecânica observados tanto em condições de cura térmica a 40 °C quanto em temperatura ambiente. Já no estudo de Safarzadeh, Bilondi e Zaresefat (2024), a utilização de quantidades menores de metacaulim e maiores quantidades de pó de vidro, especificamente uma proporção de 90% de pó de vidro para 10% de metacaulim, foi considerada mais eficaz para atingir valores de resistência mais altos em 28 dias, indicando um potencial para maiores porcentagens de reposição dependendo da aplicação e das propriedades desejadas. Tais estudos sugerem que a substituição do metacaulim por pó de vidro podem melhorar as propriedades mecânicas, mas também contribui para a

ecoeficiência do material, tornando-o uma opção viável para materiais alternativos de construção sustentáveis.

2.5.3 Alumina

Alumina, ou óxido de alumínio (Al_2O_3), é um material cerâmico versátil amplamente reconhecido por excepcionais propriedades mecânicas e físicas, incluindo alta resistência, estabilidade térmica e resistência química. Comumente utilizada em aplicações de engenharia, a alumina existe em vários graus com níveis de pureza variando de 80% a mais de 99%, permitindo características de desempenho personalizadas. Sua capacidade de suportar temperaturas extremas e excelente isolamento elétrico que a torna ideal para uso em diversas áreas, como eletrônica, aeronáutica e engenharia estrutural (Auerkari, 1996).

A incorporação de alumina em geopolímeros à base de metacaulim demonstra efeitos significativos nas propriedades mecânicas, dependendo de sua granulometria e dosagem, uma vez que regula a razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, influenciando na reatividade e na formação da matriz geopolimérica. O estudo de Zidi *et al.* (2019) com adição de nano-alumina em teores de 1%, 2% e 3% (em massa), revelou que a concentração de 2% foi a mais eficaz, elevando a resistência à compressão de 30 MPa para 39 MPa, além de reduzir a porosidade e melhorar a estabilidade térmica, conforme análises termogravimétricas. De maneira semelhante, Kouamo *et al.* (2012) demonstraram que a inclusão de alumina como material suplementar em proporções otimizadas, como 20% para metacaulim e até 40% para cinzas vulcânicas, resulta em aumentos significativos na resistência à compressão, atingindo 18,1% e 32,4%, respectivamente.

Além da dosagem, a granulometria da alumina também desempenha um papel crítico na melhoria das propriedades mecânicas dos geopolímeros. Costa *et al.* (2015) evidenciaram que partículas finas (0,6 μm) em teor de 7% aumentaram a resistência à flexão em 77% (de 4,4 MPa para 7,8 MPa), superando partículas grossas (4,8 μm), que apresentaram um incremento de apenas 36% na mesma dosagem. No entanto, concentrações mais elevadas (por exemplo, 14%) resultaram em ganhos menores (entre 9% e 52%), sugerindo que a eficiência depende não apenas do tamanho das partículas, mas também da dosagem utilizada.

Esse comportamento está associado ao mecanismo de dissolução das partículas, no qual granulometrias mais finas favorecem a disponibilidade de Al^{3+} para reações de policondensação, promovendo interfaces carga-matriz mais homogêneas e reduzindo a porosidade, conforme explicado por Buth (2019). Essa dinâmica microestrutural explica por que teores entre 7% e 20% de alumina podem elevar a resistência mecânica em até 85%, com destaque para composições

contendo 20% de Al_2O_3 e 7,5% de NaOH, que atingiram 81,5 MPa na resistência à compressão. Portanto, a otimização da granulometria e da dosagem da alumina é essencial para maximizar o desempenho dos geopolímeros, equilibrando a disponibilidade de aluminato, a densificação microestrutural e a resistência mecânica da matriz.

2.6 COMPÓSITOS ÁLCALI-ATIVADOS REFORÇADOS COM FIBRAS

A incorporação de fibras em matrizes álcali-ativadas (MAA) e em geopolímeros visa aprimorar a resistência a esforços de tração e flexão, assim como ocorre em materiais à base de cimento Portland. Essas fibras aumentam a resistência à fratura, a ductilidade e reduzem a propagação de fissuras, impactando positivamente a durabilidade do compósito (Bernal *et al.*, 2014). Estudos demonstram que diferentes tipos de fibras — como as de basalto, PVA e metálicas — elevam a resistência mecânica (compressão, flexão e tração) conforme seu teor aumenta, embora possam reduzir a trabalhabilidade e aumentar a absorção de água (Shah *et al.*, 2020).

A escolha das fibras (Figura 8) é crucial: naturais ou sintéticas, contínuas ou curtas, influenciam propriedades como anisotropia e processamento. Desde os anos 1990, pesquisas categorizam o reforço em MAA em dois grupos: materiais com malhas (tecidos bidirecionais), que exigem técnicas específicas e exibem propriedades anisotrópicas; e materiais com fibras curtas descontínuas, distribuídas aleatoriamente na matriz (Sakulich, 2011).

Figura 8 - Aparência de fibras típicas usadas para reforçar compósitos MAA. FA = Fibra de aço.

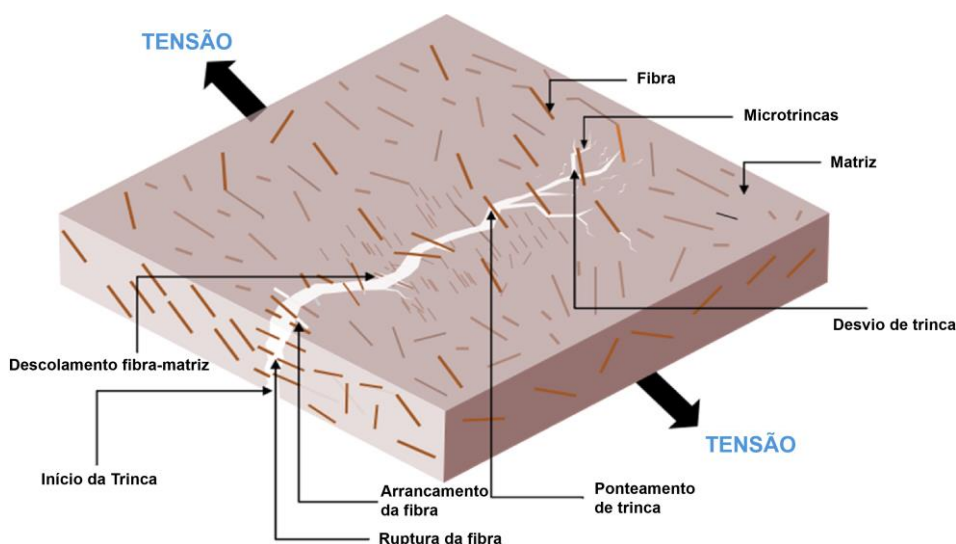


Fonte: Amran *et al.* (2022).

A revisão realizada por Amran *et al.* (2022) destaca o potencial promissor do concreto álcali-ativado reforçado com fibras (FR-AAC) como uma alternativa sustentável ao cimento Portland na construção moderna. A incorporação de fibras nos materiais álcali-ativados melhora significativamente suas propriedades mecânicas, mitigando desafios como a baixa resistência à tração e a fragilidade inerentes aos AACs. O estudo enfatiza que a adição de fibras — tanto naturais quanto sintéticas — aprimora a resistência à tração e à flexão, além de aumentar a ductilidade e a tenacidade do concreto, reduzindo a fissuração e melhorando o desempenho estrutural. A versatilidade dos compósitos reforçados com fibras viabiliza aplicações inovadoras e promovem práticas construtivas mais sustentáveis, com o uso de resíduos e fibras naturais como agentes de reforço (Amran *et al.*, 2022).

O mecanismo do ponteamto de fissuras pelas fibras desempenha um papel fundamental na melhoria do desempenho mecânico dos compósitos geopoliméricos reforçados, impedindo a propagação de fissuras e aumentando a tenacidade. Esse efeito ocorre quando as fibras incorporadas atravessam as fissuras, distribuindo a tensão e dissipando energia ao longo de seu comprimento, o que reduz a progressão dos danos. A Figura 9 demonstra a relação entre o teor de fibras e a resistência à flexão desses compósitos, evidenciando que um maior volume de fibras, especialmente as de aço, resulta em um aumento significativo na resistência à flexão.

Figura 9 - Diagrama ilustrando o fenômeno do ponteamto de fissuras por fibras em compósito geopolimérico.



Fonte: Adaptado de Farhan, Johari e Demirboğa (2021).

Isso se deve à elevada resistência à tração e rigidez dessas fibras, que promovem uma transferência de carga mais eficiente entre as fissuras, aprimorando o comportamento mecânico do material sob tensão. Assim, a escolha adequada do tipo e da quantidade de fibras é essencial

para otimizar a durabilidade e a integridade estrutural dos compósitos geopoliméricos (Farhan; Johari; Demirboğa, 2021).

2.7 PESQUISAS DE COMPÓSITOS ÁLCALI-ATIVADOS REFORÇADOS COM FIBRAS METÁLICAS

Para investigar o estado da arte sobre compósitos álcali-ativados reforçados com fibras metálicas, foi realizada uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS). Este estudo é guiado pela seguinte pergunta de pesquisa: *Como os geopolímeros à base de metacaulim reforçados com fibras de aço estão sendo desenvolvidos e qual é o seu comportamento mecânico?* Para responder a essa questão, foram selecionadas as bases de dados Web of Science e Scopus.

A revisão sistemática teve como objetivo identificar artigos da literatura científica internacional que abordassem geopolímeros à base de metacaulim reforçados com fibras de aço, bem como a avaliação do seu comportamento mecânico. No dia 12 de fevereiro de 2025, foi realizada uma busca nas bases de dados *Web of Science* (WoS) e Scopus, abrangendo artigos publicados a partir de 2005, utilizando as seguintes *strings* de busca:

- Web of Science: “(fiber-reinforced* OR fiber* OR fibre*) AND (alkali-activated* OR geopolymer*) AND (steel*) AND (metakaolin*)”
- Scopus: “TITLE-ABS-KEY ("fiber-reinforced*" OR "fiber*" OR "fibre*") AND TITLE-ABS-KEY ("alkali-activated*" OR "geopolymer*") AND TITLE-ABS-KEY ("steel*") AND TITLE-ABS-KEY ("metakaolin*") AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR >= 2005”.

Os operadores booleanos foram utilizados para refinar as buscas em bases de dados. Vale destacar que o operador "AND" requer que ambos os termos separados por ele estejam presentes no título, resumo ou palavras-chave do artigo, enquanto o operador "OR" exige que pelo menos um dos termos apareça nesses campos. O caractere "*" foi utilizado para localizar termos dentro de substantivos compostos, como em "*metakaolin-based*" (geopolímeros à base de metacaulim) e a sigla “ar” na base Scopus filtra a busca por artigos. Além disso, devido ao baixo número de artigos ao incluir termos como "vidro" ou "pó de vidro" nas *strings*, decidiu-se não os utilizar inicialmente, mas foram considerados em uma etapa posterior nos filtros de inclusão.

Os documentos obtidos em ambas as buscas foram exportados em arquivos com extensão “.bib”, gerando um arquivo separado para cada base de dados. Posteriormente, esses arquivos foram importados para o R Studio e combinados, com a remoção de duplicatas

realizada por meio da função *mergeDbSources* do pacote *Bibliometrix* no R (Aria; Cuccurullo, 2017). Em seguida, a função *biblioshiny*, também do mesmo pacote, foi utilizada para a condução das análises bibliométricas.

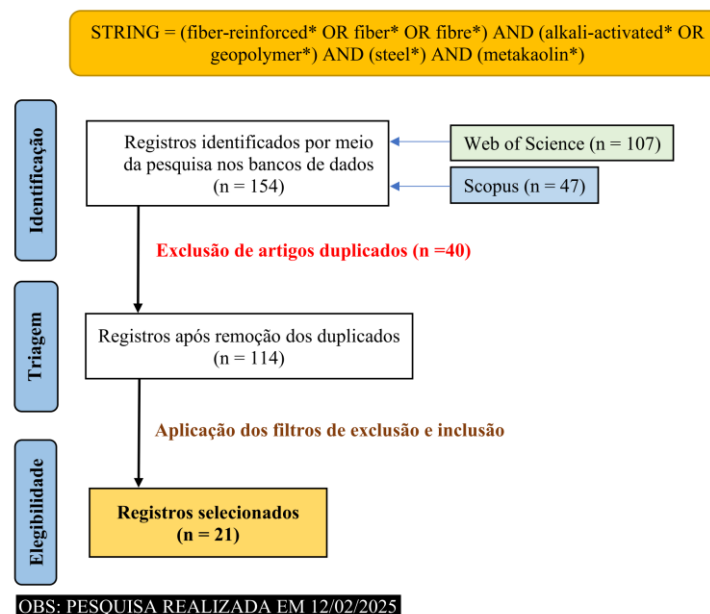
2.7.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Inicialmente, a busca resultou em 107 artigos na base Web of Science e 47 na Scopus. Destes, 40 eram duplicados, resultando em um total de 114 artigos distintos. Em seguida, os artigos foram submetidos a uma triagem, aplicando-se filtros de inclusão e exclusão (Tabela 1), seguida pela leitura completa dos artigos. Após esse processo, 93 artigos foram descartados, sendo selecionados somente os artigos que tratavam de geopolímero reforçado com fibra metálica. Dessa forma, foi elaborado o diagrama PRISMA referente à string de busca utilizada em 12 de fevereiro de 2025, com apenas 21 artigos selecionados, como demonstrado na Figura 10.

Tabela 1 - Critérios de inclusão e exclusão.

Critério de ...	Descrição
Inclusão	Trabalho com título, resumo e/ou palavras-chave contendo termos como: "Fibra metálica", "Metacaulim" ou "Pó de vidro"
Exclusão	Artigos duplicados
Exclusão	Ausência de reforço com fibras metálicas
Exclusão	Estudo com outros tipos de materiais compósitos
Exclusão	Trabalho indisponível, com acesso possível somente por meio da compra do texto;

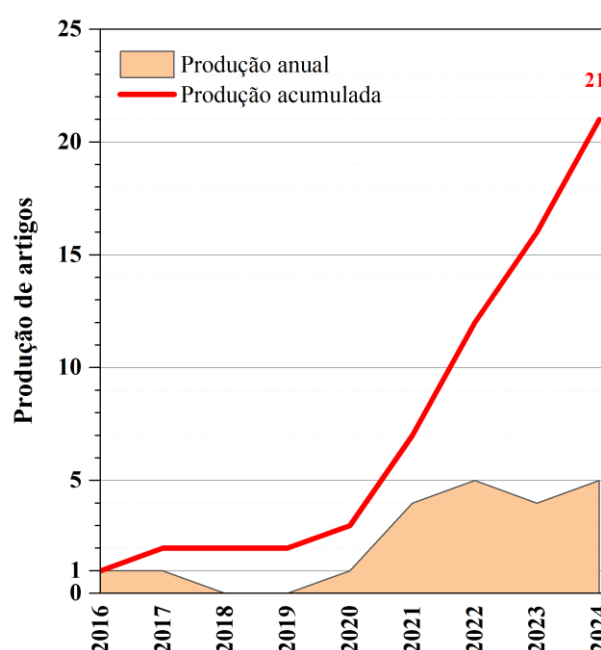
Figura 10 - Diagrama PRISMA sobre a *string* utilizada.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 11 exibe a produção anual e acumulada de artigos sobre o tema investigado. Dos 21 estudos analisados, 19 (90,5%) foram publicados entre 2020 e 2024, indicando intensificação recente na pesquisa. O período de 2016 a 2019 registrou apenas dois artigos (um em 2016 e outro em 2017), seguido por estagnação até 2019. A partir de 2020, a produção cresceu continuamente, com a acumulação passando de três artigos em 2020 para 21 em 2024. Os anos de 2021 (quatro artigos), 2022 (cinco artigos) e 2024 (cinco artigos) destacaram-se como os mais produtivos.

Figura 11 - Produção acumulada e anual dos artigos sobre geopolímero à base de metacaulim reforçados com fibra metálica.



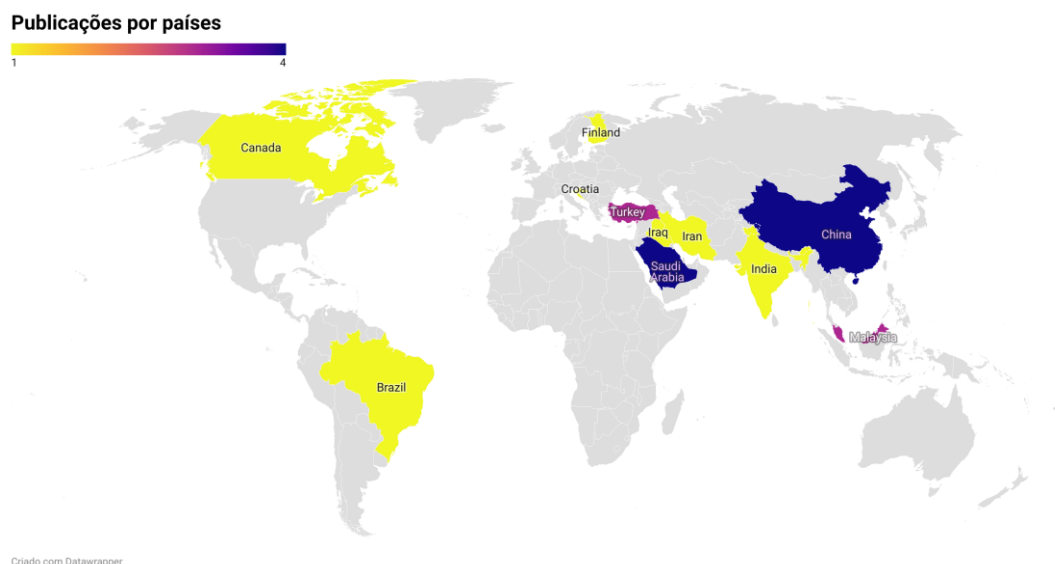
Fonte: Autor (2025).

A análise bibliométrica do período (2016-2024) identificou 21 documentos publicados em 16 fontes, com taxa de crescimento anual de 22,28%. As publicações apresentam idade média de 3,14 anos e média de 18,67 citações por artigo, sugerindo impacto moderado na área. Foram mapeadas 84 palavras-chave definidas pelos autores e 69 palavras-chave complementares (*Keywords Plus*), o que denota amplitude temática. A colaboração científica é expressiva, com média de 4,67 coautores por documento e 38,1% das publicações incluindo parcerias internacionais. Predominam artigos científicos (85,7%), seguidos por trabalhos em anais de eventos (14,3%), reforçando a centralidade de periódicos como veículo prioritário para divulgação acadêmica.

A Figura 12 apresenta a distribuição dos países dos autores sobre geopolímero à base de metacaulim reforçados com fibra metálica, levando em conta o país de origem do autor

correspondente. Nota-se que os países com maior número de publicações é a Arábia Saudita e China, com 4 artigos. Ela é seguida pela Turquia e Malásia, ambas com 3 artigos. No Brasil, apenas 1 trabalho foi encontrado pela metodologia de busca descrita anteriormente.

Figura 12 - Distribuição de publicações de artigos por países sobre geopolímero à base de metacaulim reforçados com fibra metálica.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 2 destaca os periódicos com maior produção de manuscritos sobre geopolímeros à base de metacaulim reforçados com fibra metálica e a Tabela 3 os artigos mais citados. *Construction and Building Materials* e *Materials Today-Proceedings* lideram com três artigos cada, seguidos por *Structures* com dois artigos. As demais revistas — *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, *Arabian Journal for Science and Engineering*, *Engineering Structures*, *Journal of Building Engineering*, *Journal of Composites Science, Materials, Materials and Structures*, *Reviews On Advanced Materials Science*, *Revue Des Composites et des Materiaux Avances*, *Journal of Composite and Advanced Materials*, *Science and Engineering of Composite Materials*, *Sustainability*, *Tikrit Journal of Engineering Sciences* e *Waste And Biomass Valorization* — registram um artigo cada. Portanto, no total são 16 periódicos com contribuições pontuais.

Tabela 2 - Revistas com maior número de trabalhos sobre geopolímero à base de metacaulim reforçados com fibra metálica (Autores).

Revista	Trabalhos publicados
<i>Construction and Building Materials</i>	3
<i>Materials Today Proceedings</i>	3
<i>Structures</i>	2

Fonte: Autor (2025).

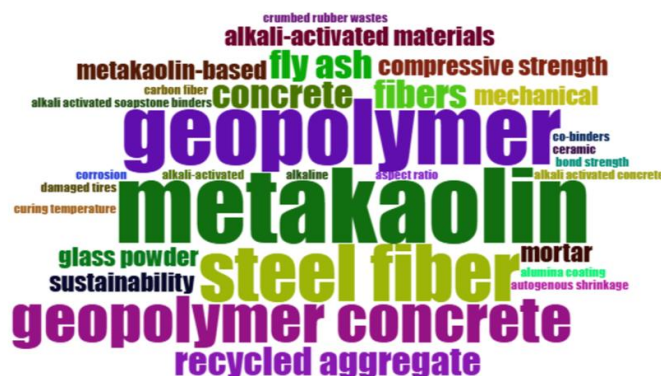
Tabela 3 - Lista dos 10 artigos mais citados encontrados com o protocolo de busca (Autores).

AUTORES E ANO	TÍTULO DO TRABALHO	CITAÇÕES
Bashar <i>et al.</i> (2016)	<i>Engineering Properties and Fracture Behaviour of High Volume Palm Oil Fuel Ash-Based Fibre-Reinforced Geopolymer Concrete</i>	90
Zhang <i>et al.</i> (2021)	<i>Mechanical and Fracture Properties of Steel Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete</i>	65
Albidah <i>et al.</i> (2020)	<i>Bond Performance of GFRP and Steel Rebars Embedded in Metakaolin-Based Geopolymer Concrete</i>	45
Riahi <i>et al.</i> (2021)	<i>Investigation of Interfacial and Mechanical Properties of Alumina-Coated Steel Fiber-Reinforced Geopolymer Composites</i>	32
Xu <i>et al.</i> (2021)	<i>Experimental Study on Mechanical Properties and Microstructures of Steel Fiber-Reinforced Fly Ash-Metakaolin Geopolymer-Recycled Concrete</i>	21
Nazir, Canpolat e Uysal (2023)	<i>Durability properties of steel, polyamide, and polyethylene fiber-reinforced geopolymer mortar made with recycled concrete aggregate and glass powder as fillers</i>	19
Nazir <i>et al.</i> (2023)	<i>Engineering Properties of Different Fiber-Reinforced Metakaolin-Red Mud-Based Geopolymer Mortars</i>	19
Sathish Kumar, Ganesan e Indira (2021)	<i>Engineering Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Ternary Blend Geopolymer Concrete</i>	16
Alsaif e Albidah (2020)	<i>Compressive and Flexural Characteristics of Geopolymer Rubberized Concrete Reinforced with Recycled Tires Steel Fibers</i>	15
Onuaguluchi <i>et al.</i> (2017)	<i>Performance of Scrap Tire Steel Fibers in OPC and Alkali-Activated Mortars</i>	15

Fonte: Autor (2025).

A Figura 13 exibe uma nuvem de palavras gerada a partir da frequência das palavras-chave dos artigos analisados. Observa-se predominância dos termos "metakaolin" (8 ocorrências), "geopolymer" (7) e "steel fiber" (6), refletindo o foco central em composições de geopolímeros à base de metacaulim reforçados com fibras metálicas. Destacam-se ainda "geopolymer concrete" (5), "concrete" (3), "fly ash" (cinzas volantes, 3) e "recycled aggregate" (agregado reciclado, 3), indicando dualidade temática entre matrizes geopoliméricas alternativas e incorporação de resíduos.

Figura 13 - Nuvem de palavras considerando as palavras-chaves mais frequentes encontradas nos artigos (Autores).



Fonte: Autor (2025).

Complementam a análise termos como "*glass powder*" (pó de vidro, 2), "*compressive strength*" (resistência à compressão, 2) e "*sustainability*" (sustentabilidade, 2), que associam propriedades mecânicas e aspectos ambientais às pesquisas. Palavras como "*alkali-activated materials*" (materiais álcali-ativados, 2), "*mortar*" (argamassa, 2) e "*mechanical*" (mecânico, 2) reforçam a ênfase em propriedades mecânicas e termos similares a argamassas geopolimérica. A presença de termos específicos, como "*carbon fiber*" (fibra de carbono, 1), "*autogenous shrinkage*" (retração autógena, 1) e "*crumbed rubber wastes*" (resíduos de borracha granulada, 1), sugere diversificação experimental, com investigação de reforços não metálicos e microestrutura da matriz.

2.7.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Com base nos 21 artigos selecionados por meio da revisão sistemática da literatura, utilizando filtros de inclusão e exclusão (Tabela 1), foram elaboradas a Tabela 4, que apresenta os valores das principais propriedades mecânicas, composição e tipo de fibra metálica aos 28 dias, e a Tabela 5, que realiza uma análise comparativa dessas propriedades e dos teores ótimos de fibras em geopolímeros.

Tabela 4 - Dados das principais propriedades mecânicas, composição e tipo de fibra metálica extraídas dos 21 artigos selecionados.

Autores	Materiais utilizados	Tipo de fibra metálica	Teor de Fibras (% em volume ou kg/m³)	Resistência à compressão axial	Resistência à tração na flexão	Resistência à tração por compressão diametral	Módulo de Elasticidade
Bashar <i>et al.</i> (2016)	MP: Cinzas de combustível de óleo de palma (92%) + Metacaulim (8%); AG: Casca de óleo de palma + areia média; SA: Silicato de sódio + Hidróxido de Sódio	(A) fibra reta ($\lambda=65$) (B) fibra reta ($\lambda=80$)	(0) sem adição (A.1) 0,25% (A.2) 0,50% (A.3) 0,75% (B.1) 0,25% (B.2) 0,50% (B.3) 0,75%	28 dias (0) 30 MPa (A.1) 31,4 MPa (A.2) 30,9 MPa (A.3) 31,3 MPa (B.1) 30,0 MPa (B.2) 31,9MPa (B.3) 30,5 MPa	28 dias (0) 4,33 MPa (A.1) 4,69 MPa (A.2) 4,72 MPa (A.3) 4,86 MPa (B.1) 4,65 MPa (B.2) 4,80 MPa (B.3) 5,14 MPa	28 dias (0) 2,22 MPa (A.1) 2,81 MPa (A.2) 2,88 MPa (A.3) 2,93 Mpa (B.1) 2,55 MPa (B.2) 2,89 MPa (B.3) 3,07 MPa	28 dias (0) 6,25 GPa (A.1) 6,56 GPa (A.2) 8,69 GPa (A.3) 8,72 GPa (B.1) 8,68 GPa (B.2) 9,10 GPa (B.3) 10,0 GPa
Onuaguluchi <i>et al.</i> (2017)	MP: Metacaulim Areia natural SA: Silicato de sódio + Hidróxido de Sódio	(A) fibra reciclada oriunda de pneus [l= 10 a 16mm]	(0) sem adição (A.1) 1,00% (A.2) 2,00%	28 dias (0) 61,3 MPa (A.1) 52,1 MPa (A.2) 48,0 Mpa	28 dias (0) 3,99 MPa (A.1) 3,29 MPa (A.2) 3,30 MPa	-	-
Albidah <i>et al.</i> (2020)	MP: Metacaulim; AG: Areia vermelha, areia triturada e agregado graúdo; SA: Silicato de sódio + Hidróxido de sódio	(A) fibra com ancoragem na extremidade (d=0,5mm; l=30 mm; $\lambda=60$)	(0) sem adição (A.1) 60kg/m ³ equivalente a 0,77% em vol.	28 dias (0) 46,9 MPa (A.1) 57,6 MPa	-	28 dias (0) 2,7MPa (A.1) 4,4 MPa	-
Xu <i>et al.</i> (2021)	MP: Metacaulim (50%) + Cinzas Volantes (50%); AG: Areia e RCD (1:2) SA: Silicato de sódio + Hidróxido de sódio	(A) fibra de aço crimpada [sem especificação]	(0) sem adição (A.1) 0,5% (A.2) 1,0% (A.3) 1,5% (A.4) 2,0% (A.5) 2,5%	28 dias (0) 40,07 MPa (A.1) 41,11 MPa (A.2) 42,34 MPa (A.3) 43,42 MPa (A.4) 42,45 MPa (A.5) 47,11 MPa	28 dias (0) 4,84 MPa (A.1) 5,72 MPa (A.2) 6,03 MPa (A.3) 6,53 MPa (A.4) 7,01 MPa (A.5) 7,79 MPa	28 dias (0) 3,12 MPa (A.1) 3,54 MPa (A.2) 3,92 MPa (A.3) 4,41 MPa (A.4) 4,61 MPa (A.5) 5,12 MPa	-

Autores	Materiais utilizados	Tipo de fibra metálica	Teor de Fibras (% em volume ou kg/m³)	Resistência à compressão axial	Resistência à tração na flexão	Resistência à tração por compressão diametral	Módulo de Elasticidade
Riahi <i>et al.</i> (2021)	MP: Metacaulim AG: Areia SA: Silicato de sódio + Hidróxido de sódio	(A) fibra com ancoragem na extremidade revestida com fosfato de zinco [l=30 mm ; d=0,5mm; λ=60]	(0) sem adição (A.1) 0,25% (vol.) (A.2) 0,50% (A.3) 0,75% (A.4) 1,00% (A.5) 1,50%	7 dias (0) 67,5 MPa (A.1) 66,2 MPa (A.2) 69 MPa (A.3) 72 MPa (A.4) 69,5 MPa (A.5) 68,8 MPa	7 dias (0) 13,4 MPa (A.1) 13,25 MPa (A.2) 13,60 MPa (A.3) 14,6 MPa (A.4) 14,8 MPa (A.5) 15,4 MPa	-	-
Sathish Kumar, Ganesan e Indira (2021)	MP: Cinzas volantes (60%), Escória (25%) e Metacaulim (15%); AG: Agregado miúdo e graúdo SA: Silicato de sódio + Hidróxido de sódio Superplastificante	(A) fibra de aço crimpada [l=30mm; d=0,45mm; λ=66,67]	(0) sem adição (A.1) 0,50% (A.2) 1,00%	28 dias (0) 57,23 MPa (A.1) 59,64 MPa (A.2) 60,85 MPa	28 dias (0) 5,62 MPa (A.1) 6,4 MPa (A.2) 6,61 MPa	28 dias (0) 4,72 MPa (A.1) 5,84 MPa (A.2) 6,04 MPa	28 dias (0) 3,28 MPa (A.1) 3,43 MPa (A.2) 3,73 MPa
Zhang <i>et al.</i> (2021)	MP: Metacaulim (60%) e Cinza volante (40%); AG: Areia de rio e brita 1:2 SA: Silicato de sódio + Hidróxido de Sódio Redutor de retração	(A) fibra de aço corrugada [l=40mm; d=0,35mm; λ=114,29]	(0) sem adição (A.1) 0,50% (A.2) 1,00% (A.3) 1,50% (A.4) 2,00% (A.5) 2,50%	28 dias (0) 43,0 MPa (A.1) 47,0 MPa (A.2) 49,0 MPa (A.3) 50,5 MPa (A.4) 55,0 MPa (A.5) 53,0 MPa	28 dias (0) 4,2 MPa (A.1) 5,7 MPa (A.2) 6,1 MPa (A.3) 7,4 MPa (A.4) 8,4 MPa (A.5) 9,7 MPa	28 dias (0) 2,65 MPa (A.1) 2,80 MPa (A.2) 2,90 MPa (A.3) 3,00 MPa (A.4) 3,40 MPa (A.5) 3,70 MPa	28 dias (0) 16 GPa (A.1) 21 GPa (A.2) 20,8 GPa (A.3) 22,5 GPa (A.4) 28,0 GPa (A.5) 25,9 GPa
Alsaif e Albidah (2022)	MP: Metacaulim (80%) + Cinza volante (20%); AG: Areia branca, agregado miúdo e borracha de pneu; SA: Silicato de sódio + Hidróxido de Sódio	(A) fibra reciclada oriunda de pneus (d<0,3mm; l=10-60mm; λ) + fibra com ancoragem na extremidade (d=0,75mm; l=60mm, λ=80)	(0) sem adição (A.1) 20 kg/m ³ de cada fibra; total de 40 kg/m ³ de fibras (≅0,5% em vol.)	28 dias (0) 38 MPa (A.1) 37 MPa	28 dias (0) 4,6 MPa (A.1) 4,6 MPa	-	28 dias (0) 20,7 GPa (A.1) 21,2 GPa

Autores	Materiais utilizados	Tipo de fibra metálica	Teor de Fibras (% em volume ou kg/m³)	Resistência à compressão axial	Resistência à tração na flexão	Resistência à tração por compressão diametral	Módulo de Elasticidade
Albidah e Alsaif (2022)	MP: Metacaulim (75%) e Cinza volante (25%) AG: Areia branca, agregado britado e agregado de calcário SA: Silicato de sódio + Hidróxido de Sódio	(A) fibra reciclada oriunda de pneus [l=10 a 60mm; d<0,3mm] (B) fibra com ancoragem na extremidade [l=60mm; d=0,75mm; λ=80]	(0) sem adição (A.1) 30 kg/m ³ (≅0,38% em vol.) (A.2) 40 kg/m ³ (≅0,50% em vol.) (B.1) 30 kg/m ³ (≅0,38% em vol.)	28 dias (0) 38 MPa (A.1) 36 MPa (A.2) 39,9 MPa (B.1) 32 MPa	-	-	28 dias (0) 20,5 GPa (A.1) 19,8 GPa (A.2) 19,7 GPa (B.1) 20,0 GPa
Kumar, Kumar e Swami (2022)	MP: Cinza volante, Escória de alto forno, Sílica ativa e Metacaulim Areia oriunda de rio e agregado graúdo (granito) SA: Silicato de sódio + Hidróxido de Sódio (8M)	(A) fibra reta (l=40mm; d= 1 mm; λ=40)	(0) sem adição (A.1) 0,50% (A.2) 0,75% (A.3) 1,00%	28 dias (0) 45,80 MPa (A.1) 47,45 MPa (A.2) 52,20 MPa (A.3) 53,90 MPa	28 dias (0) 6,15 MPa (A.1) 6,85 MPa (A.2) 6,95 MPa (A.3) 7,50 MPa	28 dias (0) 4,95 MPa (A.1) 5,50 MPa (A.2) 7,05 MPa (A.3) 7,20 MPa	-
Li <i>et al.</i> (2022)	MP: Metacaulim AG: Pó de quartzo (MP:AG de 1:1,5) SA: Silicato de sódio + Hidróxido de Sódio	(A) fibra reta revestida de cobre (l=15mm; d=0,2mm; λ=75)	(0) sem adição (A.1) 0,5% (A.2) 1,0% (A.3) 1,5% (A.4) 2,0%	7 dias (0) 61,98 MPa (A.1) 63,5 MPa (A.2) 70,0 MPa (A.3) 70,5 MPa (A.4) 77,0 MPa	7 dias (0) 7,9 MPa (A.1) 8,6 Mpa (A.2) 12,6 MPa (A.3) 16,5 Mpa (A.4) 14,7 MPa	-	-
Abdollahnejad <i>et al.</i> (2022)	MP: Pedra Sabão (80%) + Metacaulim (20%); AG: Agregado miúdo; SA: Silicato de sódio + Hidróxido de Sódio	(A) fibra reta (l=13mm; d=0,03mm; λ=43,3)	(0) sem adição (A.1) 0,5% (A.2) 1,0%	28 dias (0) 25 MPa (A.1) 26,2 MPa (A.2) 27,0 MPa	28 dias (0) 11,6 MPa (A.1) 11,7 MPa (A.2) 12,5 MPa	-	-
Albidah (2023)	MP: Metacaulim + Cinza volante Areia branca, pó e brita de calcário SA: Silicato de sódio + Hidróxido de sódio	(A) fibra com ancoragem na extremidade (d=0.75mm e l=60mm)	(0) sem adição (A.1) 0,35% (A.2) 0,70%	28 dias (0) 48,60 MPa (A.1) 49,82 MPa (A.2) 51,37 MPa	-	28 dias (0) 4,00 MPa (A.1) 6,70 MPa (A.2) 8,09 MPa	-

Autores	Materiais utilizados	Tipo de fibra metálica	Teor de Fibras (% em volume ou kg/m³)	Resistência à compressão axial	Resistência à tração na flexão	Resistência à tração por compressão diametral	Módulo de Elasticidade
Nazir, Canpolat e Uysal (2023)	MP: Metacaulim (40%) + Cinza volante (20%) + Lama Vermelha (20%) + Escória (20%); AG: Pó de vidro + RCD; SA: Silicato de sódio + Hidróxido de Sódio	(A) fibra reta (l=6mm; d=0,17mm; λ=35,3)	(0) sem adição (A.1) 0,25% (A.2) 0,50% (A.3) 0,75% (A.4) 1,00%	28 dias (0) 42 MPa (A.1) 45 MPa (A.2) 41,2 MPa (A.3) 41 MPa (A.4) 42,5 MPa	28 dias (0) 7,2 MPa (A.1) 7,6 MPa (A.2) 6,9 MPa (A.3) 6,8 MPa (A.4) 7,1 MPa	-	-
Nazir <i>et al.</i> (2023)	MP: Metacaulim (40%), Cinzas volantes (20%), Lama vermelha (20%) e Escória (20%); AG: Agregado reciclado e Pó de vidro; SA: Silicato de sódio + Hidróxido de sódio	(A) fibra reta [l=6mm; d=0,17mm; λ=35,3]	(0) sem adição (A.1) 0,25% (A.2) 0,50% (A.3) 0,75% (A.4) 1,00%	28 dias (0) 42 MPa (A.1) 45 MPa (A.2) 41,2 MPa (A.3) 41 MPa (A.4) 42,5 MPa	28 dias (0) 7,2 MPa (A.1) 7,6 MPa (A.2) 6,9 MPa (A.3) 6,8 MPa (A.4) 7,1 MPa	28 dias (0) 1,95 MPa (A.1) 2,71 MPa (A.2) 2,15 MPa (A.3) 2,17 MPa (A.4) 2,33 MPa	-
Menger <i>et al.</i> (2023)	MP: Metacaulim (84,44%) e Resíduo de polimento de porcelana (15,56%); AG: Areia da série normal (1:2;1:3 e 1:4 - cimento/areia) SA: Silicato de sódio líquido + Hidróxido de sódio	(A) fibra reta [l=13mm; d=0.2mm; λ=65]	(0) sem adição (A.1) 0,45% (A.2) 0,90% (A.3) 1,35%	28 dias (0) 68,5 MPa (A.1) 82,1 MPa (A.2) 92,3 MPa (A.3) 95,8 MPa	28 dias (0) 9,8 MPa (A.1) 10,1 MPa (A.2) 14,8 MPa (A.3) 19,8 MPa	-	-
Yilmaz <i>et al.</i> (2024)	MP: Metacaulim (40%), Lama vermelha (20%), escória de alto forno (20%) e cinza volante (20%) AG: Areia e pó de mármore SA: Silicato de sódio + Hidróxido de sódio	(A) fibra reta [l=6,08mm; d=0,17mm; λ=35,76]	(0) sem adição (A.1) 0,25% (A.2) 0,50% (A.3) 0,75% (A.4) 1,00%	28 dias (0) 28,5 MPa (A.1) 32 MPa (A.2) 30 MPa (A.3) 32,1 MPa (A.4) 31,0 MPa	28 dias (0) 5,0 MPa (A.1) 5,8 MPa (A.2) 5,7 MPa (A.3) 5,9 MPa (A.4) 6,0 MPa	28 dias (0) 2,0 MPa (A.1) 2,8 MPa (A.2) 1,9 MPa (A.3) 2,3 MPa (A.4) 2,2 MPa	-

Autores	Materiais utilizados	Tipo de fibra metálica	Teor de Fibras (% em volume ou kg/m³)	Resistência à compressão axial	Resistência à tração na flexão	Resistência à tração por compressão diametral	Módulo de Elasticidade
Aljumaili <i>et al.</i> (2024)	MP: Metacaulim; AG: Areia, brita e RCD (até 30% em substituição aos agregados) SA: Silicato de sódio líquido + Hidróxido de sódio (12M) Superplastificante	(A) fibra reta [l=13mm; d=0,2mm; λ=65]	(0) sem adição (A.1) 0,5% (A.2) 1,0% (A.3) 1,5%	28 dias (0) 28,39 MPa (A.1) 31,66 MPa (A.2) 34,09 MPa (A.3) 33,75 MPa	-	28 dias (0) 2,62 MPa (A.1) 3,22 MPa (A.2) 3,57 MPa (A.3) 3,65 MPa	-
Aljumaili <i>et al.</i> (2024)	MP: Metacaulim; AG: Areia, brita e RCD (até 30% em substituição aos agregados) SA: Silicato de sódio líquido + Hidróxido de sódio (12M) Superplastificante	(A) fibra reta [l=13mm; d=0,2mm; λ=65]	(0) sem adição (A.1) 0,5% em volume (A.2) 1,5% em volume	28 dias (0) 41,48MPa (A.1) 30,20 MPa (A.2) 38,55 MPa	28 dias (0) 4,77 MPa (A.1) 5,2 MPa (A.2) 5,56 MPa	28 dias (0) 2,52 MPa (A.1) 3,30 MPa (A.2) 3,77 MPa	-
Alobeidy e Khalil (2024)	MP: Metacaulim + cinzas de sílica + óxido de cálcio; AG: Areia, brita e resíduo de borracha (10% em substituição aos agregados) SA: Silicato de sódio líquido + Hidróxido de sódio (12M) Superplastificante	(A) fibra reciclada oriunda de pneus [l= 4 a 37mm (média de 35mm); d=0,2 a 0,35mm (média de 0,33); λ=106]	(0) sem adição (A.1) 0,125% (A.2) 0,25%	28 dias (0) 35,6 MPa (A.1) 51,0 MPa (A.2) 41,25 MPa	28 dias (0) 3,75 MPa (A.1) 7,14 MPa (A.2) 5,34 MPa	28 dias (0) 2,95 MPa (A.1) 4,17 MPa (A.2) 7,14 MPa	-
Qu <i>et al.</i> (2024)	MP: Metacaulim (65%) + cinza volante (35%); AG: Areia média SA: Silicato de sódio líquido + Hidróxido de sódio (10M) Superplastificante	(A) fibra reta [l=16mm; d=0.2mm; λ=80]	(0) sem adição (A.1) 0,50% (A.2) 1,00% (A.3) 1,50% (A.4) 2,00%	28 dias (0) 47 MPa	28 dias (0) 3,35 MPa (A.1) 3,51 MPa (A.2) 4,30 MPa (A.3) 5,75 MPa (A.4) 4,60 MPa	28 dias (0) 1,56 MPa (A.1) 2,25 MPa (A.2) 3,15 MPa (A.3) 4,30 MPa (A.4) 3,55 MPa	-

Notas:

^a A notação (0) na coluna de “Teor de Fibras” refere-se à argamassa sem reforço de fibra; ^b As siglas “d” (diâmetro) e “l” (comprimento) correspondem às dimensões da fibra, com λ representando a razão de aspecto (l/d); ^c MP: Material precursor, listado em ordem decrescente de quantidade na composição; SA: solução alcalina utilizada para ativação; AG: Agregados utilizados; ^d O símbolo “-” indica ausência de informação no documento original.

Fonte: Autor (2025).

Tabela 5 - Análise comparativa das propriedades mecânicas e teores ótimos de fibras em geopolímeros.

Legenda: ✓ Melhora significativa na propriedade em relação à matriz não reforçada; = Propriedade equivalente à matriz sem fibras; — Dado não reportado no estudo.

Autores	Teor de Fibra ótimo	RC	RT-F	RT-CD	ME	Tenacidade
Bashar <i>et al.</i> (2016)	0,75%	✓	✓	✓	✓	✓
Onuaguluchi <i>et al.</i> (2017)	2,00%	=	—	—	—	✓
Albidah <i>et al.</i> (2020)	0,77% (calc.)	✓	—	✓	—	✓
Xu <i>et al.</i> (2021)	2,50%	✓	✓	✓	—	✓
Riahi <i>et al.</i> (2021)	0,75%	✓	✓	—	—	✓
Sathish Kumar, Ganesan e Indira (2021)	1,00%	✓	✓	✓	✓	—
Zhang <i>et al.</i> (2021)	2,50%	✓	✓	✓	✓	✓
Alsaif e Albidah (2022)	0,50% (calc.) ^(a)	=	=	—	—	✓
Albidah e Alsaif (2022)	0,50% (calc.)	✓	—	—	=	✓
Kumar, Kumar e Swami (2022)	1,00%	✓	✓	✓	—	✓
Li <i>et al.</i> (2022)	1,50%	✓	✓	—	—	✓
Abdollahnejad <i>et al.</i> (2022)	1,00%	✓	✓	—	—	—
Albidah (2023)	0,70%	✓	—	✓	—	✓
Nazir, Canpolat e Uysal (2023)	0,25%	✓	✓	—	—	✓
Nazir <i>et al.</i> (2023)	0,25%	✓	✓	✓	—	✓
Menger <i>et al.</i> (2023)	1,35%	✓	✓	—	—	✓
Yilmaz <i>et al.</i> (2024)	0,75%	✓	✓	✓	—	✓
Aljumaili <i>et al.</i> (2024)	1,0%	✓	✓	✓	-	✓
Aljumaili <i>et al.</i> (2024)	1,5%	✓	✓	✓	-	✓
Alobeidy e Khalil (2024)	0,125%	✓	✓	✓	-	✓
Qu <i>et al.</i> (2024)	1,5%	—	✓	✓	-	✓

Nota: ^(a)Referente a mistura com fibras metálicas recicladas de pneu e de aço com ancoragem na extremidade. O volume de fibras (indicado como *calc.*) foi calculado com base na razão peso por metro cúbico (kg/m³) fornecida pelos autores.

Fonte: Autor (2025).

Na presente revisão foram analisadas 21 estudos que investigaram o desempenho de geopolímeros reforçados com fibras metálicas, sendo 17 artigos focados no uso de fibras de aço convencionais e 4 estudos voltados para fibras metálicas recicladas de pneus ou outros resíduos. A matriz geopolimérica utilizada nos estudos foi composta majoritariamente por metacaulim, presente em 19 pesquisas, frequentemente combinado com cinza volante (12 artigos), escória (6 artigos) e resíduos como lama vermelha e pó de vidro (3 artigos). O ativador alcalino empregado em todas as pesquisas consistiu na combinação de silicato de sódio e hidróxido de sódio.

Dada a diversidade das fibras metálicas empregadas, os artigos foram agrupados conforme a configuração da fibra de aço utilizada, além dos estudos que analisaram fibras metálicas recicladas de pneus. A seguir, são apresentados as principais informações de cada categoria.

2.7.2.1 Geopolímeros reforçados com fibras de aço convencionais

O reforço de geopolímeros com fibras de aço convencionais demonstrou impactos significativos na resistência mecânica, na durabilidade e na capacidade de absorção de energia do material. As principais configurações de fibras avaliadas foram fibras com ancoragem na extremidade, fibras retas e fibras crimpadas e corrugadas.

a) Fibras de aço com ancoragem na extremidade (*Hooked-End*)

Os estudos de Albidah *et al.* (2020), Riahi *et al.* (2021) e Albidah (2023) avaliaram o impacto das fibras de aço com ancoragem na extremidade em matrizes compostas por metacaulim como precursor principal, frequentemente combinado com cinza volante e escória. A inclusão dessas fibras resultou em melhoria da resistência de aderência de barras de aço entre 7% e 45% (Albidah *et al.*, 2020), indicando um efeito positivo na ancoragem e na interface fibra-matriz. Além disso, Riahi *et al.* (2021) observaram um incremento de 94% na tenacidade ao utilizar fibras revestidas de alumina, demonstrando que o tratamento da superfície das fibras pode influenciar significativamente na capacidade do material de absorver energia antes da falha.

A resistência à tração na flexão também foi beneficiada pela incorporação dessas fibras. O estudo de Albidah (2023), a adição de 0,70% de fibras elevou essa propriedade em 102,2% quando comparada a matriz sem reforço, indicando uma melhora expressiva na capacidade do material de resistir aos esforços de flexão. O teor ótimo dessas fibras situou-se entre 0,70% e 0,75% em volume, proporcionando ganhos relevantes em ductilidade, resistência ao cisalhamento e controle de fissuração.

b) Fibras de aço retas

A utilização de fibras de aço retas foi amplamente investigada nos estudos de Nazir, Canpolat e Uysal (2023), Li *et al.* (2022), Abdollahnejad *et al.* (2022), Yilmaz *et al.* (2024), Kumar, Kumar e Swami (2022), Aljumaili *et al.* (2024), Qu *et al.* (2024) e Menger *et al.* (2023). As matrizes geopoliméricas nessas pesquisas apresentaram teores de metacaulim variando entre 40% e 100%, muitas vezes associado a cinza volante, lama vermelha, pó de quartzo e resíduos de construção.

No estudo conduzido por Nazir, Canpolat e Uysal (2023), observou-se um aumento de 42,94% na resistência à flexão após exposição a 900 °C em comparação com a argamassa sem reforço, evidenciando o efeito sinérgico entre as fibras de aço e a matriz geopolimérica na

manutenção da estabilidade térmica. A formulação da matriz foi composta por metacaulim (40%), cinza volante (20%), lama vermelha (20%) e escória (20%) como materiais precursores, enquanto pó de vidro e resíduos de construção e demolição (RCD) foram empregados como agregados. Utilizou-se solução ativadora à base de silicato de sódio e hidróxido de sódio. Ressalta-se que este foi o único trabalho identificado que combinou pó de vidro e RCD como agregados, indicando um potencial promissor para aplicações em ambientes de altas temperaturas. Por outro lado, Li *et al.* (2022) demonstraram que a resistência à compressão das argamassas geopoliméricas em cura térmica, formuladas com metacaulim e pó de quartzo (filer) na proporção 1:1,5, pode atingir até 97,49 MPa quando incorporadas fibras metálicas revestidas de cobre, evidenciando que o tipo de revestimento da fibra influencia significativamente no desempenho mecânico do compósito, assim como, no processo de cura.

Outro aspecto relevante foi a influência do volume de fibras na dispersão e na trabalhabilidade do material. Estudos como os de Yilmaz *et al.* (2024) e Qu *et al.* (2024) relataram que teores superiores a 1,50% podem resultar em aglomeração das fibras, o que compromete a homogeneidade da matriz e reduz a resistência final. Menger *et al.* (2023) investigaram o impacto das fibras retas em uma matriz composta majoritariamente por metacaulim e resíduo de polimento de porcelana, observando uma resistência à compressão de até 95 MPa e redução de 38% na retração autógena ao empregar 1,35% de fibras, além de resistência à flexão de até 20 MPa. Portanto, o teor ótimo dessas fibras variou de 0,25% a 2,50%, sendo que valores superiores a 1,50% exigem métodos específicos para melhorar a dispersão.

c) Fibras de Aço Crimpadas e Corrugadas

As fibras crimpadas e corrugadas foram avaliadas nos estudos de Sathish Kumar, Ganesan e Indira (2021), Xu *et al.* (2021) e Zhang *et al.* (2021), onde foram utilizadas em matrizes compostas por metacaulim (teor de 15%–60%), cinza volante e escória. A resistência à tração na flexão foi a propriedade mais impactada pela adição dessas fibras. No estudo de Sathish Kumar, Ganesan e Indira (2021), o reforço com 1% de fibras crimpadas resultou em um aumento de 39% nessa propriedade. Xu *et al.* (2021) observaram um ganho ainda mais expressivo, reportando um aumento de 60,95% na resistência à flexão ao utilizar 2,5% de fibras de aço.

Zhang *et al.* (2021) identificaram que o reforço com 2% de fibras corrugadas resultou em uma resistência à compressão de 55,4 MPa, demonstrando que essas fibras são eficientes tanto na absorção de tensões quanto no aumento da resistência mecânica. Os estudos apontaram

que o teor ótimo dessas fibras variou entre 1,00% e 2,50%, sendo que valores mais elevados garantiram melhor controle de fissuras e resistência à tração, enquanto a resistência à compressão apresentou um comportamento mais variável.

2.7.2.2 Geopolímeros reforçados com fibras metálicas recicladas de pneus

Os geopolímeros reforçados com fibras metálicas recicladas de pneus foram investigados em quatro estudos, os quais apresentaram resultados mais variáveis devido à heterogeneidade das fibras extraídas.

Os estudos de Alsaif e Albidah (2022), Onuaguluchi *et al.* (2017), Albidah e Alsaif (2022) e Alobeidy e Khalil (2024) utilizaram essas fibras em matrizes compostas por metacaulim (em proporções de 50%–100% de material precursor), borracha de pneu e resíduos industriais. O desempenho mecânico variou significativamente, com redução de 17,4% na resistência à compressão devido à presença de borracha de pneu, mas aumento de 114% na ductilidade (Alsaif e Albidah, 2022). Por outro lado, o reforço com fibras recicladas melhorou em 33,8% a resistência à compressão (Alobeidy e Khalil, 2024), enquanto Onuaguluchi *et al.* (2017) destacaram a melhoria na tenacidade, apesar de problemas de corrosão na superfície das fibras recicladas em teores elevados. O teor ótimo dessas fibras variou de 0,125% a 2,00%, sendo que a irregularidade dimensional das fibras pode comprometer a eficiência do reforço.

2.7.2.3 Considerações finais da revisão

A revisão dos 21 artigos revelou que o uso de fibras metálicas pode modificar significativamente o desempenho mecânico dos geopolímeros. As fibras de aço convencionais demonstraram impacto positivo na resistência à compressão, tração na flexão e tenacidade, principalmente quando empregadas em teores entre 1,00% e 2,50%. Já as fibras metálicas recicladas de pneus apresentaram um desempenho mais variável, com potencial de melhoria na tenacidade e resistência pós-fissuração, mas sem ganhos expressivos na resistência à compressão e flexão. Assim, há necessidade de estudos adicionais para padronizar a morfologia das fibras recicladas e avaliar sua durabilidade a longo prazo.

A matriz geopolimérica composta por metacaulim e cinza volante demonstrou boa compatibilidade com ambas as categorias de fibras metálicas, sendo que a utilização de materiais suplementares, como lama vermelha, se mostrou eficaz na melhoria da durabilidade do material. Além disso, novas investigações devem explorar combinações de materiais suplementares na matriz geopolimérica, visando otimizar ainda mais o desempenho desses

compósitos. Além dos materiais suplementares já mencionados, é importante destacar que, no resumo da revisão bibliográfica realizada, o pó de vidro foi utilizado predominantemente como agregado na matriz geopolimérica. No entanto, estudos recentes indicam que o pó de vidro possui potencial significativo para ser empregado também como material precursor, contribuindo para a formação da matriz geopolimérica e aprimorando suas propriedades.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de avaliar o impacto da incorporação de pó de vidro e fibras metálicas em argamassas geopoliméricas à base de metacaulim, um programa experimental foi desenvolvido para determinar suas propriedades mecânicas. Os materiais utilizados para a fabricação das matrizes geopoliméricas incluem:

- Metacaulim: principal material precursor;
- Pó de vidro (passante na peneira #200): substituição parcial do metacaulim;
- Alumina amorfa hidratável: adição para ajuste estequiométrico e controle da razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$;
- Silicato de sódio e hidróxido de sódio (sólidos): componentes da solução ativadora alcalina;
- Água do sistema de abastecimento da cidade de São Carlos/SP;
- Agregado miúdo: material inerte;
- Fibra metálica de formato reto e sem ancoragem, apresentando um diâmetro de 0,20 mm e um comprimento de 13 mm (fator de forma igual a 65): reforço volumétrico para melhoria do comportamento mecânico e resistência pós-fissuração

A Figura 14 apresenta os materiais secos empregados na composição das argamassas geopoliméricas: metacaulim, pó de vidro, alumina hidratada, fibra de aço reta e areia fina.

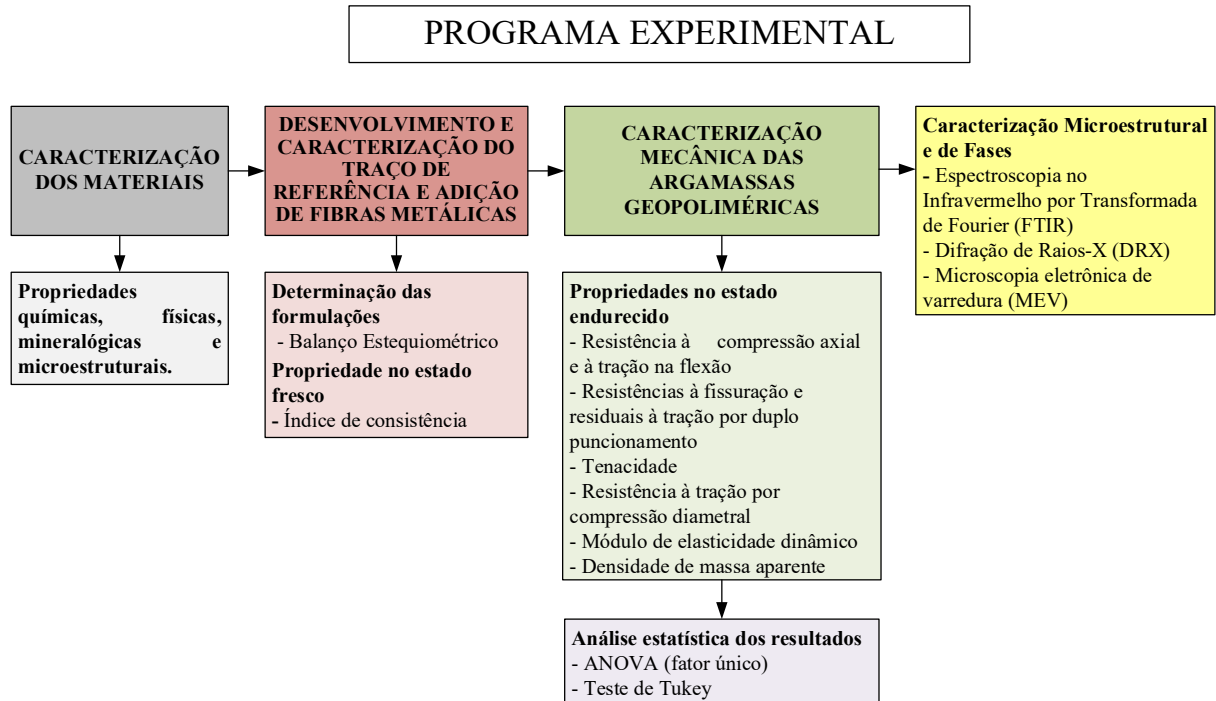
Figura 14 - Materiais secos utilizados nas argamassas geopoliméricas: metacaulim, pó de vidro (passante na peneira #200), alumina hidratável, fibra de aço reta e areia fina.



Fonte: Autor (2025).

Para atingir tal objetivo, o programa experimental foi dividido em três etapas: caracterização dos materiais, das argamassas no estado fresco e caracterização mecânica das argamassas no estado endurecido (Figura 15).

Figura 15 - Etapas do programa experimental.



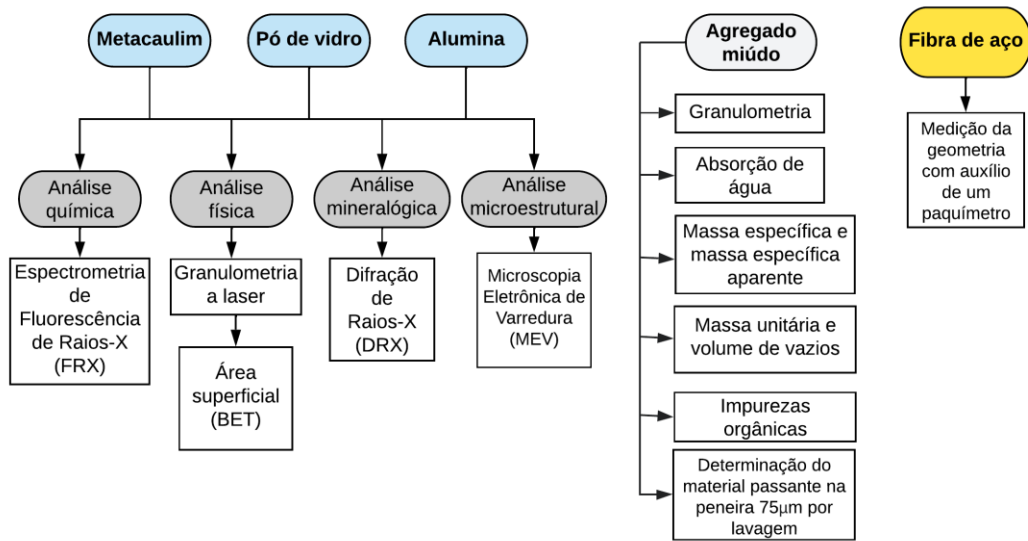
Fonte: Autor (2025).

A adição de fibras nos geopolímeros pode alterar sua natureza frágil, enquanto um aumento na proporção do ativador em relação ao material precursor pode resultar em uma melhoria na resistência à compressão inicial, mas pode afetar a trabalhabilidade. Foi realizado um estudo anterior das propriedades dos materiais para determinar relação adequada entre ativador e materiais precursores e um intervalo de adição de fibras metálicas, visando obter as melhores características do ponto de vista mecânico.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Nesta etapa foram analisadas as propriedades químicas, físicas, mineralógicas e microestruturais dos componentes: metacaulim, pó de vidro, alumina, agregado miúdo e fibra metálica (Figura 16).

Figura 16 - Ensaio de caracterização dos materiais.



Fonte: Autor (2025).

A caracterização dos materiais precursores, metacaulim e pó de vidro, foi realizada em estudo anterior conduzido pelo grupo de pesquisa GESEC, com exceção dos ensaios de granulometria a laser, área superficial específica (método BET), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Os materiais utilizados estão disponíveis na região Sudeste do Brasil, sendo o pó de vidro processado pelo grupo de pesquisa vinculado ao Laboratório de Materiais e Componentes do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar.

Para a caracterização química dos materiais, empregou-se a espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), técnica utilizada para identificar os elementos presentes. Propriedades físicas como a distribuição granulométrica e área superficial específica foram determinadas experimentalmente por meio dos ensaios de granulometria a laser e método BET, respectivamente, enquanto os demais parâmetros foram obtidos com base nas informações fornecidas pelo fabricante. A determinação da área superficial específica foi realizada pelo método BET, com o auxílio do equipamento Nova 1200e (Quantachrome Instruments), utilizando o equipamento Nova 1200e conforme a norma ASTM C1069-09, no laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais (SMM) da EESC-USP. As amostras foram previamente degaseificadas a 200 °C por 3 horas, empregando-se gás N₂ com 99,999% de pureza como gás de adsorção.

A caracterização das fases cristalinas foi realizada por meio de DRX, utilizando o difratômetro Bruker D8 Focus no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE-UFSCar). As

condições de operação incluíram radiação $\text{CuK}\alpha$ [$\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$], filtro de níquel, corrente de 40 mA, tensão de 40 kV e passo de $0,02^\circ$. A análise dos grupos funcionais foi conduzida pela técnica FTIR no espectrômetro PerkinElmer Spectrum 3, no Laboratório de Materiais Vítreos (LaMaV-UFSCar), utilizando a técnica de refletância total atenuada (ATR), com faixa espectral de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} , 20 varreduras e resolução de 4 cm^{-1} . A caracterização morfológica e química pontual foi realizada por MEV no equipamento Philips XL-30 (FEG), com espectroscopia por dispersão de energia de raios-X (EDS) acoplada, no LCE-UFSCar. As amostras foram previamente metalizadas com ouro.

3.1.1 Metacaulim

O material precursor primário empregado na formulação das argamassas geopoliméricas consiste no metacaulim (MC), um silicato de alumínio comercializado como Metacaulim HP Ultra pela empresa Metacaulim do Brasil Ltda., sediada em Jundiaí-SP. Para caracterização completa do material, empregaram-se diversas técnicas analíticas: granulometria a laser para determinação da distribuição granulométrica e percentis característicos; método BET para quantificação da área superficial específica; FRX para avaliação da composição química; DRX para identificação de fases cristalinas; e MEV para análise morfológica.

As características químicas do metacaulim foram estabelecidas mediante ensaios de FRX, sendo os resultados complementados por informações técnicas disponibilizadas pela Metacaulim do Brasil (2023), conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química e propriedades do Metacaulim.

Componentes	Valores típicos (% em massa)
SiO_2	57,01
Al_2O_3	38,43
Fe_2O_3	1,75
TiO_2	1,61
K_2O	0,31
MgO	0,77
CaO	0,12
SO_3	0,001
Na_2O	-
Área Específica BET	$15,798 \text{ m}^2/\text{g}$
Umidade ⁽¹⁾	0,50
Perda ao Fogo ⁽¹⁾	3
Resíduo #325 ⁽¹⁾	6
Atividade Pozolânica Chapelle ⁽¹⁾	$880 \text{ mg Ca(OH)}_2/\text{g}$
Massa Específica ⁽¹⁾	$2,56 \text{ g/cm}^3$

Nota: ⁽¹⁾Dados fornecidos pela Metacaulim do Brasil (2023).

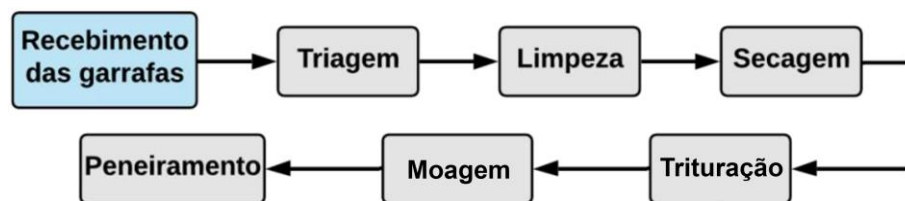
Fonte: Autor (2025).

A análise química por FRX evidenciou que o material é majoritariamente composto por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), com teores de 57,01% e 38,43% em massa, respectivamente. Esses componentes predominantes são acompanhados por óxidos minoritários, como óxido de ferro (Fe_2O_3 , 1,75%) e óxido de titânio (TiO_2 , 1,61%), além de traços de óxido de potássio (K_2O , 0,31%), óxido de magnésio (MgO , 0,77%) e óxido de cálcio (CaO , 0,12%). Quanto às propriedades físicas, destaca-se a área específica de 15,798 m^2/g , propriedade que proporciona maior superfície reativa ao material, favorecendo sua eficiência durante o processo geopolimérico. Por fim, a massa específica do material foi quantificada em 2,56 g/cm^3 .

3.1.2 Pó de vidro

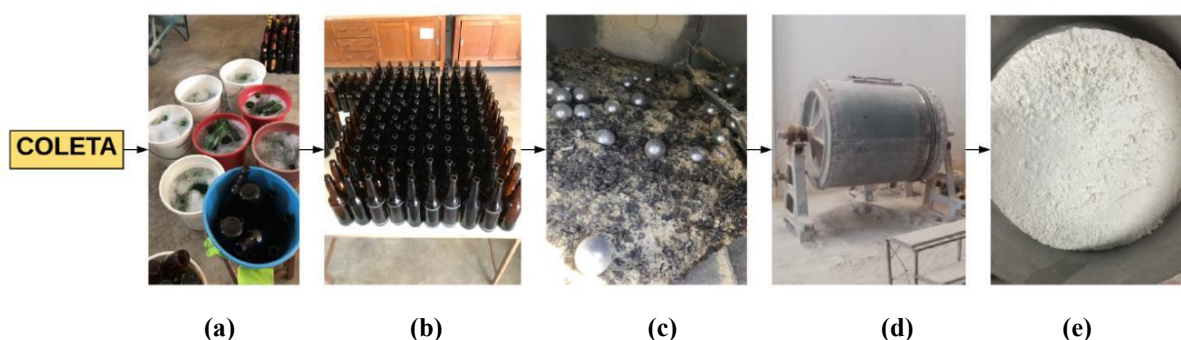
O vidro moído utilizado no estudo é proveniente de garrafas de bebidas fornecidas por estabelecimentos comerciais da cidade de São Carlos/SP. O processo de beneficiamento desse material é detalhado no fluxograma apresentado na Figura 17 e na Figura 18.

Figura 17 - Etapas de beneficiamento do vidro.



Fonte: Autor (2025).

Figura 18 - Procedimento para obtenção do pó de vidro: a) Lavagem e retirada dos rótulos das garrafas; b) Secagem ao ar das garrafas; c) Quebra das garrafas em cacos em uma betoneira com bolas de aço; d) Moagem final em moinho de bolas; e) Produto obtido da moagem.



Fonte: Freitas (2019).

Após o recebimento das garrafas no laboratório, foi realizado um processo de triagem para separar apenas as garrafas de cor âmbar. Em seguida, iniciou-se a etapa de limpeza, onde os rótulos e a cola foram removidos. As garrafas foram colocadas em um ambiente aberto e

ventilado para a primeira fase de secagem. Posteriormente, as garrafas foram trituradas em uma betoneira com esferas de aço, transformando-as em fragmentos.

Em seguida, foi realizada a moagem do material. Utilizando um moinho por via seca, processou-se um total de 250 kg de vidro durante 14 horas. O equipamento utilizado possuía um revestimento de sílex e as bolas de moagem eram feitas do mesmo material. Após essa etapa, o material passou por uma secagem em estufa a 105°C por 24 horas. Em seguida, foi feito um peneiramento mecânico usando um agitador de peneiras Ro-Tap, resultando em um vidro finamente moído que passou pela peneira #200, com partículas menores que 75 µm. Por fim, o material foi armazenado em uma sacola de papel kraft protegida por um saco plástico.

De forma análoga à caracterização realizada para o metacaulim, o pó de vidro foi submetido aos ensaios de DRX, para identificação de suas fases cristalinas, e de FRX, para a determinação de sua composição química (Tabela 7). Além disso, foram obtidas a massa específica, a área superficial específica (método BET) e a distribuição granulométrica por meio de granulometria a laser. A densidade do material foi quantificada em 2,55 g/cm³.

Tabela 7 - Composição química do pó de vidro.

Componentes	Valores obtidos (% em massa)
Dióxido de silício (SiO ₂)	74
Óxido de sódio (Na ₂ O)	11
Óxido de cálcio (CaO)	9,1
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	3,7
Óxido de magnésio (MgO)	0,74
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,56
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	0,42
Óxido de estrôncio (SrO)	0,039
Óxido de rubídio (Rb ₂ O)	0,016
Óxido de tório (ThO ₂)	< 0,01
Óxido de urânio (U ₃ O ₈)	< 0,01
Perda ao fogo (PF)	0,58

Fonte: Soares (2021).

A análise química revelou que o pó de vidro é composto predominantemente por dióxido de silício (SiO₂), com teor de 74% em massa. Esse principal componente é acompanhado por quantidades significativas de óxido de sódio (Na₂O, 11%) e óxido de cálcio (CaO, 9,1%), os quais atuam como modificadores de rede, confirmando que o material é classificado como vidro soda-cal. Adicionalmente, foram identificados teores menores de óxido de alumínio (Al₂O₃, 3,7%), óxido de magnésio (MgO, 0,74%), óxido de potássio (K₂O, 0,56%) e óxido férrico (Fe₂O₃, 0,42%). A perda ao fogo (PF) foi determinada em 0,58%, indicando a presença de

compostos voláteis ou umidade residual. Por fim, a área específica, medida pelo método BET, foi de 0,681 m²/g.

3.1.3 Alumina Hidratável

A alumina amorfa hidratável *Alphabond*® 300, fornecida pela empresa Almatís, foi incorporada como material refratário complementar ao precursor principal, com a finalidade de ajustar e manter a razão molar SiO₂/Al₂O₃ nas formulações geopoliméricas. Esta alumina de alta pureza, reconhecida por sua estabilidade térmica e resistência à degradação química em ambientes severos, desempenha papel fundamental no controle estequiométrico das reações de geopolimerização.

Para caracterização completa do material, empregaram-se técnicas analíticas complementares: DRX para identificação e quantificação das fases cristalinas presentes; FRX para determinação precisa da composição química elementar; e MEV para análise morfológica detalhada das partículas. As propriedades físico-químicas da *Alphabond* 300 encontram-se sistematizadas na Tabela 8. Os dados de composição química foram obtidos experimentalmente por FRX.

Tabela 8 - Composição química da alumina.

Componentes	Valores típicos (% em massa)
Al ₂ O ₃	99,735
Na ₂ O	0,144
SiO ₂	0,076
CaO	0,045
MOI (% perda 25 - 250 °C) *	1,7 (máx. 4,1)
LOI (% perda 250 - 1100 °C) *	6,5 (máx. 7,0)

Nota: *Dados fornecidos pela Almatís.

Fonte: Autor (2025).

A análise química por FRX revelou um teor de óxido de alumínio (Al₂O₃) de 99,735% em massa, o que evidencia a elevada pureza do material. A caracterização estrutural por DRX apresentada na Seção 3.1.4.3, confirmou que a alumina estudada é predominantemente uma alumina amorfa.

No que se refere às propriedades físicas, a perda de umidade (MOI), medida no intervalo de 25 °C a 250 °C, foi registrada em 1,7%, com um valor máximo de 4,1%. A perda ao fogo (LOI), avaliada entre 250 °C e 1100 °C, apresentou 6,5%, estando dentro do limite máximo de 7,0%. Tais parâmetros refletem a excelente estabilidade térmica do material, bem como sua resistência a perdas decorrentes da desidratação ou decomposição de compostos voláteis em condições de aquecimento. A elevada área superficial específica de 186,058 m²/g também é um

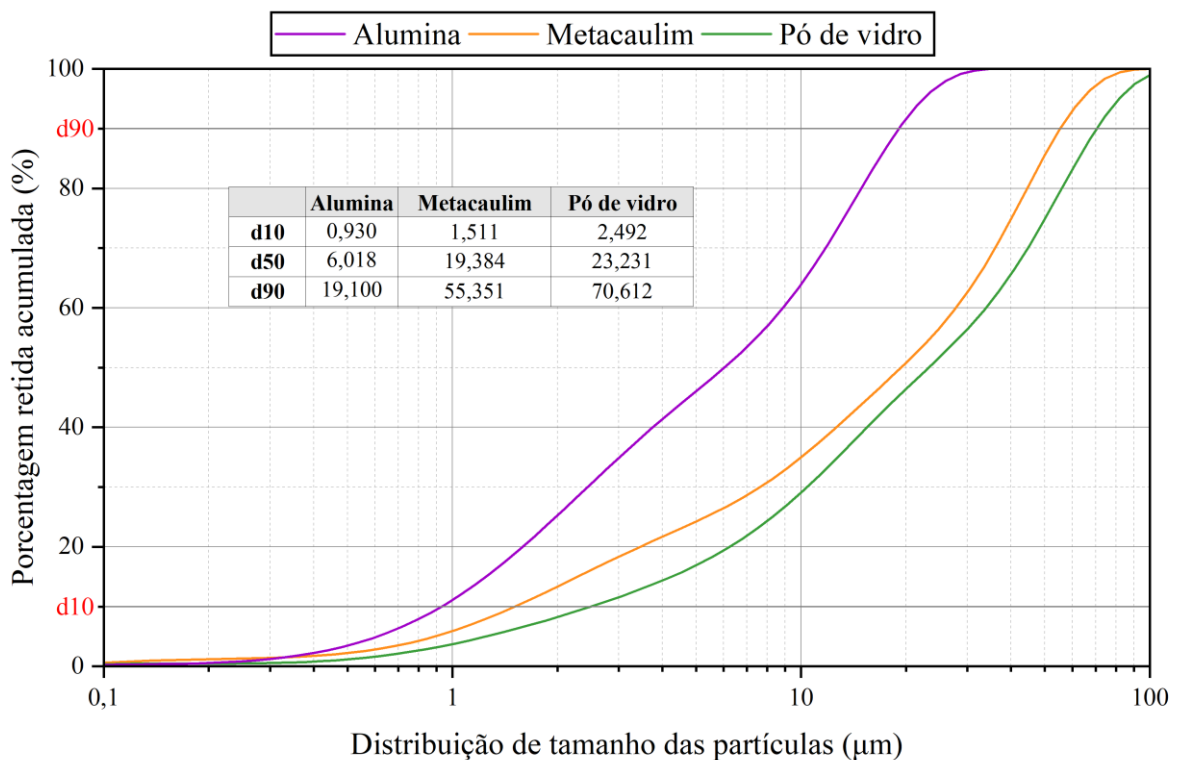
indicativo importante do comportamento reativo da alumina em aplicações de alta performance. Por fim, a massa específica do material foi quantificada em $2,78\text{g/cm}^3$.

3.1.4 Caracterização dos Materiais Precusores

3.1.4.1 Granulometria dos Materiais Precusores

A Figura 19 exibe as curvas de distribuição granulométrica dos materiais precusores utilizados.

Figura 19 - Distribuição granulométrica dos materiais precusores determinada por granulometria a laser: alumina Alhabond 300 (linha roxa), metacaulim HP Ultra (linha laranja) e pó de vidro (linha verde).



Fonte: Autor (2025).

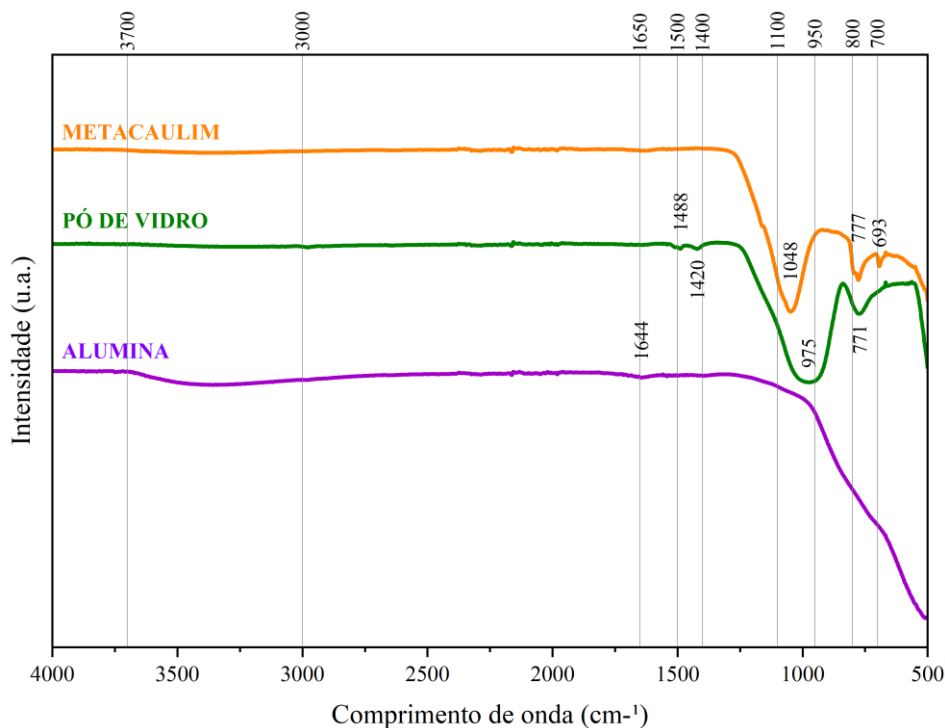
A análise granulométrica realizada por difração a laser indicou que o metacaulim possui partículas mais finas ($d_{10} = 1,51\ \mu\text{m}$; $d_{50} = 19,38\ \mu\text{m}$; $d_{90} = 55,35\ \mu\text{m}$) em relação ao pó de vidro ($d_{10} = 2,49\ \mu\text{m}$; $d_{50} = 23,23\ \mu\text{m}$; $d_{90} = 70,61\ \mu\text{m}$). Essa granulometria mais reduzida contribui para uma maior reatividade do metacaulim no processo de ativação alcalina, aspecto essencial para a formação da matriz geopolimérica. No entanto, devido à densidade similar entre o metacaulim e o pó de vidro, a substituição parcial entre esses componentes (80% metacaulim, 20% pó de vidro) não impacta significativamente na densidade da matriz.

A fim de manter a razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ em 3,511, foi adicionada alumina amorfa à formulação, material que apresenta granulometria consideravelmente mais fina em comparação aos demais precursores ($d_{10} = 0,93 \mu\text{m}$; $d_{50} = 6,02 \mu\text{m}$; $d_{90} = 18 \mu\text{m}$). Essa adição não apenas assegurou o ajuste estequiométrico no traço MC80PV20-AL, igualando a razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ àquela do traço de referência MC100PV0, mas também contribuiu para a obtenção de uma matriz mais compacta e densa.

3.1.4.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

FTIR é uma técnica amplamente utilizada para caracterizar a estrutura química de materiais precursores na geopolimerização, permitindo identificar grupos funcionais e avaliar o grau de ordenação da matriz estrutural (Davidovits, 2008). Os espectros de FTIR do metacaulim, do pó de vidro e da alumina foram analisados para identificar os principais grupos funcionais e as características estruturais que influenciam suas propriedades e possíveis aplicações. Na Figura 20 são apresentadas o gráfico de FTIR dos materiais precursores.

Figura 20 - FTIR dos materiais precursores.



Fonte: Autor (2025).

O espectro do metacaulim apresenta estabilidade na faixa de 4000 a 1300 cm^{-1} , sem picos expressivos, o que corrobora a ausência de bandas referentes a hidroxilas livres ($-\text{OH}$) ou grupos fortemente ligados à água. A queda acentuada da transmitância em 1048 cm^{-1} é atribuída

às vibrações assimétricas Si–O–Si, típicas de redes semicristalinas de sílica, evidenciando sua reatividade potencial (Provis e Van Deventer, 2009). Além disso, os picos em 777 cm^{-1} e 693 cm^{-1} indicam vibrações de Al–O, sugerindo a presença de alumínio em sítios tetraédricos e octaédricos, essenciais para a formação de redes estruturais na polimerização alcalina.

O pó de vidro exhibe comportamento espectral semelhante ao do metacaulim até 1270 cm^{-1} , mas com deslocamento do pico principal para 975 cm^{-1} , característico de vibrações Si–O–Si em estruturas menos ordenadas. Esse deslocamento reflete sua alta amorficidade, facilitando a dissolução alcalina e a formação de cadeias solúveis de silicato. Picos secundários em 1488 cm^{-1} e 1420 cm^{-1} podem ser atribuídos à presença de modificadores da rede vítrea, como Na_2O e K_2O , que aumentam a reatividade ao reduzir a conectividade da rede (Khater, 2013). Diferentemente do metacaulim, o pó de vidro contém apenas 3,7% de Al_2O_3 , resultando em menor intensidade dos picos relacionados ao alumínio.

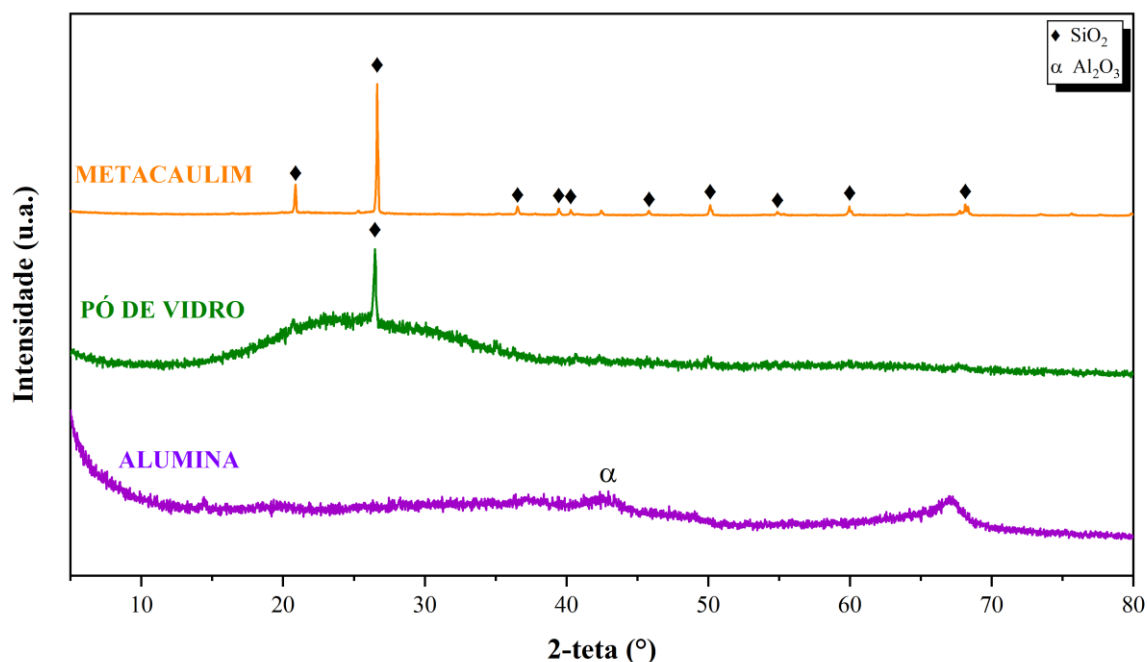
A alumina empregada apresenta uma banda discreta, porém definida, em 1644 cm^{-1} , que pode ser atribuída ao modo de dobramento de moléculas de água estrutural, sugerindo um possível estado hidratado do material. Uma sutil perturbação na região entre $3700\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ oferece evidência complementar da presença de grupos hidroxila superficiais. Durante a geopolimerização, essa hidratação prévia pode influenciar o comportamento da alumina no sistema, incluindo sua participação limitada no processo de policondensação (Yusuf, 2023).

Ao comparar metacaulim e pó de vidro como precursores geopoliméricos, observa-se que o primeiro tende a formar matrizes mais homogêneas, devido à sua rede ordenada de aluminossilicatos. Em contrapartida, o pó de vidro, por sua alta amorficidade e presença significativa de óxidos alcalinos (Na_2O : 11%, K_2O : 0,56%), influencia diretamente a cinética da ativação alcalina e a evolução estrutural dos geopolímeros ao longo do tempo (Provis e Bernal, 2014). A dissolução parcial da sílica amorfa (SiO_2) do pó de vidro libera íons Si^{4+} , que participam da policondensação e da formação da matriz geopolimérica, promovendo o desenvolvimento do gel de aluminossilicatos. Esse processo pode aumentar a disponibilidade de silício reativo e melhorar a coesão estrutural, desde que haja um balanço adequado entre Si/Al e a alcalinidade da solução ativadora.

3.1.4.3 Difração de raios-X (DRX)

Na Figura 21 são apresentados os resultados do DRX dos materiais precursores na preparação dos geopolímeros: metacaulim, pó de vidro e alumina.

Figura 21 - DRX dos materiais precursores.



Fonte: Autor (2025).

O padrão de difração do metacaulim exibe picos característicos de quartzo ($2\theta = 26,66^\circ$), correspondentes a impurezas minerais remanescentes do material original. A conversão do caulim em metacaulim ocorre por meio da calcinação em temperaturas elevadas ($700\text{--}800^\circ\text{C}$), resultando na desidroxilação da caulinita por meio da remoção dos grupos hidroxila (OH^-) e consequente transformação da estrutura cristalina em amorfa (Slaný *et al.*, 2023). Os picos de quartzo identificados são atribuídos a impurezas naturais presentes no caulim original, como areia quartzosa ou outros componentes silicosos que permanecem inalterados durante o processo térmico, uma vez que o quartzo possui estabilidade térmica superior à temperatura de calcinação empregada. O fundo amorfo observado no difratograma confirma a efetiva transformação da caulinita em metacaulim, caracterizada pela perda da estrutura cristalina ordenada.

O pó de vidro, por sua vez, evidencia um halo amplo e sem características bem definidas ($2\theta = 15^\circ\text{--}40^\circ$), o que confirma sua estrutura predominantemente amorfa. Essa ausência de picos cristalinos distintos está em conformidade com a natureza desordenada dos materiais vítreos ricos em sílica. A estrutura amorfa do vidro de cal-soda resulta do resfriamento rápido, que impede o rearranjo atômico em uma fase cristalina, característica fundamental dos vidros inorgânicos (Shelby, 2005). No entanto, foi identificado um pico significativo de dióxido de silício (SiO_2), o que pode indicar uma contaminação do material durante o processo de moagem

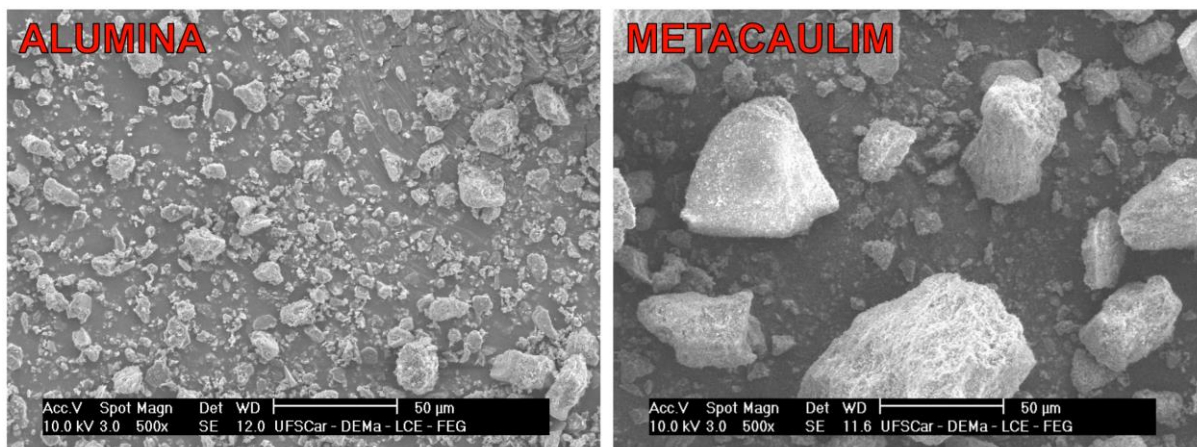
a seco. Essa contaminação pode ser atribuída ao desgaste das esferas de sílex utilizadas no moinho, que são compostas majoritariamente por SiO_2 .

O difratograma da alumina Alphasbond 300 revela uma estrutura essencialmente amorfa, evidenciada pela presença de um halo difuso característico, sem picos de difração bem definidos. Esse comportamento confirma a ausência significativa de fases cristalinas, consolidando a natureza altamente desordenada do material e sua elevada reatividade em ambientes úmidos ou alcalinos.

3.1.4.4 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

A Figura 22 demonstra as análises morfológicas realizadas por MEV do metacaulim e alumina e a Figura 23 as micrografias do pó de vidro.

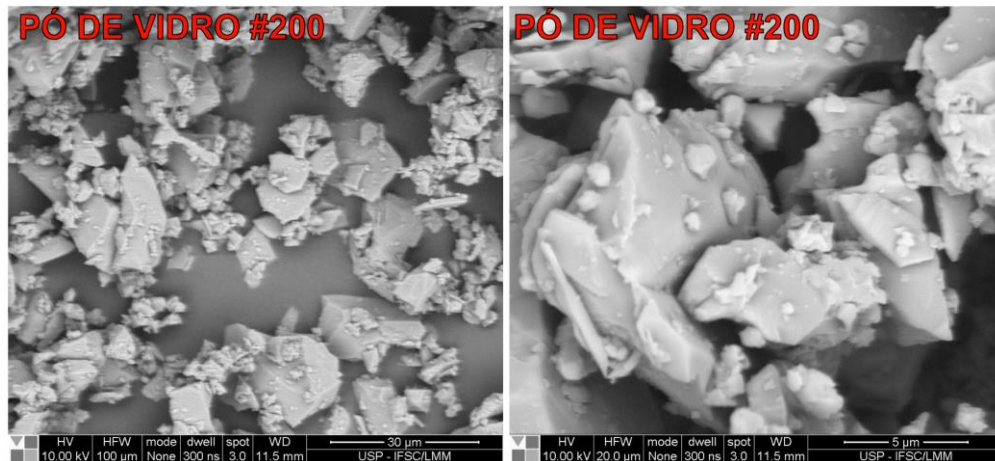
Figura 22 - Micrografias eletrônicas de varredura dos materiais precursores: comparação entre metacaulim e alumina amorfa sob ampliação de 500x.



Fonte: Autor (2025).

O metacaulim revela morfologia irregular e fragmentada, características que potencializam sua elevada reatividade em função da maior área superficial específica e da presença de alumínio e silício em estado amorfo. Essa estrutura desordenada favorece a dissolução dos elementos na solução ativadora, constituindo propriedade fundamental para a formação da matriz geopolimérica. Já a alumina hidratável apresenta partículas de dimensões menores com estrutura desordenada, característica típica de materiais em estado de transição, exibindo superfícies relativamente lisas. Composta predominantemente por óxido de alumínio, contribui para o incremento da resistência química e térmica da matriz geopolimérica, embora sua limitada solubilidade demande condições de alta alcalinidade para otimizar sua reatividade.

Figura 23 - Micrografias do pó de vidro em diferentes escalas: 30 μm e 5 μm .



Fonte: Autor (2025).

O pó de vidro exibe partículas angulosas com superfícies predominantemente lisas e distribuição granulométrica heterogênea, resultado do processo de cominuição do vidro reciclado. Sua composição rica em sílica permite atuar como fonte complementar de silicatos no sistema geopolimérico, embora sua efetividade dependa diretamente da granulometria e da área superficial específica disponível. Dessa forma, o metacaulim apresenta características morfológicas e químicas que favorecem sua participação no processo geopolimérico, o pó de vidro pode contribuir como fornecedor adicional de sílica, e a alumina atua na modificação da relação Si/Al e no aprimoramento das propriedades do material final.

3.1.5 Silicato de Sódio e Hidróxido de Sódio

O ativador alcalino utilizado nesta pesquisa é uma combinação de soluções de hidróxido de sódio (NaOH), silicato de sódio alcalino e água. O silicato de sódio, por sua vez, utilizado é da marca Unaprosil e apresenta como componentes principais Na_2O (26,59%) e SiO_2 (56,41%), resultando em uma relação entre SiO_2 e Na_2O de 2,12. Além disso, o produto possui uma densidade aparente de 572,91 g/l e um pH de 12,57 (Unaprosil, 2022). O hidróxido de sódio utilizado foi adquirido da empresa Cromoline Química Fina LTDA, e possui uma pureza de 98% (Cromoline, 2022). Ambas foram utilizadas na forma de escamas (grau de pureza comercial).

3.1.6 Agregado miúdo

Utilizou-se areia quartzosa natural como agregado miúdo, proveniente da região de São Carlos, previamente peneirada e com dimensão máxima característica de 2,4 mm. Os ensaios de caracterização do material e seus resultados correspondentes, juntamente com as normas de metodologia de ensaio, estão detalhados na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização física do agregado miúdo.

Ensaio	Norma	Valores característicos
Absorção de água (%)	ABNT NBR 17054 (2022)	0,81
Massa específica (g/cm ³)	ABNT NBR 16916 (2021)	2,63
Massa unitária seca solta (g/cm ³)	ABNT NBR 16972 (2021)	1,61
Massa unitária compactada (g/cm ³)	ABNT NBR 16972 (2021)	1,71
Impurezas orgânicas	ABNT NBR 17053 (2022)	Solução mais clara que a Solução Padrão
Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 µm, por lavagem (%)	ABNT NBR 16973 (2021)	1,15

Nota: Ensaios realizado pelo grupo de pesquisa vinculado ao Laboratório de Materiais e Componentes do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar.

Fonte: Autor (2025).

A composição química do agregado miúdo utilizado, determinada por meio de FRX, é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição química do agregado miúdo.

Componentes	Valores obtidos (% em massa)
Dióxido de silício (SiO ₂)	94,00
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	3,40
Óxido de potássio (K ₂ O)	1,20
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	0,67
Perda ao fogo (PF)	0,58
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,37
Dóxido de titânio (TiO ₂)	0,35
Óxido de cálcio (CaO)	0,071
Óxido de Cromo (Cr ₂ O ₃)	0,049
Óxido de tório (ThO ₂)	< 0,01
Óxido de urânio (U ₃ O ₈)	< 0,01
Perda ao fogo (PF)	0,58

Fonte: Freitas (2019).

Encontra-se na Tabela 11 a distribuição granulométrica determinada pelo percentual de material retido e acumulado, bem como a dimensão máxima característica (D_{máx}) de 2,4 mm e o módulo de finura (MF) de 1,99 do agregado miúdo, sendo classificado como areia fina.

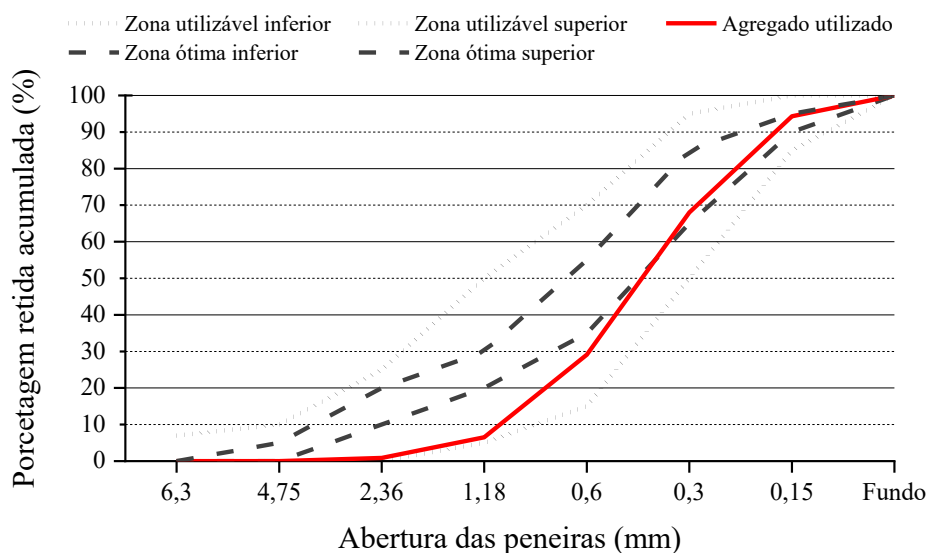
Tabela 11 - Composição granulométrica do agregado utilizado.

Peneira (mm)	Porcentagem Retida (%)	Porcentagem acumulada (%)
4,75	0,00	0,00
2,36	0,86	0,86
1,18	5,67	6,53
0,60	22,57	29,10
0,30	38,91	68,01
0,15	26,29	94,30
Fundo	5,70	100,00
Módulo de Finura (MF)		1,99
Diâmetro Máximo (D_{máx})		2,4 mm

Fonte: Autor (2025).

A curva granulométrica da areia, representada pela porcentagem retida acumulada na Figura 24, evidencia uma distribuição não uniforme, com predominância de frações finas.

Figura 24 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autor (2025).

No intervalo entre 2,36 mm e o fundo, observa-se maior inclinação da curva a partir da peneira de 1,18 mm, indicando concentração significativa de partículas nesta faixa granulométrica e nas frações mais finas. Essa característica demonstra que a areia apresenta proporção significativa de grãos médios a finos, com concentração ainda maior de partículas muito finas (diâmetro < 0,6 mm).

3.1.7 Fibra metálicas

As fibras empregadas foram de aço carbono oriundas arames trefilados a frio, de formato reto e sem ancoragem, apresentando um diâmetro de 0,20 mm e um comprimento de 13 mm

(fator de forma igual a 65), classificadas como “Tipo R” conforme a norma NBR 15530 (ABNT, 2019). As especificações detalhadas das fibras metálicas foram fornecidas pelo fabricante Belgo Bekaert Arames e são comercializadas com a nomenclatura Dramix® OL 13/.20, conforme demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades da fibra de aço.

Propriedade	Dimensão
Comprimento - L_f (mm)	13
Diâmetro - df (mm)	0,2
Resistência à tração (N/mm ²)	2.750
Módulo de Elasticidade (N/mm ²)	200.000
Fator de forma (λ)	65
Massa específica (g/cm ³)*	7,95

Nota: *Dias (2022).

Fonte: Dramix (2024).

3.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

A partir da caracterização dos materiais, foi possível definir a composição das argamassas por meio do balanço estequiométrico. A formulação adotada está alinhada a uma pesquisa em andamento com geopolímeros à base de metacaulim, na qual foram investigadas diferentes razões molares $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ (0,5; 1,0 e 1,5) e concentrações de Na_2O na solução alcalina (10%, 15% e 20%). Dessa forma, foram adotados esses parâmetros para todas as formulações deste estudo, mantendo-se também a razão molar MS ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) constante. Além disso, considerou-se que os materiais precursores (metacaulim, pó de vidro e alumina) apresentam reatividade total (100%) para os cálculos estequiométricos.

Com base em estudos prévios que demonstraram o teor ótimo de 20% de pó de vidro em concretos convencionais e ultra alto desempenho à base de cimento Portland (Omran; Tagnit-Hamou, 2016; Soares, 2021; Dias, 2022), adotou-se esta mesma proporção para substituição parcial do metacaulim nas formulações geopoliméricas investigadas. Considerando esses critérios, foram elaborados seis traços distintos de argamassas, variando-se a proporção em massa entre os materiais precursores — metacaulim (MC) e pó de vidro (PV), a adição de alumina (AL) — e a incorporação de fibras metálicas em diferentes teores volumétricos, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Nomenclatura adotada para as argamassas geopoliméricas estudadas.

Nomenclatura	Composição
MC100-PV0	Traço referência à base de metacaulim como material precursor, 0% de pó de vidro, agregado miúdo, solução ativadora (hidróxido de sódio e silicato de sódio), água (a/agl: 0,4) e adição de 0% de fibra de aço
MC100-PV0-FM1.0	Traço à base de metacaulim como material precursor, 0% de pó de vidro, agregado miúdo, solução ativadora (hidróxido de sódio e silicato de sódio), água (a/agl: 0,4) e adição de 1,0% de fibra de aço (em volume)
MC100-PV0-FM1.5	Traço à base de metacaulim como material precursor, 0% de pó de vidro, agregado miúdo, solução ativadora (hidróxido de sódio e silicato de sódio), água (a/agl: 0,4) e adição de 1,5% de fibra de aço (em volume)
MC100-PV0-FM2.0	Traço à base de metacaulim como material precursor, 0% de pó de vidro, agregado miúdo, solução ativadora (hidróxido de sódio e silicato de sódio), água (a/agl: 0,4) e adição de 2,0% de fibra de aço (em volume)
MC80-PV20-AL	Traço à base de metacaulim como material precursor, substituição em massa do metacaulim por 20% de pó de vidro, alumina amorfa como adição, agregado miúdo, solução ativadora (hidróxido de sódio e silicato de sódio), água (a/agl: 0,4).
MC80-PV20-AL-FM2.0	Traço à base de metacaulim como material precursor, substituição em massa do metacaulim por 20% de pó de vidro, alumina amorfa como adição, agregado miúdo, solução ativadora (hidróxido de sódio e silicato de sódio), água (a/agl: 0,4) e adição de 2% de fibra de aço (em volume)

Fonte: Autor (2025).

O traço de referência, denominado MC100-PV0, foi formulado apenas com metacaulim como precursor, sem adição de pó de vidro nem fibras metálicas. A partir dessa formulação base, foram desenvolvidas três variações com incorporações de fibras de aço em teores de 1,0%, 1,5% e 2,0% em volume (MC100-PV0-FM1.0, MC100-PV0-FM1.5 e MC100-PV0-FM2.0, respectivamente). Adicionalmente, duas formulações com substituição de 20% do metacaulim por pó de vidro foram preparadas: MC80-PV20-AL, com adição de alumina amorfa e sem fibras metálicas, e MC80-PV20-AL-FM2.0, com 2,0% de fibras de aço em volume. As formulações, suas dosagens e os parâmetros de ativação estão detalhados na Tabela 13. O termo 'FM', seguido pelo número, refere-se ao percentual de fibra de aço em volume presente na mistura,

Tabela 13 - Formulações das argamassas e pastas geopoliméricas a serem estudadas.

Traço	Razão molar SiO ₂ /Na ₂ O	MC:PV ¹	Concentração de Na ₂ O (%) na solução ativadora	% de fibras de aço (em volume)
MC100-PV0	1,5	100:00	15	0
MC100-PV0-FM1.0	1,5	100:00	15	1,0
MC100-PV0-FM1.5	1,5	100:00	15	1,5
MC100-PV0-FM2.0	1,5	100:00	15	2,0
MC80-PV20-AL	1,5	80:20	15	0
MC80-PV20-AL-FM2.0	1,5	80:20	15	2,0

Nota: ¹ Razão em massa de Metacaulim e Pó de vidro

Fonte: Autor (2025).

A seleção dos parâmetros molares adotados neste estudo foi realizada com base nas faixas ótimas identificadas na literatura. A razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ foi fixada entre 3,5 e 4,0, visando maximizar a resistência mecânica e a estabilidade térmica. A razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ foi estabelecida na faixa ideal de 0,6-1,20, para assegurar a formação de uma matriz coesa e minimizar a presença de álcalis residuais. A relação $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ foi mantida inferior a 12, a fim de controlar a porosidade.

3.2.1 Balanço estequiométrico

Inicialmente, estabeleceu-se uma quantidade mínima de 100 g de material precursor para o traço de referência (100% de metacaulim). A partir do teor de silicatos solúveis (MS) igual 1,5 e 15% de Na_2O de porcentagem presente na solução ativadora, calculou-se a quantidade em gramas do silicato de sódio necessária pela Equação 1 a seguir:

$$\text{Massa}(\text{Na}_2\text{SiO}_3) = \frac{\text{Teor}(\text{MS}) * \% \text{Na}_2\text{O}}{\% \text{SiO}_2(\text{Na}_2\text{SiO}_3)} = \frac{1,5 * 15}{0,56} = 40,18 \text{ g} \quad (1)$$

Em que:

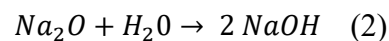
$\text{Massa}(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$ é a massa de silicato de sódio necessária (g);

$\text{Teor}(\text{MS})$ é o teor de silicatos solúveis;

$\% \text{Na}_2\text{O}$ é a porcentagem de Óxido de sódio presente na solução ativadora (%);

$\% \text{SiO}_2(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$ é a porcentagem de dióxido de silício presente no silicato de sódio (%).

Da massa total obtida do silicato de sódio, 22,5 g são de dióxido de silício de acordo com a sua composição e 10,85 g são de óxido de sódio. Para complementar a parcela restante do óxido de sódio da solução ativadora igual a 15%, foi necessário adicionar 4,15 g de óxido de sódio. Tal parcela é proveniente do hidróxido de sódio (considerou-se sua pureza de 100%) que foi necessário adicionar 5,35 gramas de hidróxido de sódio, conforme calculado pelas Equações 2 e 3:



$$\text{Massa}_{eq.}(\text{NaOH}) = \frac{\text{massa}(\text{Na}_2\text{O}) * 2}{\text{MM}(\text{Na}_2\text{O})} * \text{MM}_{(\text{NaOH})} = \frac{4,15 * 2}{62} * 40 = 5,355 \cong 5,35 \text{ g} \quad (3)$$

Em que:

$\text{Massa}_{eq.}(\text{NaOH})$ é massa equivalente de hidróxido de sódio;

$\text{massa}(\text{Na}_2\text{O})$ é massa do óxido de sódio proveniente do hidróxido de sódio;

$\text{MM}(\text{Na}_2\text{O})$ é a massa molar do óxido de sódio equivalente a 62 g/mol;

$\text{MM}_{(\text{NaOH})}$ é a massa molar do hidróxido de sódio equivalente a 40 g/mol;

$Na_2O + H_2O \rightarrow 2 NaOH$ é a equação química de balanceamento.

Dessa maneira, chegou-se na seguinte proporção para obtenção do traço de referência (MC100-PV0):

100 g Metacaulim : 40,18 g Silicato de Sódio : 5,35 g Hidróxido de sódio : 40 g de Água

Para a formulação com incorporação de 20% de pó de vidro, essa porcentagem foi considerada como substituição em massa ao material precursor. A fim de manter constante a razão molar SiO_2/Al_2O_3 , foi realizada a adição complementar de alumina hidratada. Dessa forma, para o dimensionamento das proporções em massa de cada programa experimental, adotou-se a seguinte referência para cada 100 g de material precursor (Tabela 14):

Tabela 14 - Quantidade de material para produção da argamassa a cada 100g de material precursor.

Traços	Material Precursor			Agregado	Solução Alcalina		
	Metacaulim (g)	Pó de vidro (g)	Alumina (g)	Areia (g)	Silicato de sódio (g)	Hidróxido de sódio (g)	Água (g)
MC100-PV0	100	0	0	100	40,18	5,36	40
MC80-PV20-AL	80	20	8,61	100	40,18	5,36	40

Fonte: Autor (2025).

Com base na formulação dos traços desenvolvidos, foram calculadas as molaridades dos principais óxidos formadores da estrutura geopolimérica, bem como as razões molares que regulam a reatividade do sistema e a formação da rede tridimensional aluminossilicática. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar o equilíbrio estequiométrico e o potencial de polimerização das misturas. A Tabela 15 apresenta os valores obtidos para os diferentes traços analisados, permitindo uma comparação direta entre o traço de referência (MC100-PV0) e aquele com substituição parcial do metacaulim por pó de vidro e adição de alumina (MC80-PV20-AL).

Tabela 15 - Molaridades e razões molares das argamassas geopoliméricas estudadas.

Traço	Molaridades (mol)			Razões Molares			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	M ₂ O (Na ₂ O)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	Na ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/Na ₂ O
MC100PV0	1,323	0,377	0,003	3,511	0,642	0,183	9,174
MC80PV20-AL	1,38	0,393	0,039	3,511	0,642	0,14	9,174

Fonte: Autor (2025).

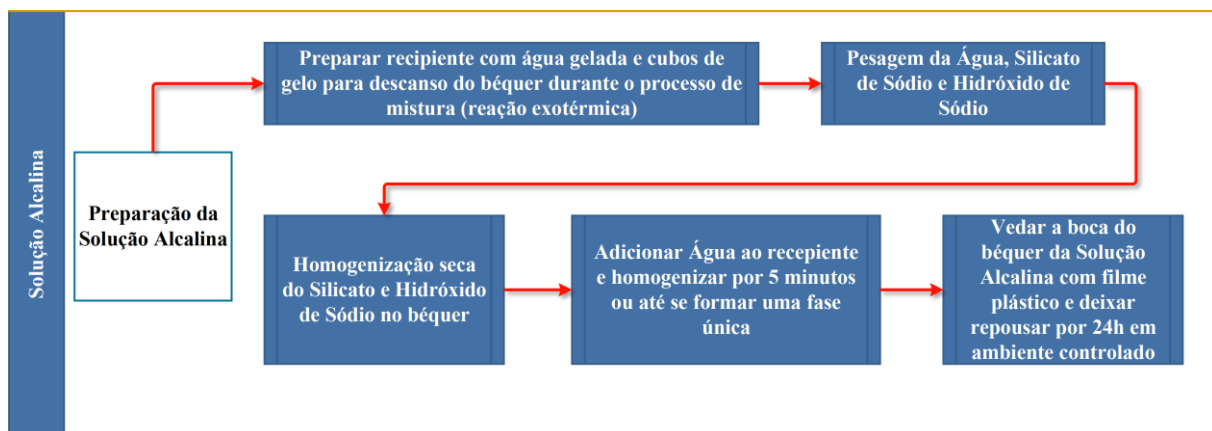
3.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O procedimento adotado envolve a preparação da solução alcalina e a subsequente mistura dos materiais secos com essa solução para obter as argamassas geopoliméricas, isto é,

o processo de mistura foi realizado em duas etapas distintas. O método de preparação da solução seguiu o mesmo padrão para todos os traços, independentemente da presença de fibras metálicas. No entanto, durante a etapa de mistura da solução alcalina com os materiais secos, para as argamassas geopoliméricas que continham fibras de aço, foi necessário aumentar o tempo de mistura em 2 minutos em comparação com as argamassas geopoliméricas sem fibras.

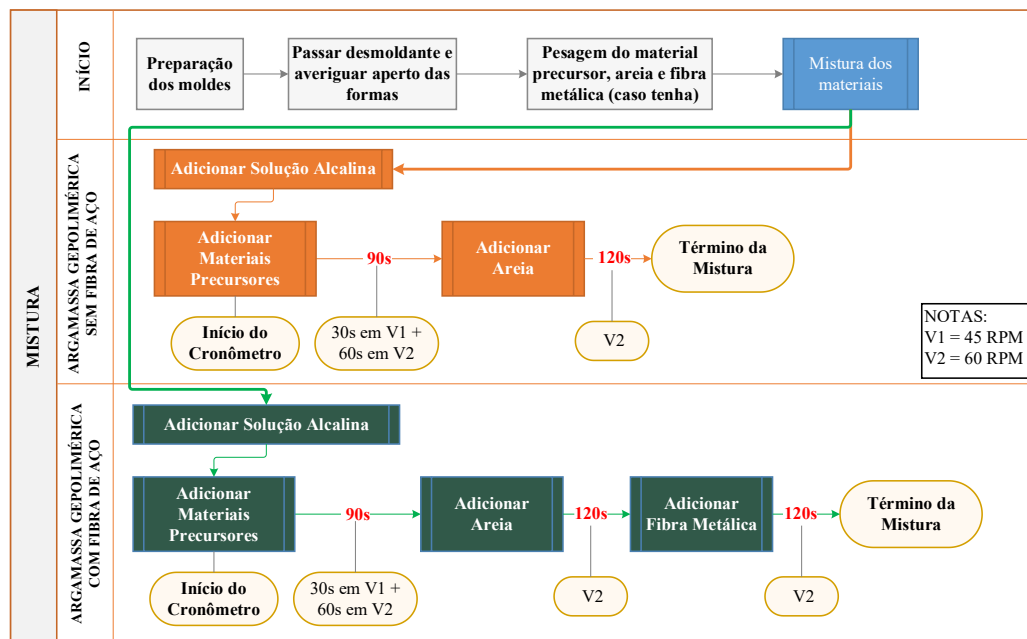
Inicialmente, os materiais da solução alcalina, que incluem hidróxido de sódio e silicato de sódio, foram pesados. Em seguida, esses materiais foram combinados a seco e a água foi adicionada ao recipiente apropriado (béquer) contendo esses componentes, iniciando assim o processo de mistura. A mistura dos componentes foi realizada manualmente por aproximadamente 5 minutos, assegurando a completa dissolução e formação de uma fase homogênea. Para equilibrar a temperatura do recipiente, uma vez que a reação que ocorre durante a mistura é exotérmica, o béquer foi colocado sobre uma lâmina d'água, dissipando calor para o ambiente. Em seguida, o béquer foi vedado e deixado em repouso por 24 horas. O resumo da preparação das misturas para solução alcalina e da moldagem dos corpos de prova são apresentados, respectivamente, nas Figura 25 e 26.

Figura 25 - Procedimento do preparo da solução alcalina.



Fonte: Autor (2025).

Figura 26 - Procedimento geral de mistura das argamassas geopoliméricas com e sem fibra de aço.



Nota: As velocidades de rotação V1 e V2 são, respectivamente, 45 RPM e 60 RPM.

Fonte: Autor (2025).

Posteriormente, os materiais secos são misturados com a solução alcalina na argamassadeira planetária (capacidade de 5 L), conforme ilustrado na Figuras 27 (a) e (b).

Figura 27 - Processo de mistura: (a) materiais prontos para serem misturados; (b) argamassadeira utilizada no procedimento.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2025).

Os corpos de prova prismáticos com dimensões de (40×40×160) mm foram moldados em duas camadas, com adensamento por vibração durante 1 minuto em mesa vibratória. Os corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50×100 mm foram moldados em duas camadas,

enquanto os de 100×200 mm foram moldados em três camadas, ambos com adensamento por vibração durante 1 minuto.

3.4 CURA DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram curados em temperatura ambiente controlada de $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$. Imediatamente após a moldagem, as amostras foram cobertas com filme plástico por 48 horas, conforme ilustrado na Figura 28. Após esse período, realizou-se a desmoldagem dos corpos de prova, que foram envolvidos com filme plástico e acondicionados em recipiente, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 28 - Moldes prismáticos selados com filme plástico após a moldagem.



Fonte: Autor (2025).

Figura 29 - Recipiente utilizado para armazenamento dos corpos de prova prismáticos.



Fonte: Autor (2025).

O controle da temperatura ambiente foi realizado por meio de um aparelho de ar-condicionado com a temperatura ajustada para 23°C . Os corpos de prova permaneceram armazenados nesse ambiente até a data dos ensaios.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS

O programa experimental para caracterização das argamassas geopoliméricas compreendeu os ensaios especificados na Tabela 16.

Tabela 16 - Ensaios para caracterização das argamassas geopoliméricas.

Característica	Estado	Metodologia	CPs (unidade)	Formato e dimensão dos CPs	Idade (dias)
Índice de Consistência (<i>flow table</i>)	Fresco	NBR 13276 (ABNT, 2016)	1 verificação	-	-
Resistência à compressão axial (MPa)	Endurecido	NBR 13279 (ABNT, 2005)	6	Prismático 40x40x160 mm	28
Resistência à tração na flexão (MPa)	Endurecido	NBR 13279 (ABNT, 2005)	6	Prismático 40x40x160 mm	28
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Endurecido	NBR 7222 (ABNT, 2011)	3	Cilíndrico 50x100 mm	28
Resistência à tração por duplo puncionamento (MPa)	Endurecido	NBR 16939 (ABNT, 2021)	4	Cilíndrico 100x100 mm	28
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Endurecido	ASTM E1876 (2022)	6	Prismático 40x40x160 mm	28
Densidade de massa aparente	Endurecido	NBR 13280 (ABNT, 2005)	6	Prismático 40x40x160 mm	28

Fonte: Autor (2025).

Para a caracterização microestrutural e química das argamassas desenvolvidas, empregaram-se técnicas de MEV para análise morfológica, DRX para identificação de fases cristalinas e FTIR para avaliação dos grupos funcionais.

3.5.1 Índice de Consistência (*flow table*)

A determinação do índice de consistência das argamassas produzidas seguiu o procedimento descrito na NBR 13276 (2016), utilizando a aparelhagem especificada na norma NBR 7215 (2019). Este ensaio visou avaliar a consistência das argamassas geopoliméricas em análise, as quais incluíam a incorporação de pó de vidro e diferentes teores de fibra metálica. Para a realização do ensaio, foram empregados: uma mesa para índice de consistência (*flow table*), um molde tronco cônico, um paquímetro, um soquete metálico e uma régua metálica.

O procedimento consistiu em preencher o molde tronco cônico em três camadas, cada uma com altura aproximadamente igual, e aplicar quinze, dez e cinco golpes em cada camada, respectivamente. Em seguida, o molde foi removido e a manivela da mesa foi acionada,

aplicando-se 30 golpes em 30 segundos. Posteriormente, foram realizadas três medições do diâmetro (Figura 30) e o valor adotado foi a média dos resultados obtidos.

Figura 30 - Determinação do índice de consistência das argamassas geopoliméricas reforçadas com fibra: amostra do traço MC80PV20-AL-FM2.0.



Fonte: Autor (2025).

3.5.2 Propriedades mecânicas

3.5.3 Resistência à tração na flexão e compressão axial (MPa)

Foram conduzidas análises das resistências à tração na flexão e à compressão axial de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2019) aos 28 dias. Os corpos de prova oriundos do ensaio de resistência à tração na flexão de dimensões (40 x 40 x 160) mm foram rompidos na Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade de carga de 600 kN. A Figura 31 fornece uma ilustração durante o ensaio de resistência à tração na flexão.

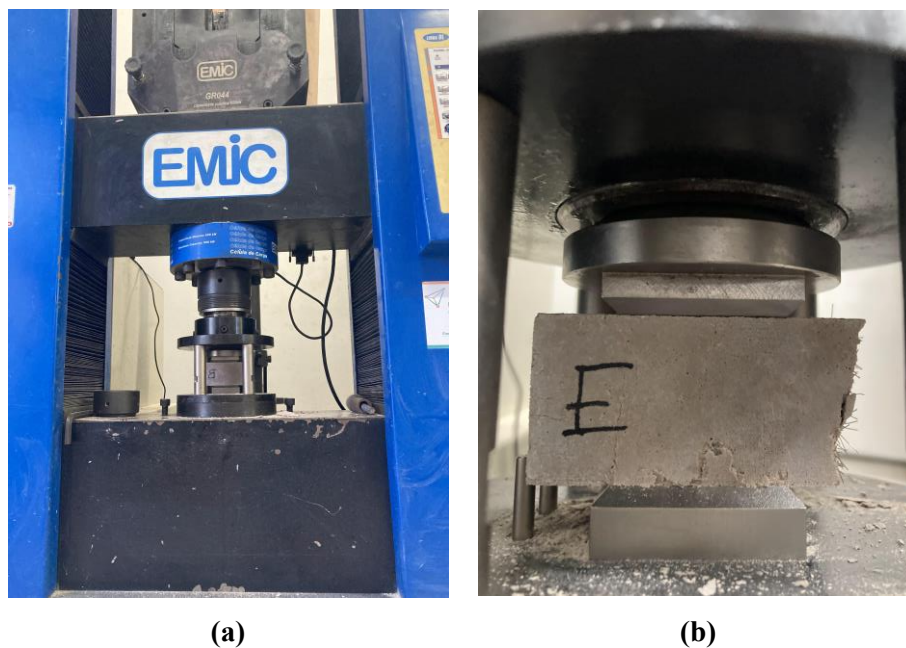
Figura 31 - Aparato e corpo de prova durante ensaio de determinação de resistência à tração na flexão em 3 pontos.



Fonte: Autor (2025).

Posteriormente, após o ensaio de tração na flexão em 3 pontos, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial com cada parte remanescente de cada amostra ensaiada à tração (Figura 32).

Figura 32 - Aparato e corpo de prova durante ensaio de determinação de resistência à compressão axial: (a) visão geral; (b) detalhe do corpo de prova.



Fonte: Autor (2025).

Na metodologia adotada, foram seguidos os procedimentos estabelecidos na NBR 13279 (ABNT, 2019) como referência para os ensaios de resistência mecânica, contudo, com adaptações específicas para o material estudado. Ao contrário do procedimento original da norma, não foram descartadas amostras que apresentaram Desvio Absoluto Máximo superior a 0,5 MPa no ensaio de resistência à compressão axial, nem aquelas com desvio superior a 0,3 MPa no ensaio de resistência à tração na flexão, mantendo-se todas as amostras para a apresentação dos resultados. Essa adaptação se justifica pelo fato de que o material em análise é um geopolímero, o qual, aliado aos ensaios experimentais envolvendo reforço de fibra, demanda a flexibilização dos índices de desvio adotados para garantir uma avaliação abrangente e representativa do comportamento mecânico dos compósitos estudados.

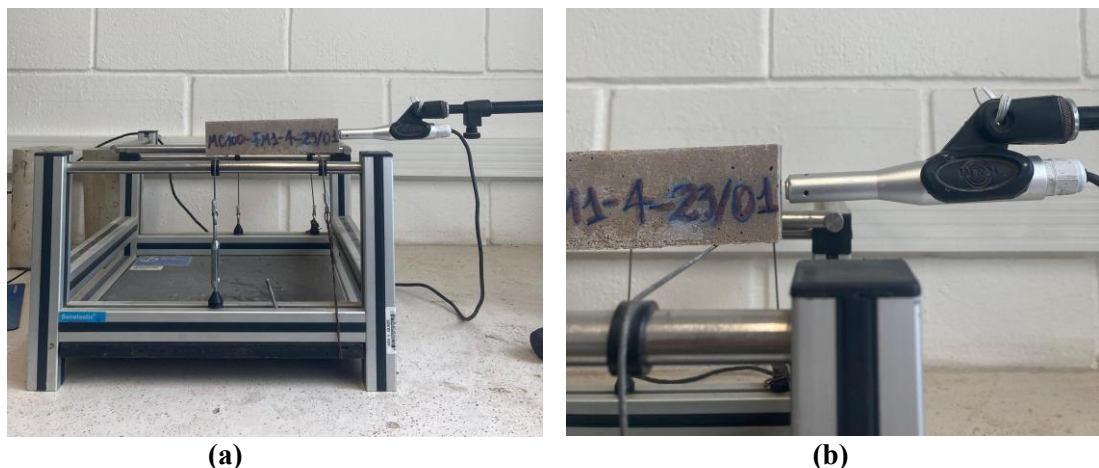
3.5.4 Módulo de elasticidade dinâmico e densidade de massa no estado endurecido

O procedimento para determinar o módulo de elasticidade dinâmico é um teste não destrutivo que utiliza a propagação de ondas longitudinais, geradas por pulsos ultrassônicos,

conforme especificado nas normas ASTM C215-19 (2019) e ASTM E1876-22. Este ensaio foi conduzido no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade de São Paulo, campus de São Carlos, com leituras realizadas em corpos de prova com uma idade específica na máquina de ensaio Sonelastic[®]. Os parâmetros base utilizados incluíram uma razão de Poisson de $0,20 \pm 0,05$ e um filtro de detecção entre 0,5 e 20 kHz. Para determinar a massa aparente no estado endurecido, foi seguida a norma ABNT NBR 13280 (2005), utilizando-se uma balança com resolução de 0,1 g. Ademais, as medidas do corpo de prova foram obtidas com o uso de um paquímetro digital.

Inicialmente, as amostras foram pesadas e posicionadas no dispositivo de teste, conforme ilustrado na Figura 33, enquanto o microfone foi ativado para registrar a frequência natural dos corpos de prova. A excitação do corpo de prova foi realizada por meio de uma haste, aplicando-se o impulso em uma extremidade e captando-o do outro lado para ondas longitudinais, ou no centro para ondas flexionais, permitindo assim a obtenção da frequência fundamental. No presente estudo, o cálculo do módulo de elasticidade foi realizado com base no modo de vibração para ondas longitudinais. Portanto, utilizando o software do equipamento ATCP Sonelastic[®], e considerando as dimensões e a massa do corpo de prova, foram calculados os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos.

Figura 33 - Aparato com corpo de prova durante ensaio de determinação de módulo de elasticidade dinâmico longitudinal: (a) visão geral; (b) microfone posicionado na extremidade do corpo de prova.



Fonte: Autor (2025).

3.5.5 Densidade de massa no estado endurecido

Para a determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, seguiu-se a metodologia prescrita pela NBR 13280 (ABNT, 2005). O procedimento consistiu em pesar os

corpos de prova secos em balança com resolução de 0,1 g e determinar o volume a partir das dimensões medidas, conforme especificado na norma, expressando o resultado em g/cm^3 .

3.5.6 Resistência à tração por compressão diametral

Foram realizadas análises de resistência à tração por compressão diametral de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022), utilizando corpos de prova com dimensões de 50 x 100 mm. Os ensaios foram conduzidos na Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade de carga de 600 kN, no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE-DECiv). Para cada formulação, foi testado um conjunto de três amostras, todas na idade de 28 dias. A Figura 34 ilustra o procedimento durante o ensaio de tração por compressão diametral.

Figura 34 - Corpo de prova durante ensaio de determinação de resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Autor (2025).

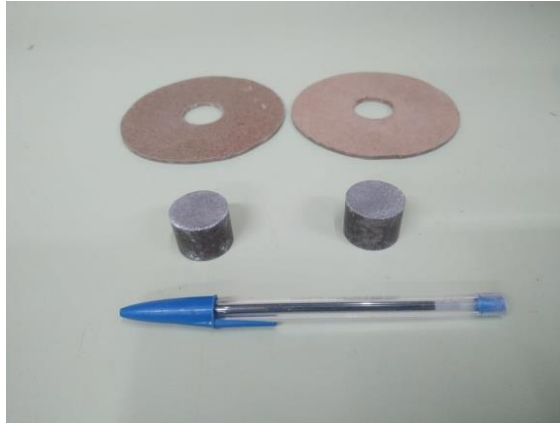
3.5.7 Módulo de resistência residual à tração (Barcelona)

A determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento dos geopolímeros foi realizada conforme as diretrizes da NBR 16939 (ABNT, 2021), na idade de 28 dias. Para esse propósito, foram confeccionados corpos de prova com 100 mm de diâmetro (d) e 200 mm de altura (H). Posteriormente, as amostras foram seccionadas ao meio, resultando em espécimes com 100 mm de diâmetro (d) e 100 mm de altura (H), mantendo a relação $d=H$ e atendendo à dimensão mínima recomendada pela NBR 16939 (ABNT, 2021).

Segundo Monte (2015), a utilização de corpos de prova menores no ensaio Barcelona possibilita o emprego de máquinas de ensaio com menor capacidade, uma vez que as cargas de

puncionamento geralmente não ultrapassam cerca de 100 kN (10 toneladas-força). O carregamento foi aplicado por meio de dois cilindros usinados em aço carbono, cujos discos possuíam 20 mm de altura e 25 mm de diâmetro. Para garantir o correto posicionamento dos cilindros e do espécime, os discos foram centralizados na face dos corpos de prova com o uso de placas de madeira (gabarito), conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35 - Discos de aço carbono e placas de madeira utilizadas como gabarito.



Fonte: Dias (2022).

A velocidade de deslocamento vertical adotada foi de 0,50 mm/min, e o ensaio é encerrado quando o deslocamento total medido atingiu 7 mm, assegurando os 4 mm mínimos de deslocamento vertical após a carga de fissuração (P_f), conforme especificado pela NBR 16939 (ABNT, 2021). Os corpos de prova foram testados na Máquina Universal de Ensaio EMIC, que possui capacidade de carga de 600 kN, como ilustrado na Figura 36.

Figura 36 - Ensaio de duplo puncionamento (EDP): aparato utilizado durante o ensaio: amostra 4 do MC100-PV0-FM1.0.



Fonte: Autor (2025).

3.5.7.1 Cálculo da resistência à tração por duplo puncionamento

Para a determinação da resistência à tração por duplo puncionamento (f_t), o parâmetro principal é a carga de fissuração (P_f). O cálculo da resistência à tração por duplo puncionamento (fissuração) foi realizado de acordo com a Equação 4 (ABNT NBR 16939, 2021).

$$f_t = \frac{4 * P_f}{9 * \pi * a * H} \quad (4)$$

Em que:

f_t é a resistência à tração por duplo puncionamento (fissuração) (MPa);

P_f é a carga que produz a fissuração (N);

a é o diâmetro do disco de aplicação da carga (mm);

H é a altura do corpo de prova (mm).

3.5.7.2 Cálculo das resistências residuais

O cálculo das resistências residuais (f_{R,δ_p}) para os diferentes níveis de deslocamento vertical (δ_p), contados a partir da carga de fissuração (P_f), foi realizado conforme a Equação 5.

$$f_{R,\delta_p} = \frac{4 * P_f}{9 * \pi * a * H} \quad (5)$$

Dessa forma,

f_{R,δ_p} é a resistência residual correspondente a um deslocamento vertical δ_p (MPa);

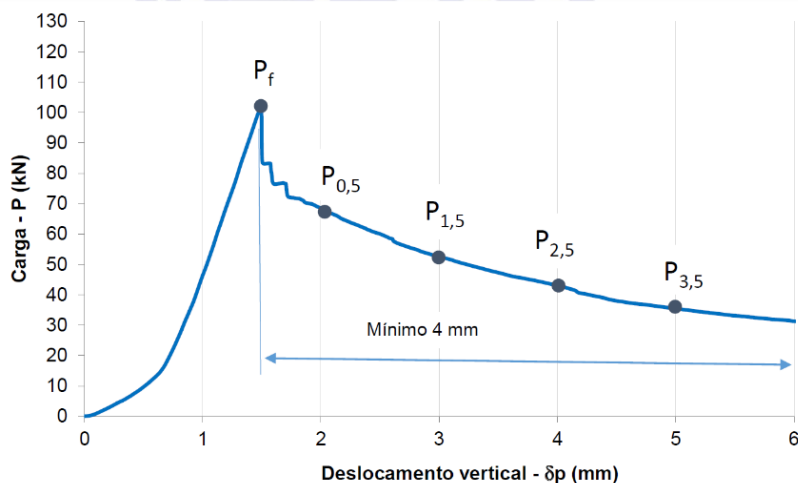
P_{R,δ_p} é a carga residual correspondente a um deslocamento vertical δ_p (N);

a é o diâmetro do disco de aplicação da carga (mm);

H é a altura do corpo de prova (mm).

Os valores das resistências residuais foram determinados mediante 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm e 4,0 mm de deslocamento vertical pós-fissuração (δ_p), conforme apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Níveis de deslocamento adotados para a verificação das resistências residuais.



Fonte: NBR 16939 (ABNT, 2021)

3.5.7.3 Cálculo da tenacidade (energia total)

A determinação da tenacidade como energia total absorvida durante o ensaio, expressa em joules (J), foi calculada mediante a área abaixo da curva de carga (P) por deslocamento vertical (δ_p) após a carga de fissuração (P_f). Para o cálculo da tenacidade, foi utilizado o software OriginPro®.

3.6 Análise Estatística dos Resultados

Os resultados dos ensaios realizados nas argamassas geopoliméricas foram submetidos a uma análise estatística conhecida como Análise de Variância (ANOVA), que é uma metodologia utilizada para comparar três ou mais tratamentos. Quando os dados apresentaram diferenças significativas, foi aplicado o teste de Tukey. A ANOVA é um procedimento estatístico que analisa se há diferença na distribuição de um valor entre três ou mais grupos, utilizando a decomposição da soma dos quadrados para cada fonte de variação no modelo.

O teste F de Fisher-Snedecor é realizado para testar a hipótese de que não há fonte de variação entre as amostras, sendo:

H_0 - hipótese de não existência de diferença estatisticamente significativa

H_1 - hipótese de existência de pelo menos uma diferença estatisticamente significativa

A comparação do valor-p com o nível de significância α (no caso deste estudo, adotado como 5%) é feita para decidir se H_0 é aceita ou rejeitada. Para os casos em que H_0 foi rejeitada, o teste de Tukey foi realizado usando o software gratuito de análises estatísticas Past®.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

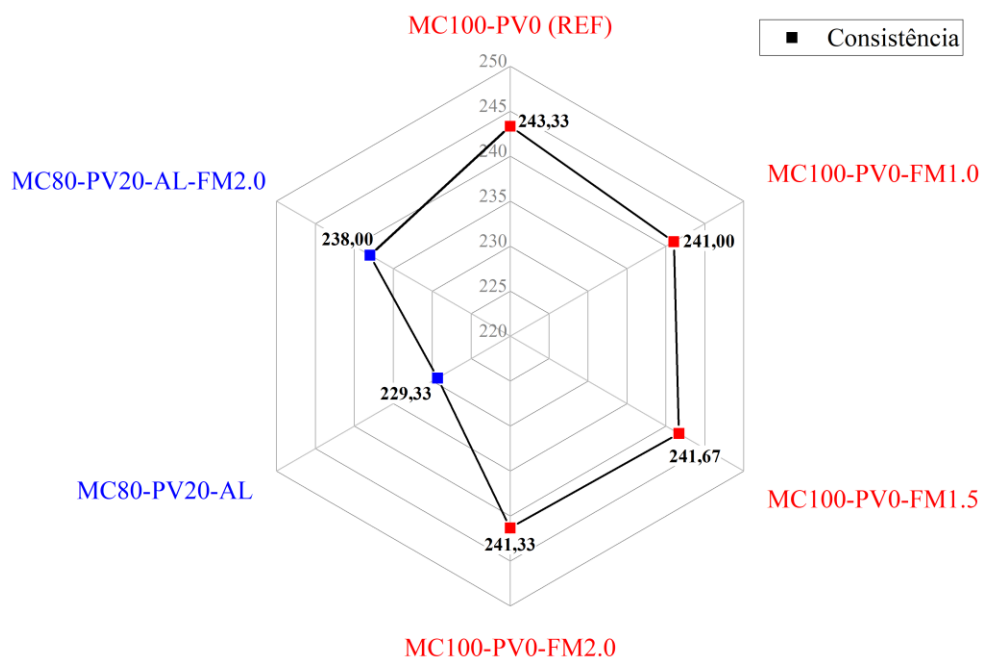
Neste capítulo, são apresentados os resultados das propriedades mecânicas das argamassas em estudo, incluindo as devidas análises estatísticas realizadas nesta pesquisa assim como a microestrutura.

4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.1.1 Índice de consistência (*flow table*)

A Figura 38 demonstra os índices de consistência determinados pelo ensaio de flow table para as composições analisadas, confrontados com o valor mínimo estabelecido (240 ± 10 mm). Todas as formulações mantiveram relação água/aglomerante fixa em 0,4, considerando como aglomerante o material precursor empregado.

Figura 38 - Índice de consistência das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor (2025).

As composições baseadas exclusivamente em metacaulim (MC100-PV0 e suas variações com reforço) apresentaram índices de consistência oscilando entre 241,00 mm e 243,33 mm. Nas formulações reforçadas com fibras de aço, observou-se que os índices de consistência permaneceram dentro do intervalo estabelecido (240 ± 10 mm), indicando que a presença das fibras não provocou alterações significativas nesse índice das argamassas. Este comportamento pode ser atribuído às características geométricas das fibras empregadas, que

apresentam superfície lisa e extremidades retas sem ancoragens, resultando em menor interferência mecânica com o fluxo da matriz durante o espalhamento.

Em relação à formulação com substituição parcial do metacaulim por pó de vidro e alumina (MC80-PV20-AL), o índice de consistência alcançou 229,33 mm. Este valor, embora discretamente no limite inferior da faixa alvo estabelecida (230-250 mm), pode ser considerado dentro da variabilidade experimental esperada. Esta redução discreta pode ser associada a fatores distintos: primeiramente, a menor área superficial específica do pó de vidro (BET de 0,681 m²/g) comparativamente ao metacaulim (BET de 15,798 m²/g) poderia favorecer maior espalhamento; entretanto, a elevada área superficial específica da alumina hidratável (BET de 186,058 m²/g) intensifica significativamente as interações entre partículas e consome parte da água disponível durante o processo de hidratação, reduzindo o líquido livre no sistema e influenciando o índice de consistência. Notavelmente, a incorporação de 2% de fibras de aço neste sistema (MC80-PV20-AL-FM2.0) elevou o índice para 238,00 mm, valor que retorna à faixa aceitável, resultado que pode estar relacionado ao maior tempo de mistura empregado, o qual favoreceu a homogeneização dos componentes e possivelmente a melhor dispersão da alumina no sistema com adição de fibras.

4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Resistência à tração na flexão

As resistências à tração na flexão das argamassas geopoliméricas aos 28 dias são apresentadas na Tabela 17, que inclui os resultados, variação percentual e a comparação estatística (Teste de Tukey) com o traço de referência (MC100-PV0). A Tabela 18 detalha os dados da análise estatística por meio do Teste de Tukey para comparação entre as formulações, enquanto a Figura 39 ilustra a comparação visual dos resultados.

Tabela 17 - Valores médios da resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas geopoliméricas e análise estatística preliminar (traço de referência: MC100-PV0).

Traços	Média (MPa)	VP ⁽¹⁾ (%)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
MC100-PV0	5,58	-	0,41	7,41	
MC100-PV0-FM1.0	10,05	80,15%	1,41	14,00	SIM
MC100-PV0-FM1.5	11,14	99,70%	0,91	8,14	SIM
MC100-PV0-FM2.0	15,43	176,69%	2,01	13,04	SIM
MC80-PV20-AL	4,44	-20,39%	0,74	16,76	NÃO
MC80-PV20-AL-FM2.0	12,50	124,08%	0,81	6,48	SIM

Nota: ⁽¹⁾ VP (%) indica a variação percentual da média da formulação analisada em relação ao traço de referência MC100-PV0.

Fonte: Autor (2025).

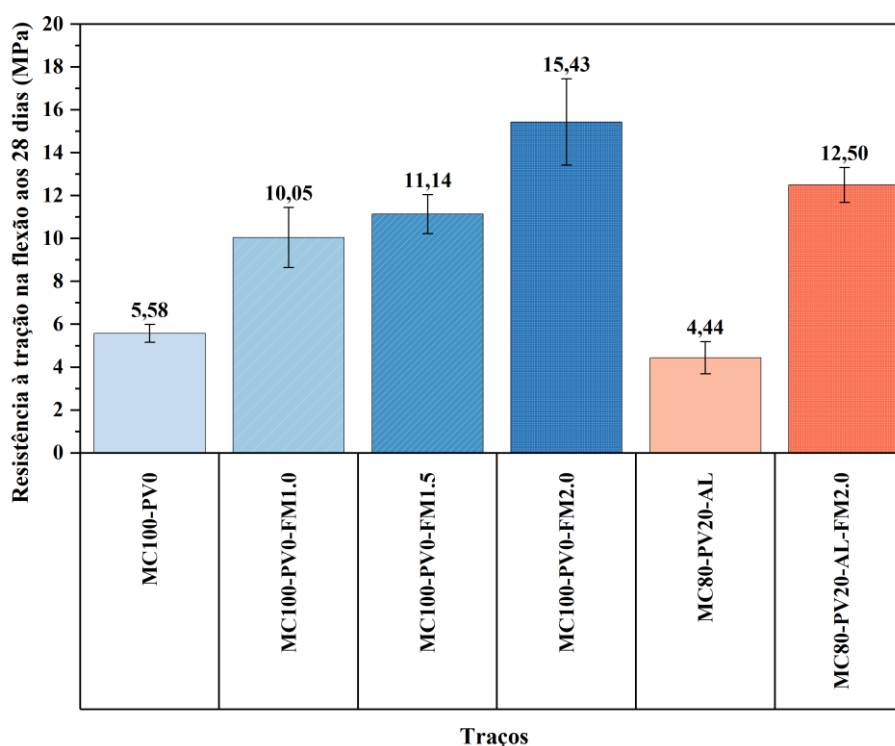
Tabela 18 - Detalhamento do Teste de Tukey para identificação de diferenças significativas entre as argamassas geopoliméricas no ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias.

Amostras	MC100-PV0	MC100-PV0-FM1.0	MC100-PV0-FM1.5	MC100-PV0-FM2.0	MC80-PV20-AL	MC80-PV20-AL-FM2.0
MC100-PV0		SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM
MC100-PV0-FM1.0			NÃO	SIM	SIM	SIM
MC100-PV0-FM1.5				SIM	SIM	NÃO
MC100-PV0-FM2.0					SIM	SIM
MC80-PV20-AL						SIM

Nota: Diferença não significativa ($p \geq 0,05$); SIM = Diferença significativa ($p < 0,05$).

Fonte: Autor (2025).

Figura 39 - Comparação gráfica das resistências à tração na flexão aos 28 dias entre as formulações analisadas.



Fonte: Autor (2025).

A formulação de referência MC100-PV0 apresentou uma resistência média à tração na flexão de 5,58 MPa, servindo como base para comparação. A formulação MC100-PV0-FM1.0, com 1,0% de fibra de aço, atingiu 10,05 MPa, representando um aumento de 80,15%. Esse aumento substancial demonstra que as fibras metálicas são altamente eficazes em resistir e controlar a propagação de fissuras, especialmente em solicitações de tração e flexão, onde a matriz geopolimérica pura apresenta desempenho inferior e comportamento frágil.

Com o aumento da fração volumétrica de fibras para 1,5% (MC100-PV0-FM1.5) e 2,0% (MC100-PV0-FM2.0), as resistências à tração na flexão aumentaram para 11,14 MPa e 15,43

MPa, respectivamente, correspondendo a incrementos percentuais de 99,70% e 176,69%. Esses resultados evidenciam uma tendência de crescimento contínuo da resistência com o aumento do teor de fibras de aço. No entanto, também foi observado um aumento significativo no coeficiente de variação (CV), especialmente na formulação com 2,0% de fibras (CV = 13,04%). Esse comportamento pode ser atribuído a uma distribuição heterogênea das fibras, com a formação de acúmulos em pontos específicos da matriz. Esse fenômeno pode intensificar concentrações de tensões e gerar defeitos locais, agravados pela presença de bolhas de ar durante o processo de moldagem. Esses fatores resultam em uma maior variabilidade dos resultados, sobretudo na região central dos corpos de prova, onde a carga é aplicada, conforme ilustrado nas Figuras 40 (a) a (d) nos traços com fibra e Figuras 41 (a) e (b) nos traços sem reforço.

Por outro lado, a formulação MC80-PV20-AL, na qual 20% do metacaulim foi substituído por pó de vidro e adicionou-se alumina amorfa, apresentou uma resistência média à flexão de 4,44 MPa, correspondendo a uma redução de 20,39% em relação à matriz de referência. Apesar dessa diminuição, os valores obtidos foram estatisticamente equivalentes aos da formulação de referência. Esse desempenho pode estar relacionado às diferenças nas características físicas dos materiais precursores, especialmente a granulometria maior e a menor área superficial específica do pó de vidro (0,681 m²/g) em comparação ao metacaulim (15,798 m²/g), o que pode influenciar na interação entre partículas e a formação da matriz geopolimérica. A Figura 41 (b) indica diferenças qualitativas na morfologia da matriz desta formulação, sugerindo qualitativamente a presença de poros com dimensões aparentemente menores que o traço de referência. Além disso, essa formulação apresentou um coeficiente de variação elevado (CV = 16,76%), indicando significativa variabilidade nos resultados.

A adição de 2,0% de fibras de aço à formulação com pó de vidro (MC80-PV20-AL-FM2.0) resultou em um aumento significativo da resistência à tração na flexão, atingindo 12,50 MPa. Isso representa um incremento de 124,08% em relação à amostra de referência e de 181,48% em comparação com a formulação MC80-PV20-AL, considerando os valores médios absolutos. Esse resultado demonstra que as fibras de aço são capazes de compensar a perda de resistência causada pela adição de pó de vidro, melhorando substancialmente a capacidade da matriz de resistir a tensões de flexão. O coeficiente de variação dessa formulação (6,48%) foi o menor entre todas as formulações com fibras, sugerindo uma melhor homogeneização e menor influência de defeitos críticos.

Figuras 40 - Corpos de prova rompidos após o ensaio de tração na flexão e compressão aos 28 dias de idade: (a) MC100-PV-FM1.0; (b) MC100 PV-FM1.5; (c) MC100-PV-FM2.0; e (d) MC80-PV20-AL-FM2.0.



(a)



(b)



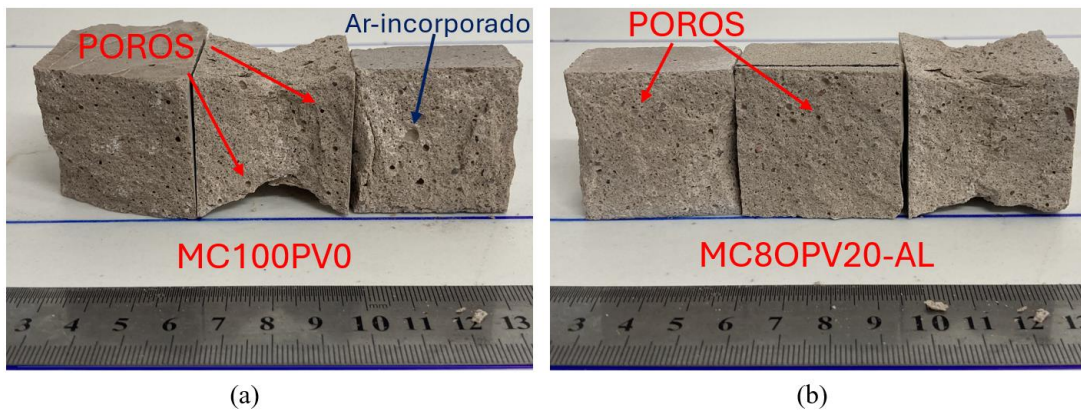
(c)



(d)

Fonte: Autor (2025).

Figuras 41 - Corpos de prova rompidos após o ensaio de tração na flexão e compressão aos 28 dias de idade: (a) amostra do MC100-PV0 e (b) amostra do MC80-PV20-AL.



Fonte: Autor (2025).

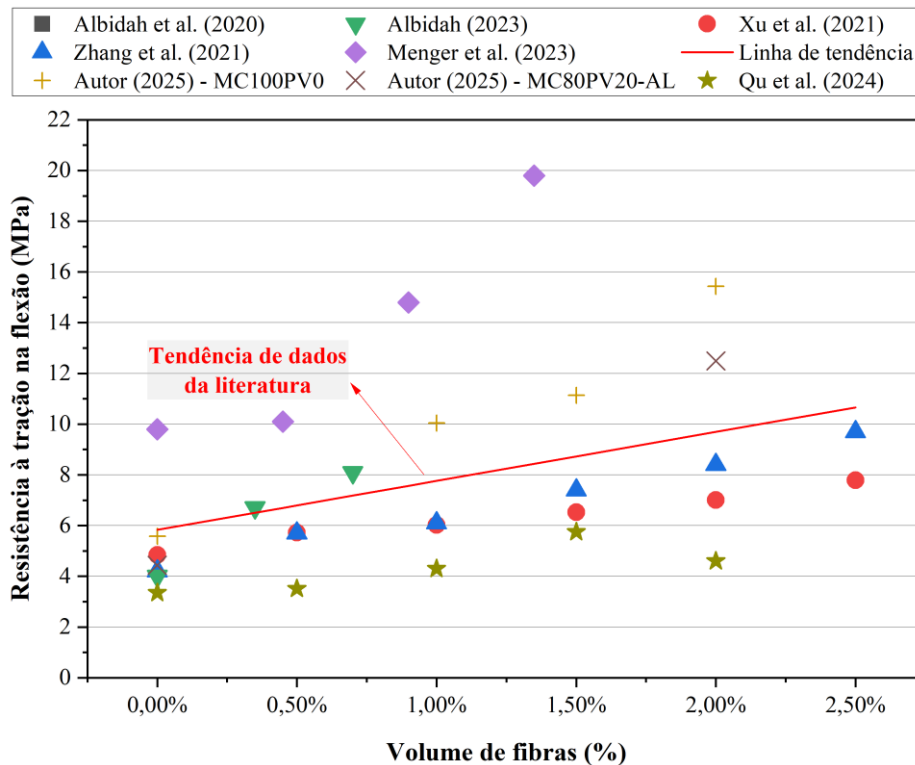
Comparando o desempenho das formulações com 2,0% de fibras de aço, observa-se que a MC100-PV0-FM2.0 apresentou resistência à tração na flexão de 15,43 MPa, superior aos 12,50 MPa da MC80-PV20-AL-FM2.0. Essa diferença evidencia que a matriz constituída exclusivamente por metacaulim apresenta desempenho mecânico superior, o que se reflete positivamente também no comportamento do compósito reforçado com fibras de aço. O melhor desempenho da formulação MC100-PV0-FM2.0 pode estar relacionado às características já discutidas do metacaulim, como maior área superficial específica e granulometria mais fina, que contribuem para a formação de uma matriz geopolimérica mais densa e, conseqüentemente, proporcionam melhor aderência às fibras metálicas.

Em síntese, a adição de fibras de aço nas formulações de geopolímeros se mostrou altamente eficaz na melhoria da resistência à tração na flexão, sendo o efeito mais acentuado nas matrizes puras de metacaulim. A variação dos resultados nas formulações com altos teores de fibras e com pó de vidro evidencia a importância de controlar defeitos críticos durante a produção, como a formação de bolhas de ar, para garantir a consistência e o desempenho mecânico adequado.

4.2.1.1 Relação Volume de fibras *versus* Resistência à tração na flexão

Para investigar a relação entre o volume de fibras e a resistência à tração, foram utilizados dados provenientes de estudos da revisão sistemática da literatura que empregaram, no mínimo, 50% de metacaulim como material precursor e reforço com fibra de aço. Na Figura 42, apresenta-se uma comparação entre os resultados da literatura e os obtidos no presente estudo, evidenciando a correlação entre o volume de fibras e a resistência à tração na flexão.

Figura 42 - Relação entre o volume de fibras e a resistência à tração na flexão aos 28 dias: comparação entre dados da literatura e os resultados do presente estudo.



Fonte: Autor (2025).

A adição de fibras de aço em geopolímeros tem demonstrado significativo impacto na resistência à tração na flexão, conforme indicado por diversos autores. O traço base MC100-PV0, composto exclusivamente por metacaulim e sem adição de fibras, apresentou uma resistência inicial à tração na flexão de 5,58 MPa, um valor superior ao obtido por Xu *et al.* (2021) (4,84 MPa) e Zhang *et al.* (2021) (4,20 MPa) em seus traços base. Essa superioridade pode ser atribuída à pureza da matriz utilizada no traço MC100PV0, composta inteiramente por metacaulim, enquanto Xu e Zhang empregaram misturas de metacaulim e cinzas volantes, assim como a proporção de aglomerante: agregados, que podem ter reduzido a eficiência da matriz em resistir à flexão.

No traço MC100-PV0-FM1.0, com 1,0% de fibras retas (fator de forma 65), a resistência atingiu 10,05 MPa, representando um aumento de 80,15% em relação ao traço referência. Esse incremento foi comparável ao ganho de 76,19% obtido por Zhang *et al.* (2021) para 1,5% de fibras corrugadas (fator de forma 115), mas com resistência absoluta superior no traço MC100-PV0-FM1.5. Com 1,5% de fibras (MC100-PV0-FM1.5), a resistência aumentou para 11,14 MPa, um ganho de 99,70%, superando os valores observados por Xu *et al.* (2021) (34,92% de ganho com 1,5% de fibras crimpadas). No traço MC100-PV0-FM2.0, contendo 2,0% de fibras,

o aumento foi ainda mais expressivo, alcançando 15,43 MPa, o que representa um incremento de 176,69%. Adicionalmente, Qu *et al.* (2024), utilizando uma matriz de 65% metacaulim e 35% cinza volante com fibras retas (fator de forma 80), reportaram a seguinte evolução na resistência à tração na flexão: 3,35 MPa sem adição, 3,51 MPa (4,78% de incremento) com 0,50% de fibra, 4,30 MPa (28,36% de ganho) com 1,00% de fibra, 5,75 MPa (71,64% de aumento) com 1,50% de fibra e 4,60 MPa (37,31% de incremento) com 2,00% de fibra. Esses dados evidenciam que, enquanto fibras ancoradas e corrugadas promovem maior aderência e contribuições expressivas, a eficácia das fibras retas depende fortemente da composição da matriz.

O impacto da substituição de 20% do metacaulim por pó de vidro foi analisado no traço MC80-PV20AL, que apresentou uma resistência de 4,44 MPa, representando uma redução de 20,39% em relação ao traço de referência MC100-PV0. Essa redução pode ser explicada pela menor eficiência do pó de vidro em formar ligações químicas fortes na matriz. Possivelmente, o pó de vidro não está participando ativamente da geopolimerização, permanecendo não reagido na composição da matriz. Análises complementares por DRX e FTIR, realizadas posteriormente na pasta e apresentadas na Seção 4.2.7 confirmaram essa hipótese. Entretanto, com a adição de 2,0% de fibras (MC80-PV20AL-FM2.0), a resistência aumentou para 12,50 MPa, representando um ganho de 124,08%. Embora significativo, esse incremento foi inferior ao registrado no traço equivalente sem pó de vidro (MC100-PV0-FM2.0), indicando que o desempenho inferior da matriz com pó de vidro se reflete também no comportamento da argamassa reforçada. Ainda assim, esse valor foi superior aos verificados na literatura, como os trabalhos de Xu *et al.* (2021), Zhang *et al.* (2021) e Qu *et al.* (2024) no mesmo teor.

Xu *et al.* (2021), utilizando fibras crimpadas em uma matriz composta por 50% de metacaulim e 50% de cinzas volantes, observaram ganhos moderados, com o maior aumento em resistência à flexão (7,79 MPa, 60,95%) ocorrendo em 2,5% de fibras. Esses valores são inferiores aos dessa pesquisa, o que pode ser atribuído à menor interação entre fibras e a matriz rica em cinzas volantes. Por sua vez, Zhang *et al.* (2021), empregando fibras corrugadas (fator de forma 115) e uma matriz com 60% de metacaulim e 40% de cinzas volantes, reportaram ganhos mais significativos, atingindo 9,70 MPa (130,95%) para 2,5% de fibras. No entanto, os resultados absolutos de Zhang ainda foram superados pelo presente estudo, possivelmente devido à pureza da matriz baseada apenas em metacaulim e à alta eficiência das fibras retas usadas.

Por fim, Menger *et al.* (2023) utilizaram uma matriz composta por resíduos de polimento de porcelana e fibras metálicas curtas e retas (fator de forma 65), obtendo uma resistência

máxima de 19,80 MPa com 1,35% de fibras, o que corresponde a um aumento de 102,04%. Embora a resistência absoluta tenha sido superior, o incremento percentual alcançado no presente estudo (176,69%) para o traço MC100-PV0-FM2.0 indica que, em matrizes à base de metacaulim puro, é possível incorporar teores mais elevados de fibras, potencializando os ganhos em resistência mecânica. No entanto, a adição de maiores quantidades de fibras exige maior cuidado com sua adequada dispersão, a fim de evitar aglomerações que possam comprometer a homogeneidade e o desempenho final da argamassa.

Em síntese, os resultados dos traços desenvolvidos destacam a eficiência de matrizes exclusivamente à base de metacaulim e fibras retas, especialmente em altos teores de fibras. Quando comparados aos estudos da literatura, os incrementos em resistência à tração na flexão obtidos neste estudo são significativamente superiores, como pode ser observado na Figura 42.

4.2.2 Resistência à compressão axial

As resistências à compressão axial das argamassas geopoliméricas aos 28 dias são apresentadas na Tabela 19, que inclui os resultados, variação percentual e a comparação estatística (Teste de Tukey) com o traço de referência (MC100-PV0). A Tabela 20 detalha os dados da análise estatística por meio do Teste de Tukey para comparação entre as formulações, enquanto a Figura 43 ilustra a comparação visual dos resultados.

Tabela 19 - Valores médios da resistência à compressão axial aos 28 dias das argamassas geopoliméricas e análise estatística preliminar (traço de referência: MC100-PV0).

Traços	Média (MPa)	VP ⁽¹⁾ (%)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
MC100-PV0	45,10	-	2,67	5,92	
MC100-PV0-FM1.0	62,06	37,62%	0,93	1,50	SIM
MC100-PV0-FM1.5	63,96	41,83%	1,39	2,18	SIM
MC100-PV0-FM2.0	66,21	46,82%	1,34	2,02	SIM
MC80-PV20-AL	43,16	-4,30%	1,14	2,63	NÃO
MC80-PV20-AL-FM2.0	58,63	30,00%	1,70	2,89	SIM

Nota: ⁽¹⁾ VP (%) indica a variação percentual da média da formulação analisada em relação ao traço de referência MC100-PV0.

Fonte: Autor (2025).

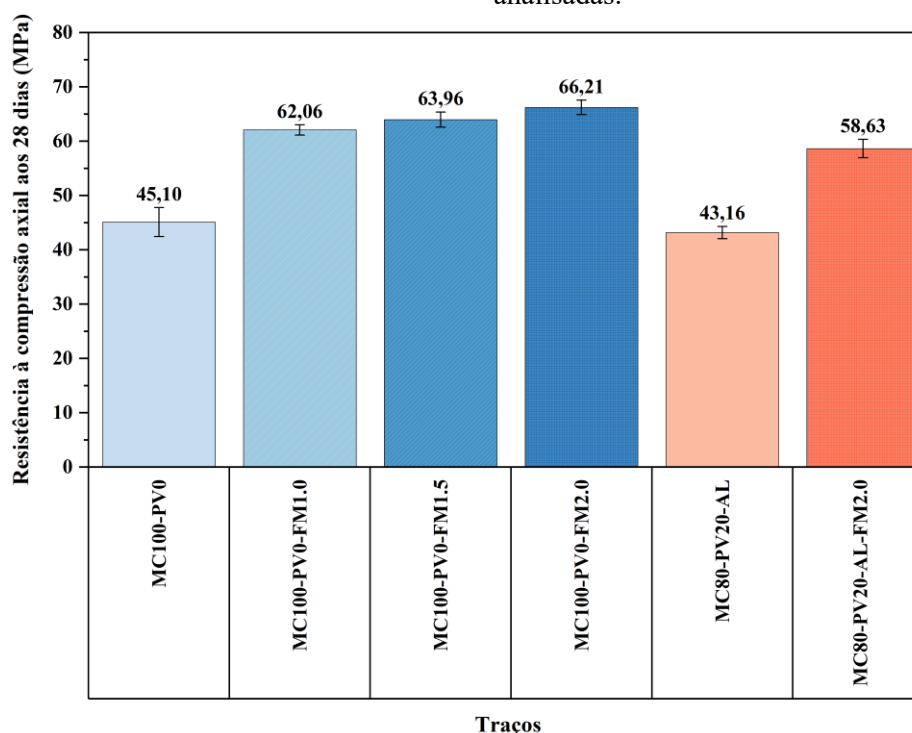
Tabela 20 - Detalhamento do Teste de Tukey para identificação de diferenças significativas entre as argamassas geopoliméricas no ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias.

Amostras	MC100-PV0	MC100-PV0-FM1.0	MC100-PV0-FM1.5	MC100-PV0-FM2.0	MC80-PV20-AL	MC80-PV20-AL-FM2.0
MC100-PV0		SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM
MC100-PV0-FM1.0			NÃO	SIM	SIM	SIM
MC100-PV0-FM1.5				NÃO	SIM	SIM
MC100-PV0-FM2.0					SIM	SIM
MC80-PV20-AL						SIM

Nota: NÃO = Diferença não significativa ($p \geq 0,05$); SIM = Diferença significativa ($p < 0,05$).

Fonte: Autor (2025).

Figura 43 - Comparação gráfica das resistências à compressão axial aos 28 dias entre as formulações analisadas.



Fonte: Autor (2025).

A formulação de referência MC100-PV0, composta por metacaulim puro sem adições, apresentou resistência média à compressão de 45,10 MPa. A partir dessa base, a adição de fibras de aço promoveu ganhos significativos de resistência. A formulação MC100-PV0-FM1.0, com 1,0% de fibra de aço, alcançou 62,06 MPa, representando um aumento de 37,62% em relação à referência. Esse resultado indica que as fibras metálicas atuam de forma eficaz no reforço da matriz, reduzindo a propagação de microfissuras e melhorando a resistência global.

Com o aumento da incorporação de fibras para 1,5% (MC100-PV0-FM1.5) e 2,0% (MC100-PV0-FM2.0), as resistências aumentaram para 63,96 MPa e 66,21 MPa, respectivamente, correspondendo a incrementos de 41,83% e 46,82%. Contudo, observa-se que os valores de resistência entre 1,5% e 2,0% de fibras são estatisticamente equivalentes, indicando que o incremento adicional de 0,5% não resulta em ganho significativo de resistência nessa propriedade. Esse comportamento sugere que há um limite de eficiência na adição de fibras metálicas, em que quantidades superiores não resultam em ganhos proporcionais de resistência. Isso pode ser explicado pela dificuldade de dispersão homogênea das fibras na matriz, o que pode gerar aglomerações.

Por outro lado, a formulação MC80-PV20-AL, composta por metacaulim com 20% de pó de vidro e alumina hidratada, apresentou resistência à compressão de 43,16 MPa, representando uma redução de 4,30% em relação à amostra de referência, sendo estaticamente equivalente ao traço de referência. Essa diminuição na resistência pode ser atribuída à menor reatividade do pó de vidro em comparação ao metacaulim, o que compromete a formação de uma matriz geopolimérica densa e coesa. Embora a adição de alumina amorfa tenha sido empregada para equilibrar o balanço estequiométrico, esse ajuste não foi suficiente para compensar a perda de desempenho mecânico. Ainda assim, a resistência obtida se manteve dentro de uma faixa aceitável, sendo comparável à classe C40 de concreto para fins estruturais, conforme especificado na NBR 8953 (ABNT, 2015).

A incorporação de 2,0% de fibras de aço na formulação MC80-PV20-AL-FM2.0 resultou em um aumento da resistência à compressão para 58,63 MPa. Esse valor representa um incremento de 30,00% em relação à formulação de referência (MC100-PV0) e um aumento expressivo quando comparado à formulação sem fibras (MC80-PV20-AL), com um aumento de 35,84%. No entanto, o ganho de resistência foi inferior ao observado em formulações compostas exclusivamente por metacaulim. Comparando diretamente as formulações reforçadas com fibras metálicas, observa-se que a amostra MC100-PV0-FM2.0 apresentou resistência à compressão de 66,21 MPa, enquanto a MC80-PV20-AL-FM2.0 atingiu 58,63 MPa.

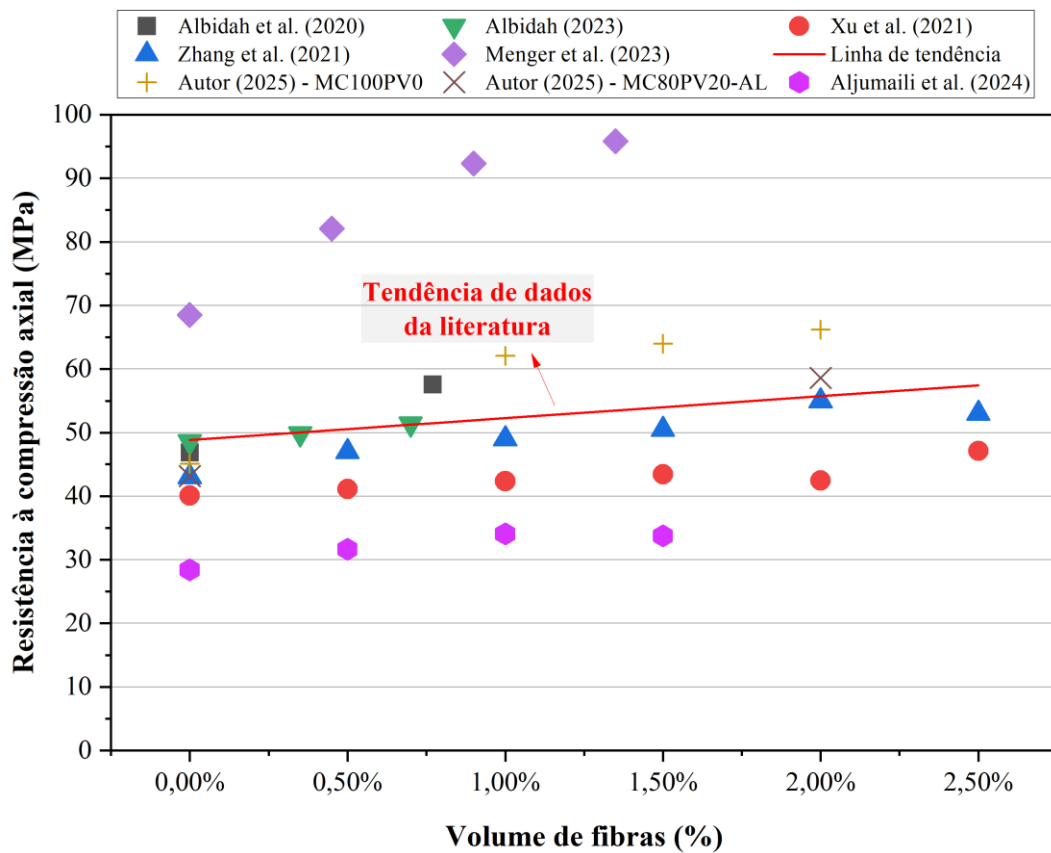
Esses resultados indicam que a matriz composta exclusivamente por metacaulim proporciona uma interação mais eficiente com as fibras de aço, resultando em maior resistência mecânica. A incorporação de 20% de pó de vidro, mesmo com a adição de alumina amorfa para equilíbrio estequiométrico, pode ter influenciado a formação da estrutura geopolimérica, possivelmente relacionado às diferenças nas características físicas dos materiais precursores, como a menor área superficial específica (0,681 m²/g) e granulometria mais grosseira do pó de vidro em comparação ao metacaulim (15,798 m²/g e distribuição granulométrica mais fina).

Caracterizações microestruturais realizadas posteriormente, incluindo análises por FTIR e DRX, corroboraram essa hipótese ao evidenciar que não houve formação de novos grupos funcionais característicos da geopolimerização, enquanto um aumento na fração amorfa foi observado, o que contribuiu para o desempenho mecânico inferior da matriz contendo pó de vidro e alumina. Assim, embora a combinação de pó de vidro e fibras metálicas contribua para a melhoria da resistência em relação à matriz sem reforço, o sistema baseado apenas em metacaulim com fibras metálicas demonstra desempenho superior em termos de resistência mecânica conforme apresentado na Figura 35.

4.2.2.1 Relação Volume de fibras versus Resistência à compressão axial

Para investigar a relação entre o volume de fibras e a resistência à compressão axial, foram utilizados dados provenientes de estudos da revisão sistemática da literatura que empregaram, no mínimo, 50% de metacaulim como material precursor e reforço com fibra de aço comerciais. Na Figura 44, apresenta-se uma comparação entre os resultados da literatura e os obtidos no presente estudo, evidenciando a correlação entre o volume de fibras e a resistência à compressão axial.

Figura 44 - Relação entre o volume de fibras e a resistência à compressão axial aos 28 dias: comparação entre dados da literatura e os resultados do presente estudo.



Fonte: Autor (2025).

A análise dos dados evidencia que a incorporação de fibras de aço nos geopolímeros aumenta significativamente a resistência à compressão, conforme amplamente demonstrado por diferentes autores. Os resultados com o reforço de fibras destacam ganhos expressivos, especialmente no traço MC100-PV0-FM2.0, que apresentou uma resistência de 66,21 MPa, correspondendo a um aumento de 46,82% em relação ao traço base sem fibras. Este desempenho supera os ganhos observados em outros estudos da literatura, como os de Albidah *et al.* (2020), que alcançaram um aumento máximo de 22,81% utilizando fibras com ancoragem

em extremidade e uma matriz à base de metacaulim e agregados variados. Essa discrepância sugere que o tipo de fibra e a formulação da matriz são fatores críticos para maximizar os benefícios do reforço.

O estudo de Xu *et al.* (2021), a utilização de fibras crimpadas em uma matriz composta por metacaulim e cinzas volantes também mostrou incrementos na resistência à compressão, com um pico de 17,57% para 2,5% de fibras. No entanto, os ganhos foram inferiores aos observados pelos traços desenvolvidos (Autor (2025)), indicando que a matriz exclusivamente à base de metacaulim empregada por este último pode apresentar uma melhor integração matriz-fibra. De forma semelhante, Zhang *et al.* (2021) obtiveram incrementos de até 37,26% ao usar fibras corrugadas em uma matriz com maior teor de metacaulim (60%), reforçando que a proporção de metacaulim na formulação influencia diretamente a eficiência do reforço.

Por outro lado, no trabalho de Albidah (2023) foram utilizadas fibras ancoradas com um elevado fator de forma (80) em uma matriz composta por 50% metacaulim e 50% cinzas volantes, demonstrando um aumento de até 28,20% na resistência à compressão axial com apenas 0,7% de fibras. Em contraste, os resultados obtidos no estudo presente do traço MC100PV0-FM1.5, que emprega 1,5% de fibras retas, evidenciaram um incremento de 41,83% na resistência, sugerindo que, em níveis mais elevados de volume, as fibras retas podem ser mais eficazes, mesmo apresentando um fator de forma inferior. De forma análoga, Aljumaili *et al.* (2024) avaliaram uma matriz composta por metacaulim, areia, brita e RCD (até 30% de substituição dos agregados), reforçada com fibras retas (fator de forma 65), e verificaram os seguintes resultados para a resistência à compressão axial: 28,39 MPa na ausência de fibras, 31,66 MPa com 0,50% de fibra (aumento de 11,52%), 34,09 MPa com 1,00% de fibra (aumento de 20,08%) e 33,75 MPa com 1,50% de fibra (aumento de 18,88%).

Além disso, no trabalho de Menger *et al.* (2023) foi desenvolvida uma matriz baseada em metacaulim e resíduos de polimento de porcelana, com fibras curtas e retas (fator de forma 65), similar às das fibras de aço utilizadas nesse trabalho. Esse estudo demonstrou ganhos de até 39,85% para 1,35% de fibras, próximo ao desempenho do traço MC100-PV0-FM1.0. Quando se trata de matrizes modificadas, como o traço MC80-PV20AL, que substitui 20% do metacaulim por pó de vidro, os resultados mostram uma redução inicial na resistência à compressão (-4,30%) em comparação ao traço base MC100-PV0. Com a adição de 2% de fibras no traço MC80-PV20AL-FM2.0, a resistência alcançou 58,63 MPa, um aumento de 30% em relação ao traço de referência. Embora esse ganho seja significativo, ele ainda é inferior ao observado no traço reforçado exclusivamente com metacaulim (MC100-PV0-FM2.0),

indicando que a matriz com pó de vidro apresenta menor eficiência no processo de geopolimerização e impactando na aderência com as fibras.

4.2.3 Módulo de elasticidade dinâmico

Os módulos de elasticidade dinâmico das argamassas geopoliméricas aos 28 dias são apresentados na Tabela 21, que inclui os resultados, a variação percentual e a comparação estatística (Teste de Tukey) com o traço de referência (MC100-PV0). A Tabela 22 detalha os dados da análise estatística por meio do Teste de Tukey para comparação entre as formulações, enquanto a Figura 45 ilustra a comparação visual dos resultados.

Nos traços com adição de fibras de aço, observou-se um aumento significativo no módulo de elasticidade das argamassas geopoliméricas. O traço MC100-PV0-FM1.0 apresentou média de 15,96 GPa, representando um acréscimo de 20,34% em relação à referência. Já o traço MC100-PV0-FM1.5 alcançou 16,20 GPa (+22,15%), enquanto o MC100-PV0-FM2.0 atingiu 17,12 GPa, correspondendo a um aumento de 29,12%. Esses resultados indicam que a incorporação de fibras de aço contribuiu para uma maior rigidez e melhoria das propriedades mecânicas da matriz geopolimérica.

Tabela 21 - Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas geopoliméricas e análise estatística preliminar (traço de referência: MC100-PV0).

Traços	Média (GPa)	VP ⁽¹⁾ (%)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
MC100-PV0	13,26	-	0,18	1,35	
MC100-PV0-FM1.0 ^(a)	15,96	20,34%	0,29	1,84	SIM
MC100-PV0-FM1.5 ^(a)	16,20	22,15%	0,46	2,84	SIM
MC100-PV0-FM2.0	17,12	29,12%	0,28	1,62	SIM
MC80-PV20-AL	11,22	-15,36%	0,53	4,74	SIM
MC80-PV20-AL-FM2.0	12,95	-2,32%	0,87	6,70	NÃO

Nota: ⁽¹⁾VP (%) indica a variação percentual da média da formulação analisada em relação ao traço de referência MC100-PV0.

Fonte: Autor (2025).

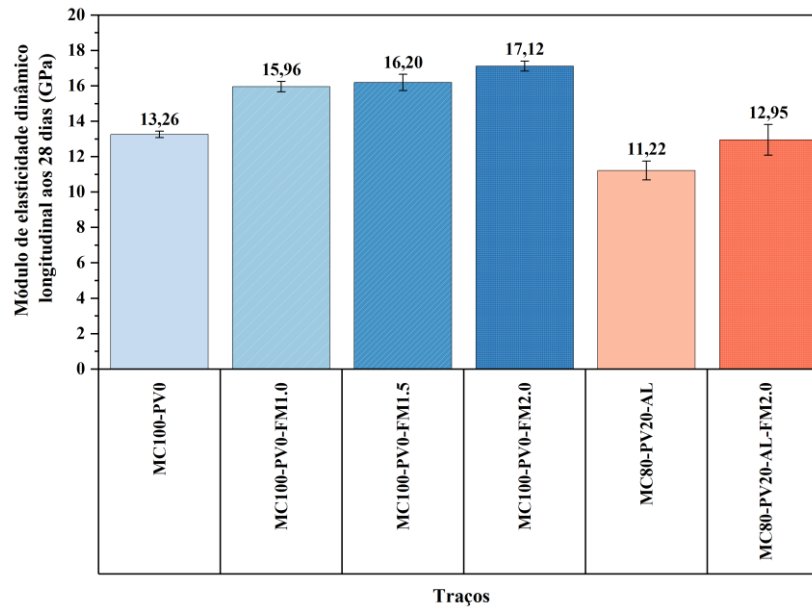
Tabela 22 - Detalhamento do Teste de Tukey para identificação de diferenças significativas entre as argamassas geopoliméricas no ensaio módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias.

Amostras	MC100-PV0	MC100-PV0-FM1.0	MC100-PV0-FM1.5	MC100-PV0-FM2.0	MC80-PV20-AL	MC80-PV20-AL-FM2.0
MC100-PV0		SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO
MC100-PV0-FM1.0			NÃO	SIM	SIM	SIM
MC100-PV0-FM1.5				SIM	SIM	SIM
MC100-PV0-FM2.0					SIM	SIM
MC80-PV20-AL						SIM

Nota: Diferença não significativa ($p \geq 0,05$); SIM = Diferença significativa ($p < 0,05$).

Fonte: Autor (2025).

Figura 45 - Comparação dos resultados ao módulo de elasticidade dinâmico longitudinal aos 28 dias das argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor (2025).

Em contraste, o traço MC80-PV20-AL, com 20% de pó de vidro e adição de alumina, apresentou uma redução no módulo de elasticidade médio para 11,22 GPa, queda de 15,36% em comparação à referência (MC100PV0), possivelmente devido a alterações na microestrutura. Entretanto, o traço MC80-PV20-AL-FM2.0, que também recebeu fibras de aço, apresentou uma média de 12,95 GPa, correspondendo a uma redução de apenas 2,32% frente à referência. Esse resultado sugere que a presença das fibras metálicas foi capaz de compensar parcialmente a perda de rigidez associada à incorporação de resíduos vítreos e alumina.

Portanto, o reforço com fibras de aço mostrou-se eficaz no aumento da rigidez dos compósitos geopoliméricos. No entanto, seu efeito é mais sutil em comparação entre argamassas reforçadas com diferentes teores de fibras de aço, sendo seu impacto mais expressivo no comportamento pós-pico e em tensões residuais.

4.2.4 Densidade de massa aparente

A análise da densidade de massa aparente das argamassas geopoliméricas aos 28 dias demonstrou que a adição de fibras metálicas é o principal fator responsável pelo aumento da densidade nas formulações. Os resultados, juntamente com a variação percentual e a comparação estatística (Teste de Tukey) em relação ao traço de referência (MC100-PV0), encontram-se na Tabela 23. A Tabela 24 apresenta o detalhamento dos dados estatísticos por

meio do Teste de Tukey entre as formulações, enquanto a Figura 46 ilustra a comparação visual dos resultados.

Tabela 23 - Valores médios da densidade de massa aparente aos 28 dias das argamassas geopoliméricas e análise estatística preliminar (traço de referência: MC100-PV0).

Traços	Média (g/cm ³)	VP (%)	Desvio Padrão (g/cm ³)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
MC100-PV0	2,08	-	0,03	1,26	
MC100-PV0-FM1.0	2,13	2,50%	0,04	1,76	NÃO
MC100-PV0-FM1.5	2,15	3,63%	0,05	2,36	SIM
MC100-PV0-FM2.0	2,22	7,16%	0,03	1,42	SIM
MC80-PV20-AL	2,12	1,91%	0,03	1,58	NÃO
MC80-PV20-AL-FM2.0	2,23	7,57%	0,03	1,20	SIM

Nota: ⁽¹⁾ VP (%) indica a variação percentual da média da formulação analisada em relação ao traço de referência MC100-PV0.

Fonte: Autor (2025).

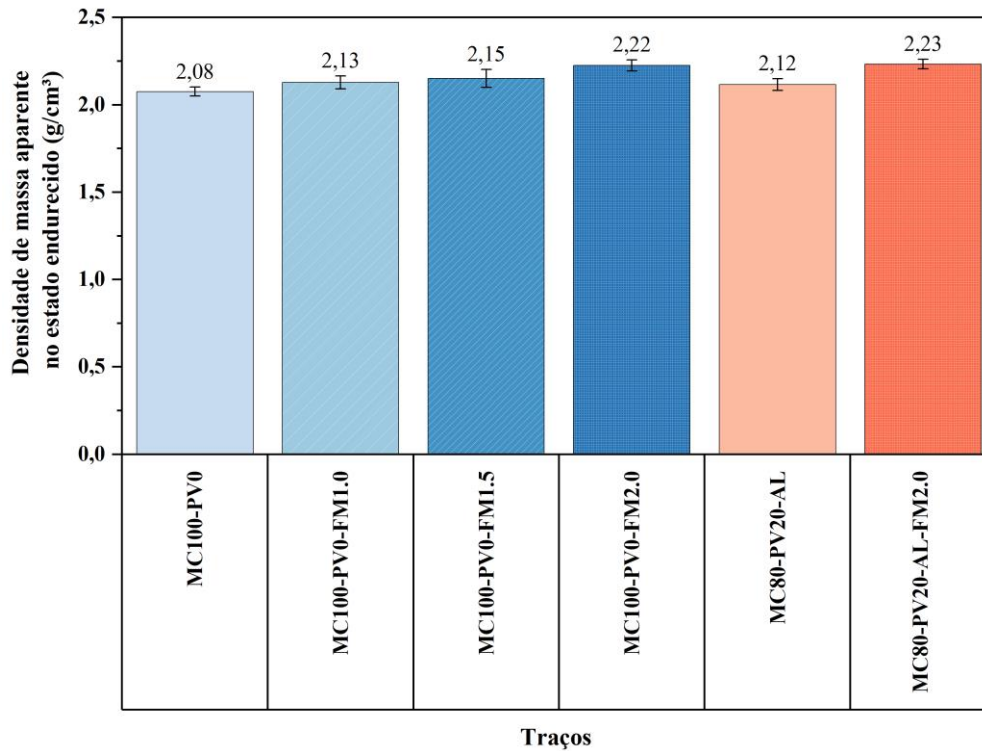
Tabela 24 - Detalhamento do Teste de Tukey para identificação de diferenças significativas entre as argamassas geopoliméricas da densidade de massa aparente aos 28 dias.

Amostras	MC100-PV0	MC100-PV0-FM1.0	MC100-PV0-FM1.5	MC100-PV0-FM2.0	MC80-PV20-AL	MC80-PV20-AL-FM2.0
MC100-PV0		NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM
MC100-PV0-FM1.0			NÃO	SIM	NÃO	SIM
MC100-PV0-FM1.5				SIM	NÃO	SIM
MC100-PV0-FM2.0					SIM	NÃO
MC80-PV20-AL						SIM

Nota: Diferença não significativa ($p \geq 0,05$); SIM = Diferença significativa ($p < 0,05$).

Fonte: Autor (2025).

Figura 46 - Comparação gráfica da densidade de massa aparente aos 28 dias entre as formulações analisadas.



Fonte: Autor (2025).

A introdução de 1,0% de fibras metálicas na formulação MC100-PV0-FM1.0 elevou a densidade para 2,13 g/cm³, um aumento de 2,50%, mas sem diferença estatisticamente significativa. Com 1,5% de fibras, a densidade da formulação MC100-PV0-FM1.5 aumentou para 2,15 g/cm³, um incremento de 3,63%, e foi estatisticamente diferente da referência. A densidade mais alta foi observada na formulação MC100-PV0-FM2.0, com 2,0% de fibras metálicas, alcançando 2,22 g/cm³, um aumento de 7,16%, refletindo o impacto mais expressivo do maior teor de fibras.

As formulações contendo 20% de pó de vidro e alumina amorfa apresentaram comportamento distinto. A densidade da MC80-PV20-AL foi de 2,12 g/cm³, apenas 1,91% maior que a referência, sem diferença estatística significativa, indicando que a substituição parcial de metacaulim por pó de vidro não altera substancialmente a densidade da matriz. No entanto, a inclusão de 2,0% de fibras metálicas na MC80-PV20-AL-FM2.0 resultou em uma densidade de 2,23 g/cm³, um aumento de 7,57% em relação à referência, estatisticamente equivalente à formulação MC100-PV0-FM2.0. Isso demonstra que o efeito das fibras na densidade é dominante em comparação às alterações químicas da matriz.

Em geral, as formulações com maiores teores de fibras metálicas, como MC100-PV0-FM2.0 e MC80-PV20-AL-FM2.0, apresentaram as maiores densidades, evidenciando que as fibras influenciam diretamente a compactação do material. Por outro lado, a substituição parcial

de metacaulim por pó de vidro, isoladamente, não teve impacto significativo na densidade, sendo necessário o uso de fibras para obter materiais mais densos e robustos.

4.2.5 Resistência à tração por compressão diametral

A análise dos resultados do ensaio de compressão diametral revelou tendências significativas no desempenho das diferentes formulações de geopolímeros. No entanto, é importante destacar que as dimensões dos corpos de prova (5×10 cm), especificadas pela NBR 7222 (ABNT, 2011) aplicável a argamassas, podem ter influenciado os resultados obtidos, especialmente nos materiais reforçados com fibras. Embora a fibra empregada seja classificada como microfibras, com dimensões reduzidas, sua presença pode ter influenciado o comportamento observado na Figura 47 (b). A inclusão das fibras pode ter promovido a formação de zonas localizadas de concentração de tensões, resultando em um esmagamento mais acentuado. Importante destacar que esse comportamento não foi observado no traço de referência sem fibras (Figura 47 (a)), reforçando a influência direta da incorporação das fibras na resposta mecânica. Além disso, a presença das fibras evitou a abertura completa da seção dos corpos de prova reforçados, característica que também deve ser levada em consideração na análise dos resultados devido ao fenômeno de ponteamo de fibras.

Figura 47 - Amostras dos corpos de provas rompidos: (a) traço de referência, (b) MC100-PV0-FM1.5.



Fonte: Autor (2025).

As resistências à tração por compressão diametral das argamassas geopoliméricas aos 28 dias são apresentadas na Tabela 25, que inclui os resultados, a variação percentual e a comparação estatística (Teste de Tukey) com o traço de referência (MC100-PV0). A Tabela 26 detalha os dados da análise estatística por meio do Teste de Tukey para comparação entre as formulações, enquanto a Figura 48 ilustra a comparação visual dos resultados.

Tabela 25 - Valores médios da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias das argamassas geopoliméricas e análise estatística preliminar (traço de referência: MC100-PV0).

Traços	Média (MPa)	VP ⁽¹⁾ (%)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
MC100-PV0	4,11	-	0,15	3,68	
MC100-PV0-FM1.0	5,76	40,22%	0,32	5,50	SIM
MC100-PV0-FM1.5	6,27	52,55%	0,46	7,34	SIM
MC100-PV0-FM2.0	8,11	97,40%	0,96	11,79	SIM
MC80-PV20-AL	3,17	-22,96%	0,10	3,18	NÃO
MC80-PV20-AL-FM2.0	6,32	53,76%	0,36	5,67	SIM

Notas: ⁽¹⁾VP (%) indica a variação percentual da média da formulação analisada em relação ao traço de referência MC100-PV0.

Fonte: Autor (2025).

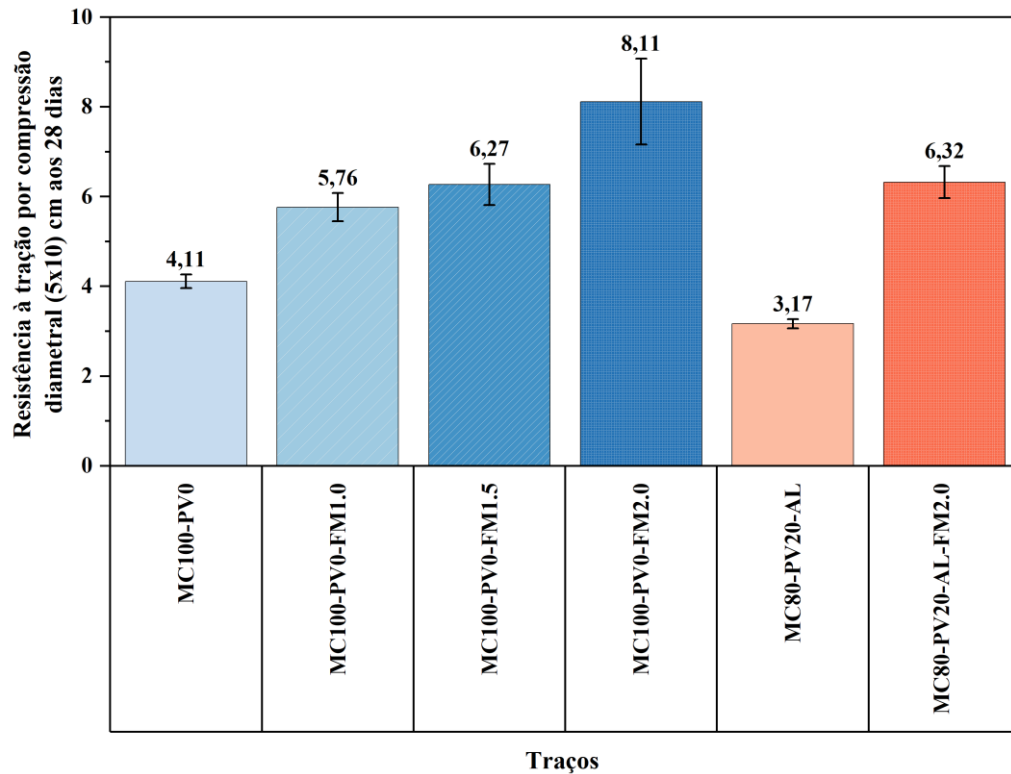
Tabela 26 - Detalhamento do Teste de Tukey para identificação de diferenças significativas entre as argamassas geopoliméricas no ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Amostras	MC100-PV0	MC100-PV0-FM1.0	MC100-PV0-FM1.5	MC100-PV0-FM2.0	MC80-PV20-AL	MC80-PV20-AL-FM2.0
MC100-PV0		SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM
MC100-PV0-FM1.0			NÃO	SIM	SIM	NÃO
MC100-PV0-FM1.5				SIM	SIM	NÃO
MC100-PV0-FM2.0					SIM	SIM
MC80-PV20-AL						SIM

Nota: NÃO = Diferença não significativa ($p \geq 0,05$); SIM = Diferença significativa ($p < 0,05$).

Fonte: Autor (2025).

Figura 48 - Comparação gráfica das resistências à tração por compressão diametral aos 28 dias entre as formulações analisadas.



Com 1,0% de fibras, a formulação MC100-PV0-FM1.0 atingiu 5,76 MPa, representando um incremento de 40,22% em relação à referência, enquanto a formulação MC100-PV0-FM1.5, com 1,5% de fibras, alcançou 6,27 MPa, um aumento de 52,55%. Ambas foram estatisticamente equivalentes, indicando que a inclusão inicial de fibras já confere ganhos significativos. A formulação com 2,0% de fibras (MC100-PV0-FM2.0) obteve a maior resistência, com 8,11 MPa (97,40% de aumento), evidenciando que o maior teor de fibras melhora a capacidade do material de resistir a esforços de tração indireta. Todavia, o alto coeficiente de variação indica que pode ter acontecido um esmagamento com expansão lateral, mascarando os resultados.

Por outro lado, a formulação MC80-PV20-AL, contendo 20% de pó de vidro e alumina hidratada, apresentou resistência de 3,17 MPa, uma redução de 22,96% em relação à referência. Essa queda pode ser atribuída à menor contribuição estrutural do pó de vidro na matriz, o que compromete a resistência sem a presença de fibras. Entretanto, ao incorporar 2,0% de fibras na formulação MC80-PV20-AL-FM2.0, a resistência aumentou para 6,32 MPa (53,76% de incremento em relação à referência), mostrando desempenho estatisticamente equivalente à formulação MC100-PV0-FM1.5. Esse resultado indica que as fibras metálicas podem compensar a perda de resistência associada à substituição parcial de metacaulim por pó de vidro.

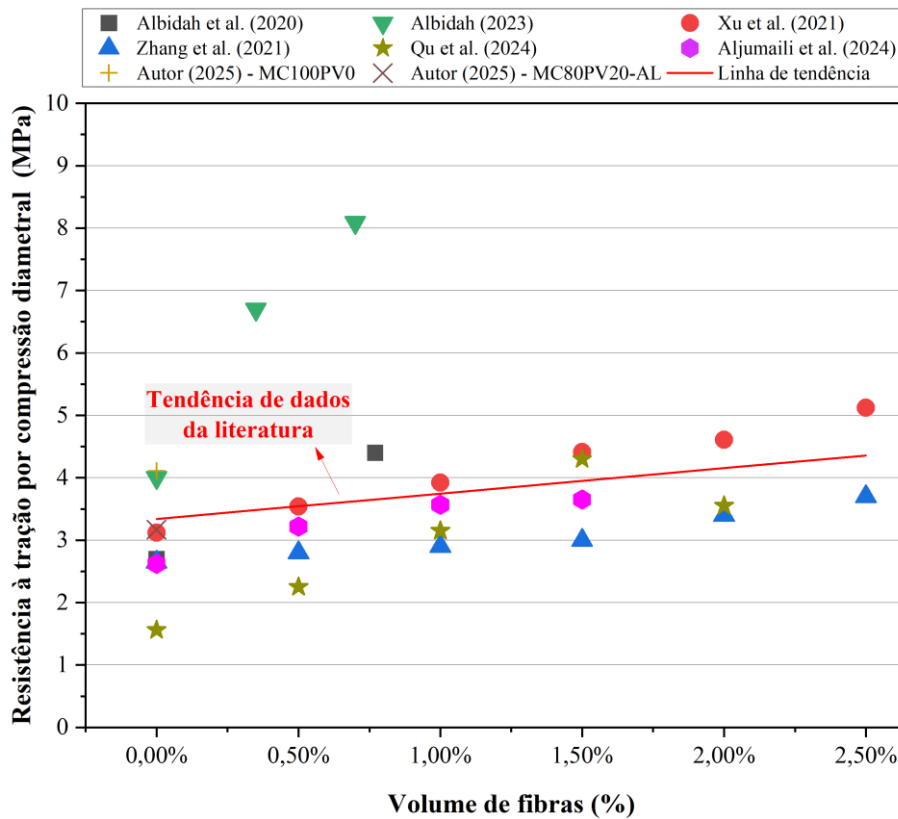
De forma geral, as formulações reforçadas com fibras metálicas demonstraram maior resistência à tração por compressão diametral, com ganhos proporcionais ao teor de fibras. A presença de pó de vidro reduziu a resistência em matrizes sem fibras, mas, quando combinado com 2,0% de fibras, o desempenho melhorou.

4.2.5.1 Relação Volume de fibras *versus* Resistência à tração por compressão diametral

Para investigar a relação entre o volume de fibras e a resistência à tração por compressão diametral, foram utilizados dados provenientes de estudos da RBS e de outros artigos da literatura que empregaram, no mínimo, 50% de metacaulim como material precursor e reforço com fibra de aço. Na Figura 49, apresenta-se uma comparação entre os resultados da literatura, evidenciando a correlação entre o volume de fibras e a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.

A análise comparativa dos dados disponíveis na literatura demonstra que a incorporação de fibras de aço melhora significativamente as propriedades mecânicas dos geopolímeros, embora os ganhos dependam tanto do teor quanto do tipo de fibra e da composição da matriz. Albidah *et al.* (2020) relataram que 0,77% de fibras ancoradas (fator de forma 60) em uma matriz composta por metacaulim, areia e agregado graúdo elevaram a resistência à tração de 2,70 MPa para 4,40 MPa, representando um aumento de 62,96%. Em um estudo de Xu *et al.* (2021), utilizando uma matriz de 50% de metacaulim e 50% de cinzas volantes com fibras crimpadas, a resistência passou de 3,12 MPa para 5,12 MPa com 2,50% de fibra, com incrementos progressivos de 13,46%, 25,64%, 41,35% e 47,76% para teores de 0,50%, 1,00%, 1,50% e 2,00%, respectivamente, evidenciando uma interação fibra-matriz mais eficiente para teores superiores a 1,50%.

Figura 49 - Relação entre o volume de fibras e a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias: comparação entre dados da literatura.



Fonte: Autor (2025).

Por outro lado, Zhang *et al.* (2021), com uma matriz de 60% metacaulim e 40% cinzas volantes reforçada com fibras corrugadas (fator de forma 115) e redutor de retração, alcançaram um ganho de 39,62% com 2,50% de fibra, com aumentos mais modestos nas primeiras adições, sugerindo uma resposta menos sensível para teores inferiores a 2%. Destaca-se também o trabalho de Albidah (2023), que demonstrou que uma matriz composta por 50% metacaulim e 50% cinzas volantes, associada a agregados calcários e fibras ancoradas de maior comprimento (fator de forma 80), obteve ganhos expressivos: um aumento de 67,50% na resistência com apenas 0,35% de fibra e um aumento de 102,25% com 0,70% de fibra, evidenciando que a geometria e a distribuição das fibras podem ser mais determinantes do que a fração volumétrica isoladamente.

Aljumaili *et al.* (2024) avaliaram uma matriz contendo metacaulim, areia, brita e RCD (até 30% em substituição aos agregados) e fibras retas (fator de forma 65). Os resultados foram de 2,62 MPa sem adição de fibra, aumentando para 3,22 MPa com 0,5%, 3,57 MPa com 1,0% e 3,65 MPa com 1,5% de fibra. Já o estudo de Qu *et al.* (2024), utilizando uma matriz de 65% metacaulim e 35% cinza volante, areia média e fibras retas (fator de forma 80), reportaram 1,56 MPa para o traço sem fibras, com aumentos progressivos para 2,25 MPa com 0,50%, 3,15 MPa com 1,00%, 4,30 MPa com 1,50% e, em seguida, uma redução para 3,55 MPa com 2,00% de

fibra. Esses resultados sugerem que, embora a adição de fibras melhore a resistência, volumes excessivos podem prejudicar a homogeneidade da matriz, possivelmente devido a problemas de aglomeração e redução da trabalhabilidade.

Contextualizando os resultados do presente trabalho, as formulações MC100-PV0 e MC80-PV20-AL apresentaram resistências à tração na flexão de 4,11 MPa e 3,17 MPa, respectivamente, sem adição de fibras. Esses valores situam-se adequadamente no contexto da literatura: a formulação MC100-PV0 supera os resultados de Xu *et al.* (2021) (3,12 MPa), Aljumaili *et al.* (2024) (2,62 MPa) e Qu *et al.* (2024) (1,56 MPa), apresentando valores próximos aos reportados por Albidah *et al.* (2020) (2,70 MPa). De forma similar, a formulação MC80-PV20-AL supera os valores reportados por Albidah *et al.* (2020) (2,70 MPa), Xu *et al.* (2021) (3,12 MPa), Aljumaili *et al.* (2024) (2,62 MPa) e Qu *et al.* (2024) (1,56 MPa), demonstrando que mesmo com a substituição parcial do metacaulim, a matriz mantém desempenho satisfatório. Esses resultados evidenciam o potencial das argamassas geopoliméricas desenvolvidas nesta pesquisa.

Os resultados mostram que fibras ancoradas e corrugadas promovem melhor desempenho devido à maior aderência à matriz, enquanto fibras crimpadas exigem frações mais elevadas para ganhos expressivos. Além disso, matrizes contendo metacaulim e cinzas volantes apresentaram melhores respostas à adição de fibras. Albidah (2023) demonstrou alta eficiência com baixos teores de fibras (<1%), enquanto Xu *et al.* (2021) e Zhang *et al.* (2021) precisaram de frações mais elevadas ($\geq 2\%$) para obter ganhos significativos. Isso sugere que, além da quantidade de fibras, o fator de forma e a interação com a matriz geopolimérica são determinantes no desempenho mecânico do material. Adicionalmente, estudos de Aljumali *et al.* (2024) e Qu *et al.* (2024), que utilizaram fibras do tipo reta, evidenciam que, embora os ganhos obtidos sejam mais modestos, a eficácia do reforço depende essencialmente da distribuição uniforme das fibras e de sua interação com a matriz, reforçando a importância da seleção adequada do tipo de fibra para otimizar o comportamento mecânico.

4.2.6 Resistência à tração por duplo puncionamento

Na Tabela 27 são apresentados os resultados das resistências à tração por duplo puncionamento aos 28 dias. O foco principal é a resistência à tração por duplo puncionamento (f_t) e a carga de fissuração (Pf), que representa a carga máxima alcançada. Nesse contexto, a formulação MC100-PV0-FM1.0 foi utilizada como referência para comparação com as outras

formulações estudadas no detalhamento do Teste de Tukey (Tabela 28), enquanto a Figura 50 ilustra a comparação visual dos resultados.

Tabela 27 - Valores médios da resistência à tração por duplo puncionamento (f_t) e a carga de fissuração (P_f) aos 28 dias das argamassas geopoliméricas (traço de referência: MC100-PV0-FM1.0).

Traços	f_t (MPa)	VP (%)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média da Carga Máxima P_f (kN)
MC100-PV0-FM1.0	2,30	-	0,26	11,47%	39,32
MC100-PV0-FM1.5	2,74	19,04%	0,17	6,23%	46,70
MC100-PV0-FM2.0	2,95	27,91%	0,23	7,69%	52,06
MC80-PV20-AL-FM2.0	2,10	-8,87%	0,27	12,98%	36,88

Notas:

VP (%) indica a variação percentual da média da formulação analisada em relação ao traço com incorporação de fibras MC100-PV0-FM1.0.

Fonte: Autor (2025).

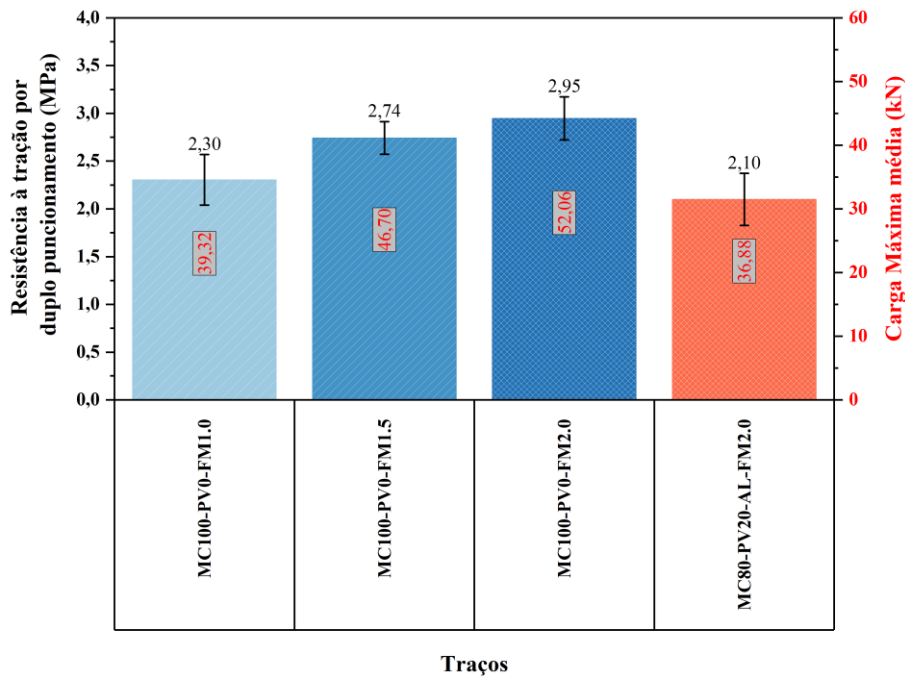
Tabela 28 - Detalhamento do Teste de Tukey para identificação de diferenças significativas entre as argamassas geopoliméricas no ensaio de resistência à tração por duplo puncionamento aos 28 dias.

Amostras	MC100-PV0-FM1.0	MC100-PV0-FM1.5	MC100-PV0-FM2.0	MC80-PV20-AL-FM2.0
MC100-PV0-FM1.0		NÃO	SIM	NÃO
MC100-PV0-FM1.5			NÃO	SIM
MC100-PV0-FM2.0				SIM

Nota: Diferença não significativa ($p \geq 0,05$); SIM = Diferença significativa ($p < 0,05$).

Fonte: Autor (2025).

Figura 50 - Comparação gráfica da resistência à tração por duplo puncionamento e carga máxima média aos 28 dias entre as formulações analisadas



Fonte: Autor (2025).

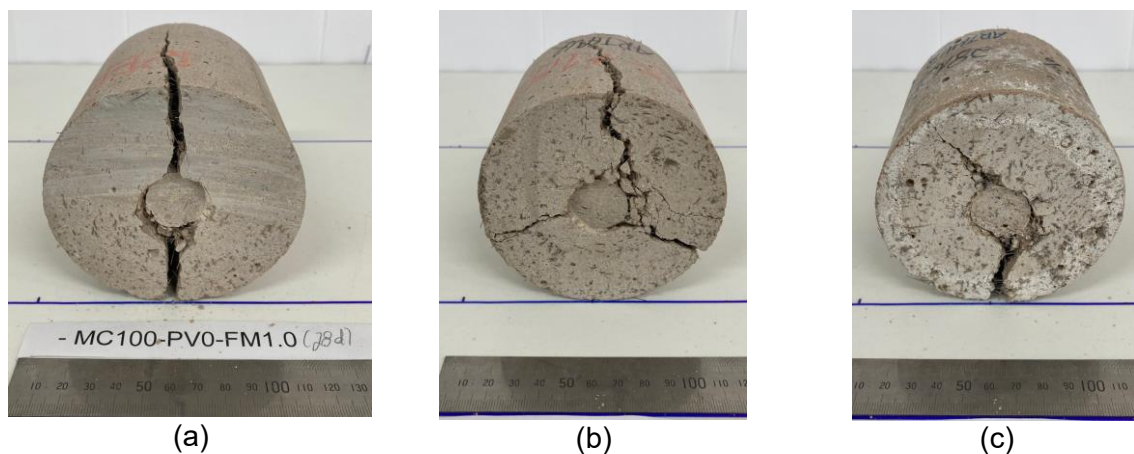
A análise dos dados de resistência à tração por duplo puncionamento dos geopolímeros reforçados com fibra revela variações significativas dependendo da composição das formulações. A formulação MC100-PV0-FM1.0, que contém 1,0% de fibra de aço, apresentou uma resistência média de 2,30 MPa com um desvio padrão de 0,26 MPa, resultando em um coeficiente de variação de 11,47%. Este traço foi usado como referência para a variação percentual de outras formulações.

Ao aumentar a incorporação de fibra de aço para 1,5% (MC100-PV0-FM1.5), a resistência média subiu para 2,74 MPa, correspondendo a um aumento de 19,04% em relação ao traço de referência. O desvio padrão diminuiu para 0,17 MPa, o que resultou em um coeficiente de variação mais baixo de 6,23%, indicando uma menor dispersão dos dados. A carga máxima média também aumentou para 46,70 kN.

Para a formulação MC100-PV0-FM2.0, com 2,0% de fibra de aço, a resistência média foi ainda maior, alcançando 2,95 MPa, uma variação percentual de 27,91% em relação à MC100-PV0-FM1.0. O desvio padrão foi de 0,23 MPa, e o coeficiente de variação foi de 7,69%, refletindo uma dispersão moderada dos dados. A carga máxima média aumentou para 52,06 kN.

Por outro lado, a formulação MC80-PV20-AL-FM2.0, que contém 20% de pó de vidro e alumina hidratada, apresentou uma resistência média de 2,10 MPa, uma redução de 8,87% em relação à referência. O desvio padrão foi de 0,27 MPa e o coeficiente de variação foi mais alto, 12,98%, indicando maior variabilidade nos resultados. A carga máxima média foi a menor entre as formulações, com 36,88 kN. Os padrões de fissuração observados nos corpos de provas durante o ensaio de duplo puncionamento podem ser visualizados na Figuras 51 (a) a (c).

Figura 51 - Corpos de prova rompidos após o ensaio de duplo puncionamento aos 28 dias de idade: (a) amostra do MC100-PV0-FM1.0 com 2 fissuras (b) amostra do MC100-PV0-FM1.5 com 3 fissuras; (c) amostra do MC80-PV20-AL-FM2.0 com 2 fissuras.



Fonte: Autor (2025).

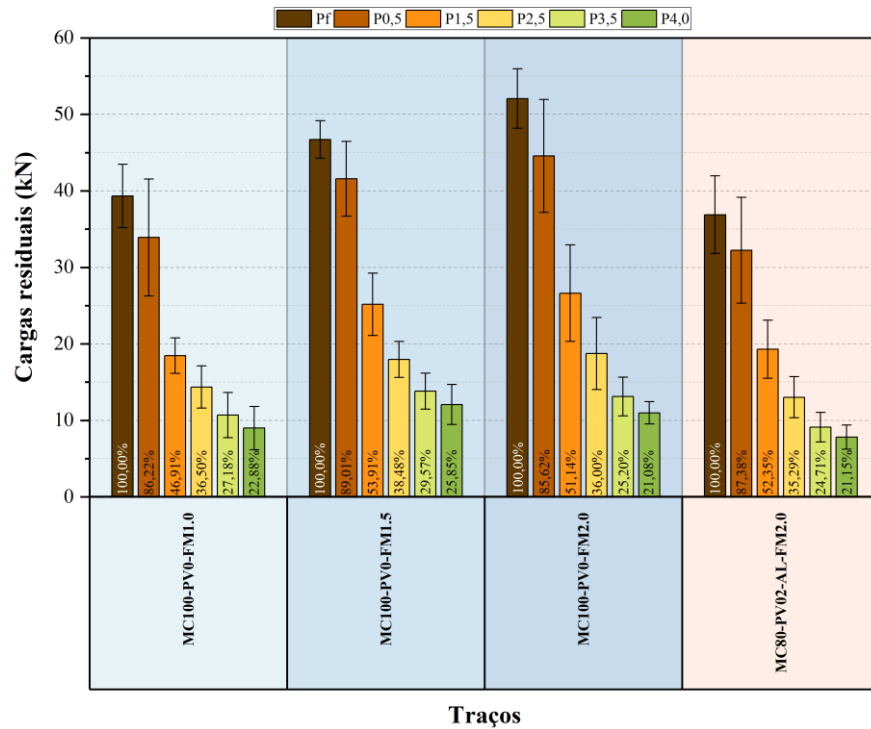
A análise estatística realizada por meio do teste de Tukey mostrou que as formulações MC100-PV0-FM1.0, MC100-PV0-FM1.5, e MC80-PV20-AL-FM2.0 são estatisticamente equivalentes, enquanto a MC100-PV0-FM1.5 também é equivalente à MC100-PV0-FM2.0. Isso indica que, apesar das diferenças nas médias, algumas formulações não apresentam diferenças estatisticamente significativas nessa propriedade, devido ao desvio padrão verificado.

Goaiz *et al.* (2022) avaliaram a resistência à tração de concreto geopolimérico à base de cinza volante reforçado com fibras de aço de extremidade ancorada, utilizando o ensaio de duplo punção (DPT). A incorporação de 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibras resultou em resistências de 2,91 MPa, 3,18 MPa e 3,31 MPa, respectivamente, com destaque para o teor de 1,5%, que elevou a resistência em 48% frente ao concreto não reforçado.

Farhan, Sheikh e Hadi (2020), por sua vez, analisaram compósitos geopoliméricos (cinza volante e escória) reforçados com fibras retas (fator de forma 65). Volumes de 1%, 2% e 3% de fibras aumentaram a resistência para 3,7 MPa (+23,3%), 4,7 MPa (+56,7%) e 4,0 MPa (+33,3%), respectivamente, em relação à geopolímero sem reforço. Os ganhos são associados à distribuição homogênea e orientação aleatória das fibras, que inibem a propagação de fissuras. Entretanto, teores acima de 2% reduziram o desempenho devido à aglomeração de fibras, menor trabalhabilidade e aumento de vazios (Farhan; Sheikh e Hadi, 2020).

A Figura 52 ilustra a análise das cargas residuais (em kN) em função do deslocamento vertical, onde, em cada barra, a porcentagem indicada na base representa a razão entre a carga residual em um determinado deslocamento e a carga máxima de referência (Pf).

Figura 52 - Análise das cargas residuais (kN) em função do deslocamento vertical (0,5–4,0 mm) para geopolímeros reforçados com fibra de aço. Os valores percentuais indicam a razão entre a carga residual e a carga máxima de referência (Pf).



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 29 apresenta a relação entre a carga máxima de referência (Pf) e as cargas residuais para os deslocamentos avaliados (de 0,5 mm a 4,0 mm), incluindo os dados descritivos de cada parâmetro (média, desvio padrão e coeficiente de variação) para as diferentes formulações de geopolímeros reforçados com fibra de aço.

Ao comparar as formulações com 2,0% de fibra, observa-se que a MC80-PV20-AL-FM2.0 apresenta desempenho inferior à MC100-PV0-FM2.0, evidenciando que, embora a adição de pó de vidro possa proporcionar um destino adequado a um resíduo, ela pode comprometer a ligação fibra-matriz e alterar a microestrutura, resultando em menor eficiência mecânica em deslocamentos intermediários e avançados. Os testes estatísticos indicam que a incorporação de 1,5% de fibra otimiza a eficiência do reforço, enquanto volumes superiores podem ocasionar problemas de aglomeração, prejudicando a homogeneidade da matriz.

Tabela 29 - Relação entre a carga máxima de referência (P_f) e as cargas residuais nos deslocamentos de 0,5 a 4,0 mm para as formulações de geopolímeros reforçados com fibra de aço.

Traço	Parâmetro (kN)	Média (kN)	Desv. Pad. (kN)	CV (%)	Razão entre P_f
MC100-PV0-FM1.0	P_f	39,32	4,14	10,53%	-
	P0,5	33,90	7,63	22,50%	86,22%
	P1,5	18,45	2,31	12,55%	46,91%
	P2,5	14,35	2,76	19,24%	36,50%
	P3,5	10,69	2,96	27,71%	27,18%
	P4,0	8,99	2,82	31,34%	22,88%
MC100-PV0-FM1.5	P_f	46,70	2,45	5,24%	-
	P0,5	41,57	4,89	11,76%	89,01%
	P1,5	25,18	4,08	16,19%	53,91%
	P2,5	17,97	2,35	13,06%	38,48%
	P3,5	13,81	2,35	16,99%	29,57%
	P4,0	12,07	2,63	21,77%	25,85%
MC100-PV0-FM2.0	P_f	52,06	3,89	7,47%	-
	P0,5	44,58	7,38	16,56%	85,62%
	P1,5	26,62	6,31	23,70%	51,14%
	P2,5	18,75	4,72	25,16%	36,00%
	P3,5	13,12	2,53	19,31%	25,20%
	P4,0	10,98	1,46	13,30%	21,08%
MC80-PV20-AL-FM2.0	P_f	36,88	5,07	13,74%	-
	P0,5	32,23	6,93	21,49%	87,38%
	P1,5	19,31	3,78	19,60%	52,35%
	P2,5	13,01	2,69	20,67%	35,29%
	P3,5	9,11	1,95	21,36%	24,71%
	P4,0	7,80	1,58	20,26%	21,15%

Fonte: Autor (2025).

4.2.6.1 Tenacidade (energia total)

Na Tabela 30 são apresentados os resultados de tenacidade (J) aos 28 dias, juntamente com a carga máxima de fissuração (P_f). A tenacidade, que reflete resistência do material a propagação de trincas, e a carga máxima foram analisadas, utilizando a formulação MC100-PV0-FM1.0 de referência para comparação com as demais formulações.

Tabela 30 - Resultados de tenacidade das formulações aos 28 dias.

Traços	Tenacidade (J)	VP (%)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média da Carga Máxima P_f (kN)
MC100-PV0-FM1.0	76,56	-	11,29	14,74%	39,32
MC100-PV0-FM1.5	98,69	28,91%	9,29	9,41%	46,70
MC100-PV0-FM2.0	103,07	34,63%	19,63	19,05%	52,06
MC80-PV20-AL-FM2.0	73,77	-3,64%	14,24	19,30%	36,88

Nota: VP (%) indica a variação percentual da média da formulação analisada em relação ao traço de com a menor incorporação de fibras MC100-PV0-FM1.0.

A análise dos dados de tenacidade, obtidos a partir dos ensaios de duplo puncionamento em geopolímeros reforçados com fibras de aço, revela diferenças notáveis entre as formulações, com base na formulação MC100-PV0-FM1.0 de referência. Esta formulação apresenta uma tenacidade média de 76,56 J, com um desvio padrão de 11,29 J e um coeficiente de variação (CV) de 14,74%. A carga máxima média alcançada foi de 39,32 kN.

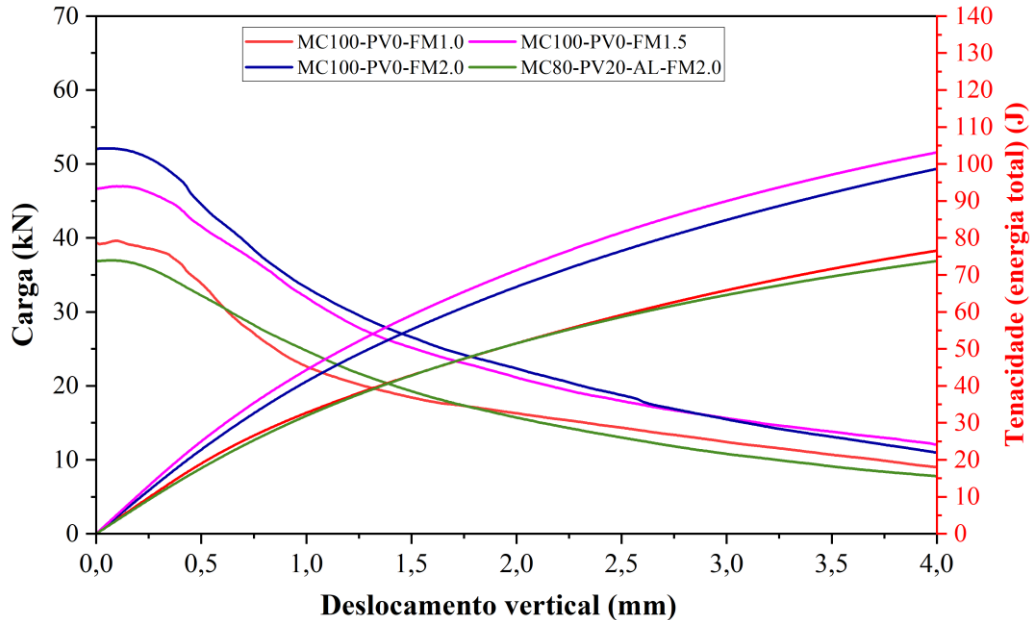
Comparando com a formulação MC100-PV0-FM1.5, que contém 1,5% de fibra de aço, observa-se um aumento de 28,91% na tenacidade, alcançando 98,69 J, com um desvio padrão de 9,29 J e um CV reduzido para 9,41%, indicando maior consistência nos resultados. A carga máxima média também é maior, atingindo 46,70 kN. Este aumento na tenacidade e resistência reflete a maior capacidade de absorção de energia com o incremento no teor de fibra de aço.

A formulação MC100-PV0-FM2.0, com 2,0% de fibra de aço, demonstra o maior aumento percentual de tenacidade, 34,63% em relação à referência, atingindo 103,07 J. No entanto, o desvio padrão também aumenta para 19,63 J, resultando em um CV de 19,05%, evidenciando maior variabilidade nos resultados. A carga máxima média de 52,06 kN confirma o ganho de resistência com o aumento do teor de fibras, apesar da maior dispersão nos dados.

Por outro lado, a formulação MC80-PV20-AL-FM2.0, que inclui 20% de pó de vidro e alumina hidratada, apresenta uma tenacidade média de 73,77 J, correspondendo a uma redução de 3,64% em relação à referência. O desvio padrão é de 14,24 J, com um CV de 19,30%, refletindo alta variabilidade. A carga máxima média também é menor, atingindo 36,88 kN. A inclusão de pó de vidro e alumina amorfa parece impactar negativamente tanto na tenacidade quanto na resistência, indicando uma redução na capacidade de absorção de energia. A Figura 53 apresenta o diagrama de carga versus deslocamento vertical e energia versus deslocamento vertical, mostrando a média das diferentes formulações.

Em correlação com os dados anteriores de resistência à tração por duplo puncionamento, observa-se que as formulações com maior teor de fibra de aço tendem a exibir tanto maior resistência quanto maior tenacidade, refletindo na capacidade das fibras de reforçar a matriz geopolimérica e melhorar a absorção de energia durante a falha. No entanto, a inclusão de pó de vidro e alumina hidratada, embora empregada com o intuito do equilíbrio estequiométrico em relação a matriz MC100, demonstra diminuir tanto a resistência quanto a tenacidade em comparação ao mesmo teor de adição de fibras, possivelmente devido a alterações na microestrutura do material e na eficácia da geopolimerização, impactando na sua propriedade mecânica. Nesse sentido, somente o traço MC100PV0-FM1.0 foi equivalente estatisticamente ao traço MC80PV20-AL-FM2.0.

Figura 53 - Diagrama de carga versus deslocamento vertical e energia versus deslocamento vertical das argamassas reforçadas com fibra.



Fonte: Autor (2025).

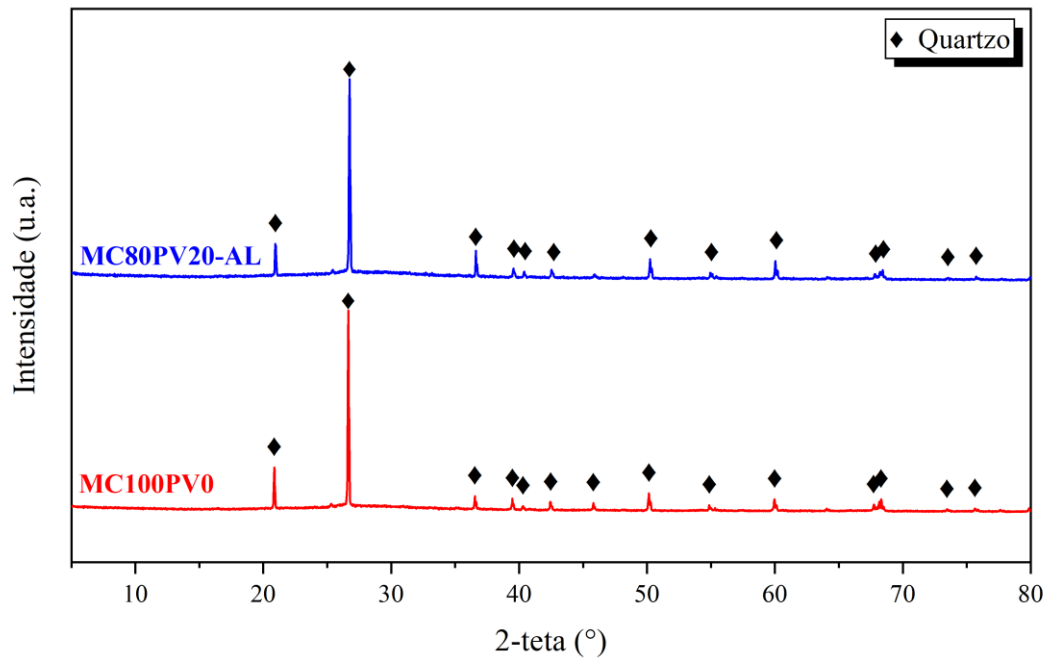
No entanto, embora diferenças aparentes entre as formulações sejam observadas, as análises estatísticas não indicaram diferenças significativas nos resultados de tenacidade. Isso pode ser atribuído aos altos coeficientes de variação apresentados que indicam uma grande variabilidade nos dados experimentais, possivelmente mascarando diferenças que poderiam ser consideradas significativas. Dessa forma, a dispersão nos resultados contribui para a ausência de significância estatística, apesar das tendências observadas e estão de acordo com coeficientes de variação da literatura em estudos com concreto reforçados com fibra que variam de 8,5 a 38,4% (Galobardes *et al.*, 2019; Carmona, Molins e García, 2020).

4.2.7 Caracterização microestrutural dos geopolímeros

4.2.7.1 Difração de raios-X (DRX)

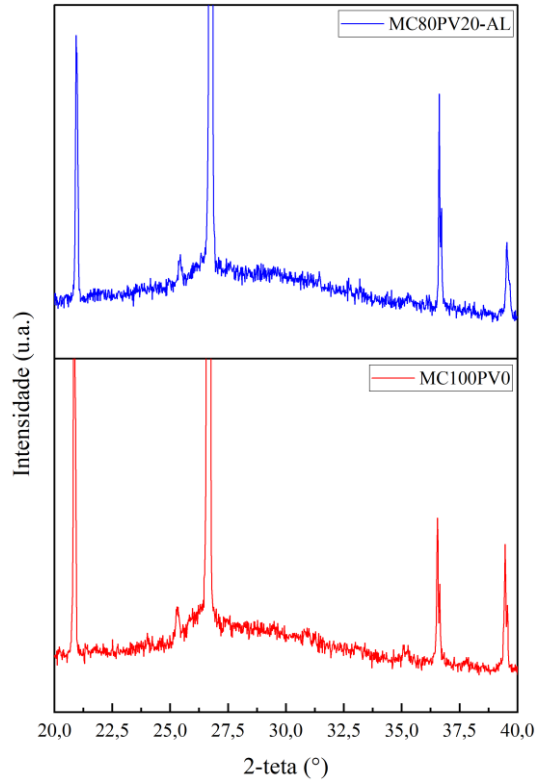
A análise de difração de raios-X (DRX) das duas formulações de geopolímero, MC100PV0 (argamassa à base de metacaulim) e MC80PV20-AL (argamassa contendo metacaulim, pó de vidro e alumina), apresenta padrões cristalográficos muito similares, conforme apresentado nas Figuras 54 e 55.

Figura 54 - Difração de raios-X (DRX) das pastas dos geopolímeros MC100PV0 (cor vermelha) e MC80PV20-AL (cor azul).



Fonte: Autor (2025).

Figura 55 - Difração de raios-X (DRX) das pastas dos geopolímeros MC100PV0 (cor vermelha) e MC80PV20-AL (cor azul) no intervalo de 20 a 40°.



Fonte: Autor (2025).

Após a ativação alcalina, ambos os difratogramas exibem padrões praticamente idênticos, caracterizados por um amplo halo amorfo centrado em $2\theta \approx 20^\circ\text{--}35^\circ$, típico da desordem estrutural dos aluminossilicatos amorfos formados a partir do metacaulim (estruturas N-A-S-H). O pico proeminente em $26,6^\circ 2\theta$, atribuído ao quartzo, apresenta intensidade similar em ambas as formulações, evidenciando a presença desta impureza comum em geopolímeros à base de metacaulim.

A incorporação de pó de vidro e alumina na formulação MC80PV20-AL não resultou em alterações detectáveis por DRX nas características cristalográficas da matriz geopolimérica. A similaridade dos difratogramas sugere que o pó de vidro permaneceu predominantemente não reagido na matriz, mantendo sua natureza amorfa sem formar novas fases cristalinas detectáveis. Essa observação indica que a alumina atua como material relativamente inerte no sistema, não promovendo modificações estruturais significativas identificáveis pela técnica de DRX.

Para uma avaliação quantitativa precisa das mudanças estruturais, foi conduzido refinamento de Rietveld utilizando o software Proex, técnica que permite detectar variações sutis na cristalinidade não perceptíveis pela análise visual dos difratogramas (Tabela 31).

Tabela 31 - Análise de Rietveld - pastas MC80PV20-AL e MC100PV0

Parâmetro	MC80PV20-AL	MC100PV0 (REF)	
Rwp	10,16	8,88	
Rexp	7,20	6,45	
χ^2	19,912	18,954	
GoF	14,111	13,767	
Fase Mineralógica	MC80PV20-AL	MC100PV0 (REF)	
Quartzo (SiO₂)	6,2%	8,5%	
SiO₂ (p3121)	93,8%	91,5%	
Elemento	MC80PV20-AL	MC100PV0 (REF)	Diferença (%)
O (Oxigênio)	52,20%	51,82%	+0,38
Si (Silício)	47,80%	48,18%	-0,38

Fonte: Autor (2025).

Os resultados do refinamento revelaram alterações discretas, porém mensuráveis, na composição das fases. A substituição parcial do metacaulim por pó de vidro na formulação MC80PV20-AL resultou em uma redução na fração de quartzo cristalino de 8,5% (MC100PV0) para 6,2% (MC80PV20-AL), correspondente a uma diminuição de 2,3 pontos percentuais. Paralelamente, a fração de SiO₂ amorfa aumentou de 91,5% para 93,8%, representando um incremento de 2,3 pontos percentuais na fase amorfa.

Os resultados quantitativos confirmam que a incorporação de pó de vidro contribui para o aumento do teor amorfo da matriz geopolimérica, embora essa variação não seja visualmente

detectável nos difratogramas. O pó de vidro, sendo intrinsecamente amorfo, adiciona conteúdo silicoso não cristalino ao sistema, elevando a fração amorfa total. A alumina hidratável apresentou participação limitada no processo de geopolimerização, possivelmente relacionada às condições específicas de ativação alcalina empregadas neste estudo, como concentração do ativador, temperatura de cura e tempo de reação. O quartzo residual, identificado em ambas as formulações, corresponde a impurezas minerais presentes no metacaulim original e mantém-se relativamente estável durante o processo de geopolimerização.

Tal comportamento já foi observado por Ziejewska *et al.* (2023) que demonstraram a conversão de fases cristalinas em amorfas em geopolímeros contendo vidro reciclado. A redução no teor total de Si na composição química da MC80PV20-AL pode ser explicada por três fatores principais: (i) a diluição relativa do SiO₂, uma vez que a introdução de vidro e alumina alterou a proporção dos componentes precursores; (ii) a diferença na área superficial específica dos materiais precursores, sendo que o pó de vidro (0,681 m²/g) apresenta área significativamente menor que o metacaulim (15,798 m²/g), o que pode resultar em menor superfície disponível para dissolução e participação no processo de geopolimerização; e (iii) a redistribuição do Si entre fases secundárias, como sódio e cálcio-aluminossilicatos hidratados (N-A-S-H e C-A-S-H), que podem modificar a participação efetiva do silício na formação da matriz geopolicondensada. A reatividade da sílica amorfa depende de sua origem e estrutura (Costa *et al.*, 2021).

Apesar dessas variações, a análise estatística do refinamento apresentou valores similares de ajuste para ambas as pastas, com GoF de 1.4111 (MC80PV20-AL) e 1.3767 (MC100PV0), sugerindo que as diferenças estruturais identificadas não comprometeram significativamente a coerência dos modelos cristalográficos adotados. O aumento da fração amorfa na MC80PV20-AL pode estar associado a maior polimerização da matriz geopolicondensada, refletindo na formação de redes mais desordenadas e possivelmente impactando suas propriedades reológicas e mecânicas (Madai *et al.*, 2015). Essa relação entre grau de polimerização e fração amorfa foi previamente explorada na literatura, onde se demonstrou que a introdução de materiais ricos em sílica amorfa pode promover uma redistribuição estrutural sem necessariamente aumentar a resistência mecânica (Kriven *et al.*, 2007).

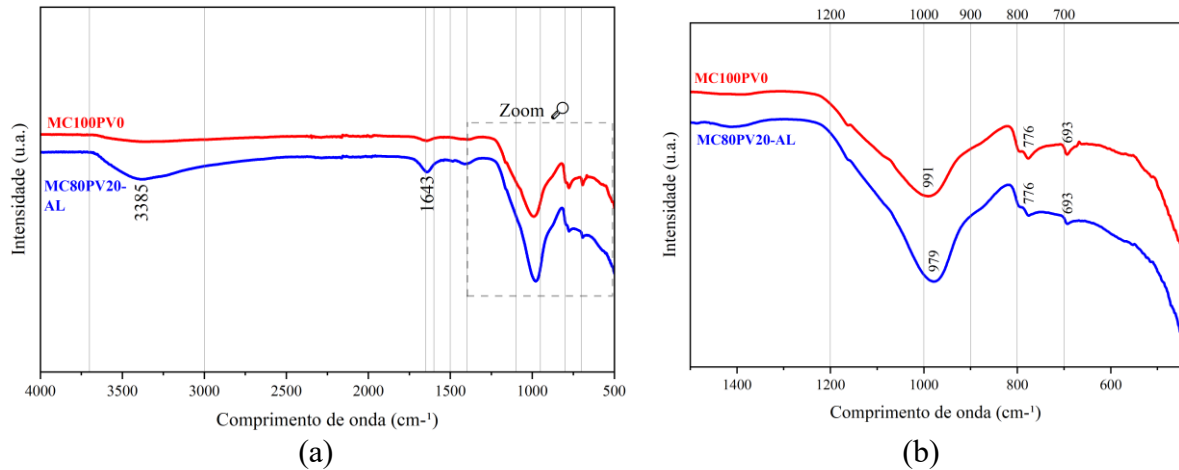
Dessa forma, os resultados de DRX indicam que a adição de vidro em pó e alumina altera a composição das fases cristalinas e amorfas detectáveis por esta técnica. Maior quantidade de fases amorfas, pode ser vantajosa para aplicações específicas, pois estudos

indicam que geopolímeros com alta fração amorfa pode apresentar maior durabilidade em determinados ambientes (Vogt *et al.*, 2019).

4.2.7.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Nas Figuras 56 (a) e (b), são apresentados os resultados do ensaio de FTIR dos geopolímeros, com o traço MC100-PV0 representado na cor vermelha e o traço MC80-PV20-AL na cor azul. Esses resultados permitem identificar as principais bandas características relacionadas à estrutura dos materiais analisados.

Figura 56 - Espectro de FTIR das argamassas geopoliméricas MC100PV0 (em vermelho) e MC80PV20-AL (em azul): (a) abrangendo a faixa de 4000 a 500 cm^{-1} ; (b) abrangendo a faixa de 1500 a 500 cm^{-1} .



Fonte: Autor (2025).

A caracterização da geopolimerização por meio de espectros de FTIR revela bandas vibracionais distintas associadas à formação de ligações Si-O-Al e Si-O-Si, que são indicativas do processo de geopolimerização. A presença de fortes ligações Si-O-Al sugere que o alumínio desempenha um papel fundamental na formação da rede, aumentando assim a integridade estrutural do geopolímero. Além disso, a análise facilita o monitoramento do processo de formação de gel ao longo do tempo, com os espectros iniciais exibindo picos proeminentes correspondentes às vibrações de Al-O e Si-O que evoluem à medida que o geopolímero cura. Essa evolução reflete a transição de uma estrutura de gel desordenada para uma rede mais reticulada e estável, ressaltando a natureza dinâmica da geopolimerização (Provis e Bernal, 2014).

A eficiência da geopolimerização foi avaliada pela análise da região espectral entre 950 e 1100 cm^{-1} . Nesse intervalo, o geopolímero MC100PV0 (somente metacaulim) exibiu um pico em 991 cm^{-1} , enquanto a formulação MC80PV20-AL (metacaulim, pó de vidro e alumina)

exibiu um pico em 979 cm^{-1} . A mudança observada para um número de onda mais baixo na amostra MC80PV20-AL sugere uma maior incorporação de ligações Si-O-Al, indicativa de geopolimerização menos completa em comparação com a amostra MC100PV0, que é dominada por ligações Si-O-Si. Uma mudança maior no número de onda geralmente reflete uma rede de polimerização mais extensa, formada principalmente por estruturas de silicato (Yusuf, 2023).

Na região de 1400 a 1500 cm^{-1} , a amostra MC80PV20-AL apresentou uma curvatura um pouco mais pronunciada em relação à MC100PV0, embora nenhum dos traços tenha apresentado picos bem definidos. Essa sutil diferença sugere pequenas variações no ambiente químico ou interações dentro da matriz. A 870 cm^{-1} , ambos os geopolímeros demonstraram comportamento espectral semelhante, indicando formação mínima de efluorescência. No entanto, foi observada uma aparência esbranquiçada na superfície da amostra MC80PV20-AL, provavelmente associada à presença de alumina. São necessárias mais investigações para estabelecer uma correlação definitiva entre o clareamento da superfície e o teor de alumina empregado.

A região entre 3000 e 3700 cm^{-1} reflete as interações relacionadas à água e grupos hidroxila. A formulação MC80PV20-AL exibiu uma diminuição mais acentuada da transmitância em 3385 cm^{-1} , indicando a presença dos grupos hidroxila característicos da alumina hidratável Alphasorb 300. Além disso, em 1643 cm^{-1} , a formulação MC80PV20-AL apresentou um pico mais intenso do que a MC100PV0, atribuído ao modo de dobramento da água estrutural presente na alumina hidratada. Essas observações confirmam que a alumina mantém suas características de hidratação mesmo após incorporação na matriz geopolimérica, o que pode influenciar seu comportamento reativo no sistema.

A faixa de 450 a 500 cm^{-1} não apresentou diferenças significativas entre os dois geopolímeros, sugerindo a ausência de fases secundárias ou mudanças estruturais notáveis nessa região. No intervalo de 600 a 850 cm^{-1} , ambas as amostras apresentaram comportamento espectral consistente, sem grandes variações estruturais. Entretanto, foram identificados picos em 776 cm^{-1} e 693 cm^{-1} , que podem corresponder ao quartzo residual não reagido do material precursor. Esses picos destacam a presença de impurezas ou produtos de reação incompletos na matriz do geopolímero, o que exige atenção para melhorar a eficiência geral do processo de geopolimerização. Cabe destacar que a presença de areia na composição pode ter influenciado a resposta espectral, atuando como um fator de dispersão e atenuação dos sinais no FTIR das argamassas em comparação. Esse efeito pode mascarar parte das informações espectrais,

reduzindo a intensidade de certas bandas e dificultando a interpretação detalhada das transformações estruturais no material geopolimérico.

No estudo de Costa *et al.* (2023) foi demonstrado que, ao ser incorporada à matriz geopolimérica, a alumina α (coríndon) se comportou predominantemente como um material inerte, sem modificar significativamente a química da reação. Huang e Han (2011) investigaram a adição de α - Al_2O_3 em geopolímeros à base de cinza volante e observaram que, embora sua presença possa aumentar a resistência à compressão axial, a alumina não participa ativamente da geopolimerização. Sua baixa reatividade alcalina exige uma maior concentração de hidróxido de sódio para dissolver os precursores e favorecer a formação do gel geopolimérico. Assim, a alumina α pode atuar principalmente como um filler, influenciando na resistência mecânica, mas sem contribuir significativamente para a reação de policondensação dos geopolímeros.

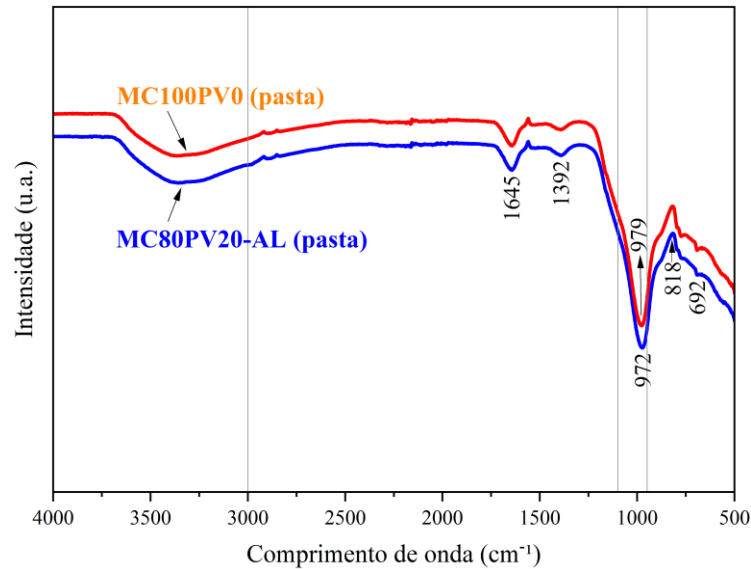
É importante destacar que, diferentemente da alumina α (coríndon) cristalina estudada nos trabalhos citados, a alumina utilizada neste estudo (Alphabond 300) caracteriza-se como uma fase metaestável e não cristalina, conforme evidenciado pelas análises de DRX. Essa natureza amorfa e metaestável implica que a alumina pode apresentar comportamento distinto, com potencial participação diferenciada na reação de geopolimerização, em contraste com a alumina α inerte. Assim, enquanto a alumina α atua principalmente como preenchedor estrutural, a alumina amorfa hidratável do presente trabalho pode influenciar a microestrutura e propriedades mecânicas da matriz geopolimérica de forma diferenciada, embora sua reatividade química ainda seja limitada devido às condições específicas de ativação alcalina empregadas.

Realizou-se análise por FTIR das pastas geopoliméricas aos 28 dias, conforme apresentado na Figura 57. A análise comparativa dos espectros de FTIR das formulações MC100PV0 e MC80PV20-AL revelou alterações espectrais discretas, caracterizadas pela ausência de formação de novos grupos funcionais significativos. As diferenças observadas limitaram-se a variações na intensidade e pequenos deslocamentos das bandas existentes, indicando modificações estruturais sutis na matriz geopolimérica sem criação de novas ligações químicas.

A ausência de bandas inéditas confirma que a incorporação de pó de vidro e alumina hidratável não induziu a formação de grupos funcionais distintos, evidenciando que o mecanismo fundamental da geopolimerização permaneceu inalterado em ambas as formulações. As alterações mais perceptíveis concentraram-se na região próxima a 1000 cm^{-1} , associada às

vibrações Si–O–Si e Si–O–Al, possivelmente relacionadas a variações no grau de polimerização da rede geopolimérica (Yuzuf, 2023).

Figura 57 - Espectro de FTIR das pastas geopoliméricas MC100PV0 (em vermelho) e MC80PV20-AL (em azul).



Fonte: Autor (2025).

Essas modificações espectrais podem ser atribuídas à participação limitada do pó de vidro e da alumina na matriz, influenciando a distribuição das ligações sem introduzir novos grupos químicos. A alumina amorfa pode ter afetado a proporção relativa de ligações Al–O–Si na estrutura, enquanto o pó de vidro, rico em sílica, pode ter promovido reorganização local da rede Si–O–Si. Contudo, tais efeitos manifestaram-se apenas como pequenos deslocamentos e variações de intensidade, confirmando o caráter sutil das interações.

Os resultados indicam que a adição de pó de vidro e alumina promoveu modificações sutis no ambiente químico local da matriz geopolimérica, evidenciadas por pequenos deslocamentos e variações de intensidade das bandas espectrais, sem alterar sua composição química fundamental. Embora essas alterações possam influenciar propriedades mecânicas por meio de mudanças no grau de polimerização e na proporção relativa das ligações existentes, não evidenciam reorganização estrutural significativa ou formação de novas fases, confirmando que os materiais adicionados atuam predominantemente como materiais de preenchimento.

Em síntese, a participação ativa do pó de vidro e da alumina poderia resultar na formação de fases zeolíticas organizadas, aluminossilicatos com maior grau de polimerização e uma microestrutura híbrida amorfa-semicristalina, que integraria as vantagens intrínsecas de ambos os estados estruturais (Castillo *et al.*, 2022). Essa configuração propiciaria a conjugação das propriedades benéficas dos materiais amorfos, como durabilidade e resistência química, com a

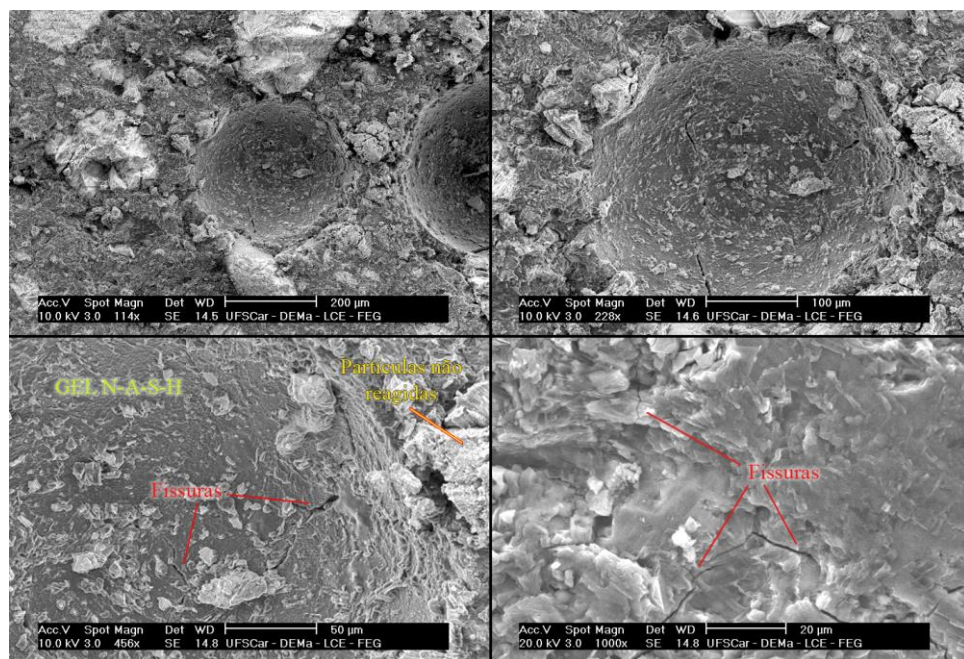
estabilidade estrutural característica dos materiais semicristalinos, potencializando assim o desempenho global da matriz geopolimérica.

4.2.7.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

a) Argamassas geopoliméricas sem fibras

Nas Figuras 58 e 59, são apresentadas as análises microestruturais realizadas por MEV nos traços MC100-PV0 e MC80PV20-AL, respectivamente. As amostras destinadas à análise microestrutural não foram extraídas de corpos de prova submetidos a ensaios de propriedades mecânicas e ensaiadas na idade de 63 dias. Em vez disso, foram moldadas separadamente, em paralelo à produção dos demais corpos de prova, sendo exclusivamente utilizadas para o ensaio de MEV.

Figura 58 - MEV da argamassa geopolimérica MC100PV0, obtidas em diferentes níveis de ampliação (114x, 228x, 456x e 1000x).



Fonte: Autor (2025).

As imagens de SEM da argamassa de geopolímero (MC100PV0) em ampliações variadas (114x a 1000x) revelam características microestruturais importantes, incluindo poros, fissuras e a morfologia da matriz de geopolímero. Em ampliações menores (114x e 228x), poros de ar incorporado, provavelmente formados devido à compactação incompleta, à evaporação da água ou ao aprisionamento de ar durante o processo de mistura. Esses poros podem afetar negativamente as propriedades mecânicas e a durabilidade do material. Em ampliações maiores (456x e 1000x), são observados detalhes microestruturais mais finos da matriz do geopolímero,

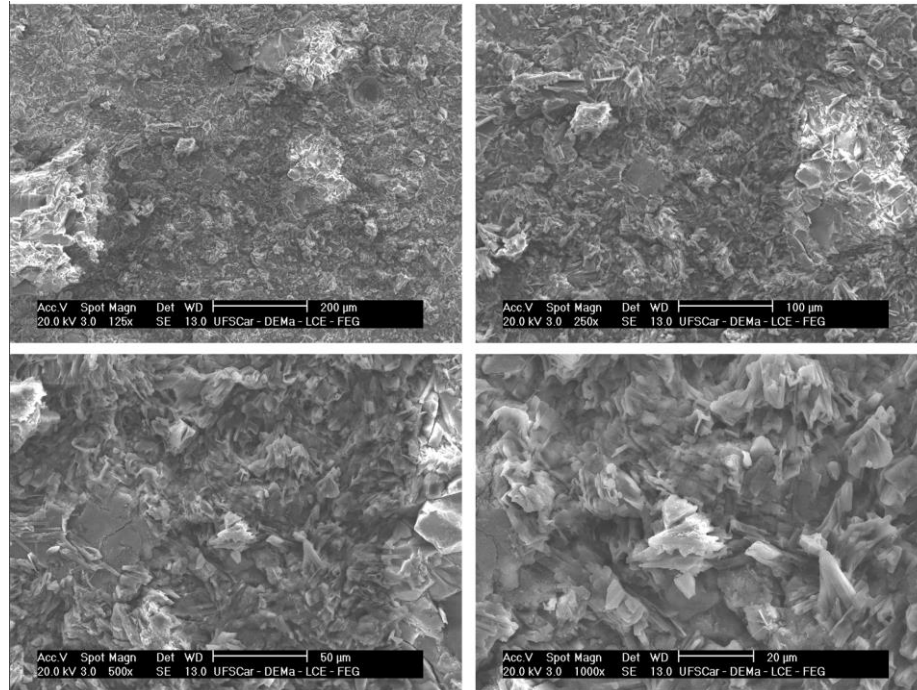
incluindo zonas densas e estruturas escamosas e em camadas, que são características de produtos de geopolimerização como o gel N-A-S-H conforme apresentado pela Figura 61.

As micrografias evidenciam a presença de fissuras, particularmente em maiores ampliações. Tais fissuras podem originar-se da retração ocorrida durante o processo de cura, principalmente em decorrência da perda de água e do ressecamento, ou ainda indicar uma adesão interfacial deficiente entre a matriz geopolimérica e as partículas de areia. Em determinadas regiões, observa-se que essas descontinuidades tendem a se propagar através de zonas de menor resistência ou ao longo de limites interfaciais, evidenciando áreas de possível fragilidade mecânica. Cabe ressaltar que parte dessas fissuras pode também estar associada ao processo de preparação da amostra, uma vez que o corte pode ter induzido tensões adicionais no material, resultando na formação de microfissuras artificiais que não representam necessariamente defeitos intrínsecos da matriz.

A morfologia densa e escamosa observada nas ampliações maiores (456x e 1000x) sugere a formação de um gel amorfo de N-A-S-H, o principal aglutinante responsável pela resistência do geopolímero. Os géis N-A-S-(H) são caracterizados por um menor teor de cálcio e um maior teor de sódio, o que pode levar a uma estrutura mais amorfa. As imagens de MEV podem apresentar uma aparência mais particulada ou granular, refletindo a natureza menos interconectada da rede do gel (Provis e Bernal, 2014).

Entretanto, a presença de partículas de metacaulim não reagidas ou parcialmente reagidas em algumas áreas pode indicar geopolimerização incompleta, o que também pode contribuir para a formação de fissuras e heterogeneidade na microestrutura. O estudo de Duxson *et al.* (2007) em que os corpos de prova caracterizados por uma relação Si/Al mais alta (acima de 1,90) demonstram uma diminuição na resistência, o que contradiz as expectativas derivadas apenas da análise da composição. Essa redução na resistência associada ao aumento do teor de sílica foi atribuída à presença de material não reagido nos corpos de prova, que funciona como locais de defeito. Ademais, observaram que as micrografias de MEV revelaram partículas de metacaulim não reagidas incorporadas à matriz do geopolímero, aparecendo como vazios em forma de placa criados durante o processo de polimento. A existência desses materiais não reagidos pode servir como locais de defeito que comprometem a resistência mecânica do geopolímero.

Figura 59 - MEV da argamassa geopolimérica MC80PV20-AL, obtidas em diferentes níveis de ampliação (125x, 250x, 500x e 1000x).

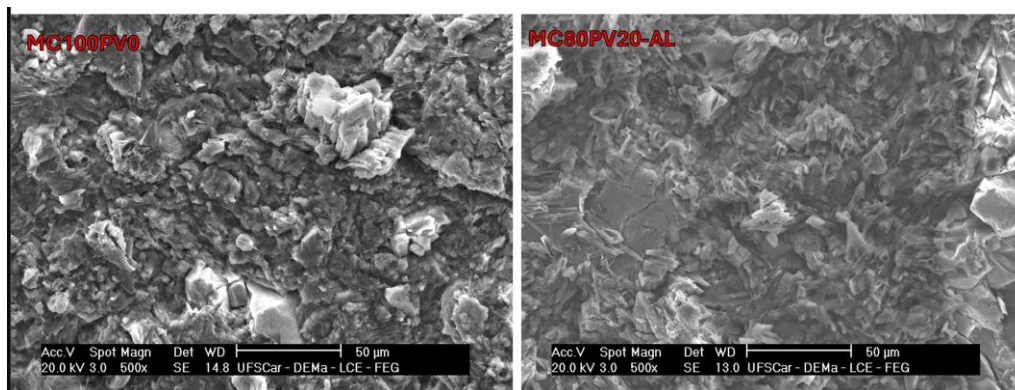


Fonte: Autor (2025).

A presença de formações irregulares e microestruturas rugosas sugere a reação incompleta dos precursores ou a presença de partículas não reagidas. Essa heterogeneidade pode influenciar a distribuição de tensões dentro do compósito, afetando sua resistência mecânica e durabilidade. Em magnificações mais elevadas (500x e 1000x), observam-se formações cristalinas em placas, possivelmente associadas à formação de produtos de reação ou outras fases aluminosilicáticas no processo de geopolimerização.

A Figura 60 apresenta a comparação entre as imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das argamassas geopoliméricas MC100PV0 e MC80PV20-AL.

Figura 60 - Imagens de MEV das argamassas geopoliméricas MC100PV0 e MC80PV20-AL, obtidas com ampliação de 500x.



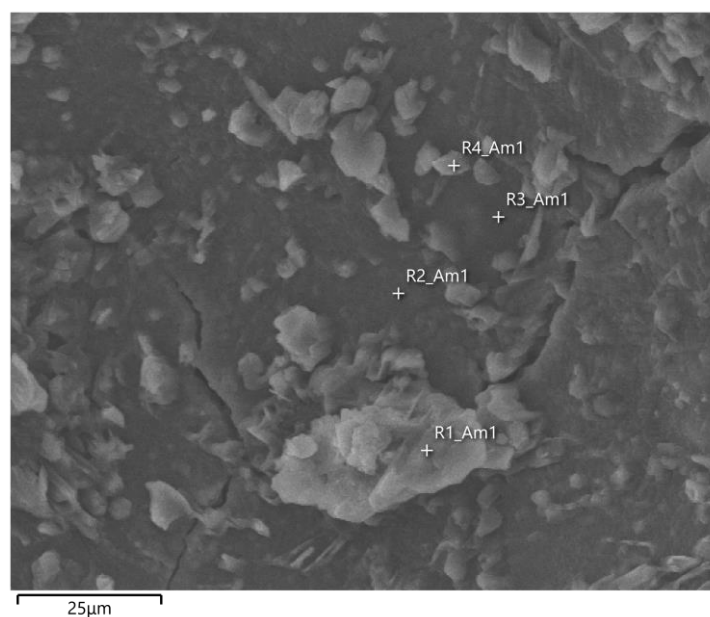
Fonte: Autor (2025).

Na primeira imagem (MC100PV0), observa-se uma superfície relativamente contínua, com a presença de partículas não reagidas oriundas do metacaulim. Além disso, a microestrutura exibe poucas fissuras visíveis, sugerindo a formação do gel geopolimérico. Já na segunda imagem (MC80PV20-AL), onde ocorre a substituição parcial do metacaulim por pó de vidro e adição de alumina, identifica-se novamente a presença de partículas não reagidas, algumas das quais se assemelham a agregados. A adição de alumina, por ser um material mais fino, pode ter contribuído para um melhor empacotamento das partículas sólidas, reduzindo a quantidade de vazios internos. Esses resultados indicam que tanto o pó de vidro quanto a alumina atuaram predominantemente como fillers, preenchendo a matriz sem promover reações expressivas de geopolimerização. Como corroborado pelas análises de DRX e FTIR, a alteração na cristalinidade da pasta e a ausência de novos grupos funcionais evidenciam que esses precursores não contribuíram significativamente para a formação de um sistema geopolimérico mais coeso, impactando na microestrutura e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas.

b) Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) da argamassa MC100PV0

A Figura 61 apresenta os resultados da análise por espectroscopia de dispersão de energia (EDS) realizada em diferentes regiões pontuais da amostra de argamassa geopolimérica MC100PV0.

Figura 61 - Análise comparativa por EDS - ordenada por percentual em massa de elemento (maior para menor) da argamassa MC100PV0 na escala de 25 micrômetros.



Elemento	R1_Am1 (Wt%)	R1_Am1 (At%)	R2_Am1 (Wt%)	R2_Am1 (At%)	R4_Am1 (Wt%)	R4_Am1 (At%)
O	39,28	51,82	53,78	64,23	57,56	67,29
Si	33,37	25,08	14,47	9,85	9,06	6,04
Na	14,69	13,48	27,97	23,25	29,89	24,32
Al	11,37	8,89	3,77	2,67	3,20	2,22
Ca	1,17	0,62	0,00	0,00	0,30	0,14
Mg	0,12	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Autor (2025).

Com base na análise de espectroscopia por dispersão de energia (EDS), foi possível identificar a composição elementar de diferentes regiões da matriz de um geopolímero à base de metacaulim, ativado por solução alcalina composta por hidróxido de sódio e silicato de sódio, e com adição de areia como agregado. Os resultados revelam variações importantes na concentração dos elementos químicos presentes, refletindo a heterogeneidade da matriz em função do grau de reação dos precursores e da distribuição dos constituintes.

A região R1_Am1 apresentou altos teores de oxigênio (39,28 wt%) e silício (33,37 wt%), seguidos por sódio (14,69 wt%) e alumínio (11,37 wt%). Essa composição é compatível com a presença predominante de gel de N-A-S-H (sódio-alumínio-silicato-hidratado), formado a partir da reação do metacaulim com o ativador alcalino. A elevada concentração de silício e alumínio sugere uma região bem polimerizada da matriz geopolimérica, enquanto o oxigênio reforça a formação de estruturas de silicato e aluminossilicato.

Já na região R2_Am1, observou-se um teor significativamente maior de sódio (27,97 wt%) e oxigênio (53,78 wt%), com menor presença de silício (14,47 wt%) e alumínio (3,77 wt%). Essa composição pode indicar uma região rica em fase alcalina residual ou em gel geopolimérico pouco polimerizado, onde o excesso de sódio não foi completamente incorporado à estrutura da matriz. A baixa concentração de alumínio, comparada à R1, também pode sugerir uma menor densidade de ligações do tipo Al–O–Si, fundamentais para a formação da rede tridimensional do geopolímero.

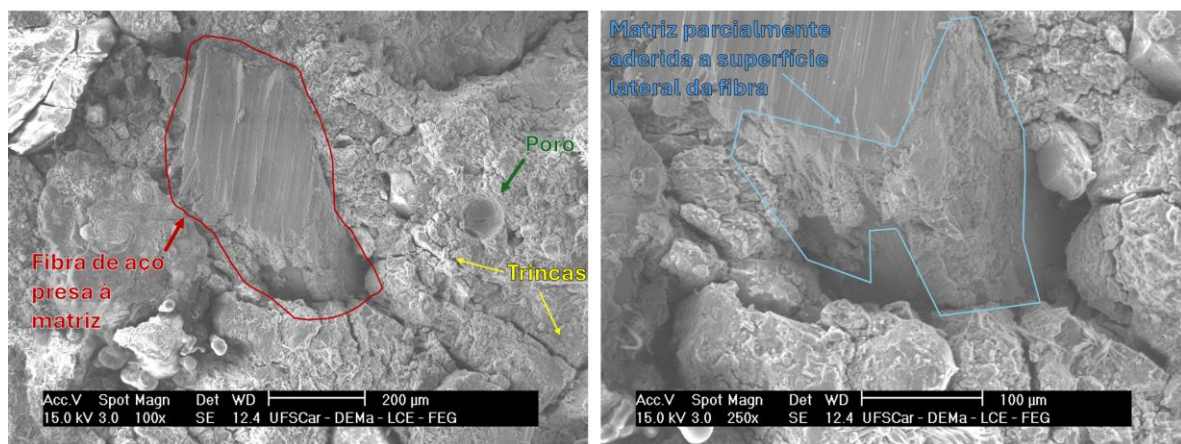
Por fim, a região R4_Am1 exibiu um perfil similar ao da R2, com alto teor de oxigênio (57,56 wt%) e sódio (29,89 wt%), e baixas concentrações de silício (9,06 wt%) e alumínio (3,20 wt%). Esses dados indicam novamente a predominância de regiões ricas em fases alcalinas ou possivelmente mal reagidas, o que pode impactar diretamente na uniformidade estrutural e nas propriedades mecânicas da argamassa geopolimérica. Em síntese, a análise EDS sugere que, apesar da presença de fases polimerizadas bem definidas (como na região R1), ainda existem zonas com alta concentração de sódio e baixa proporção de silício e alumínio, o que pode estar

relacionado à heterogeneidade da reação geopolimérica, à dispersão dos reagentes ou à influência da areia como fase inerte na matriz.

c) Argamassas geopoliméricas com fibras

Na Figura 62, observa-se em uma região distinta da matriz da amostra MC100PV0-FM1.0, a presença de uma estrutura alongada, lisa e relativamente plana com marcas lineares resultantes do processo de corte na fibra de aço e a sua incorporação na matriz geopolimérica.

Figura 62 - Imagens de MEV da argamassa geopolimérica MC100PV0-FM1.0 obtidas nas ampliações de 100x e 250x.



Na imagem com magnificação de 100x (barra de escala de 200 µm), nota-se uma visão mais ampla do compósito, permitindo a identificação da porosidade da matriz e distribuição das fibras. Já a imagem com ampliação de 250x (barra de escala de 100 µm) revela a região interfacial entre a fibra e a matriz, onde são visíveis vazios e fissuras, indicando um possível descolamento ou interação imperfeita entre a fibra e a matriz. Além disso, partículas desprendidas próximas à superfície da fibra podem sugerir um comportamento de arrancamento mecânico, impactando a tenacidade do compósito.

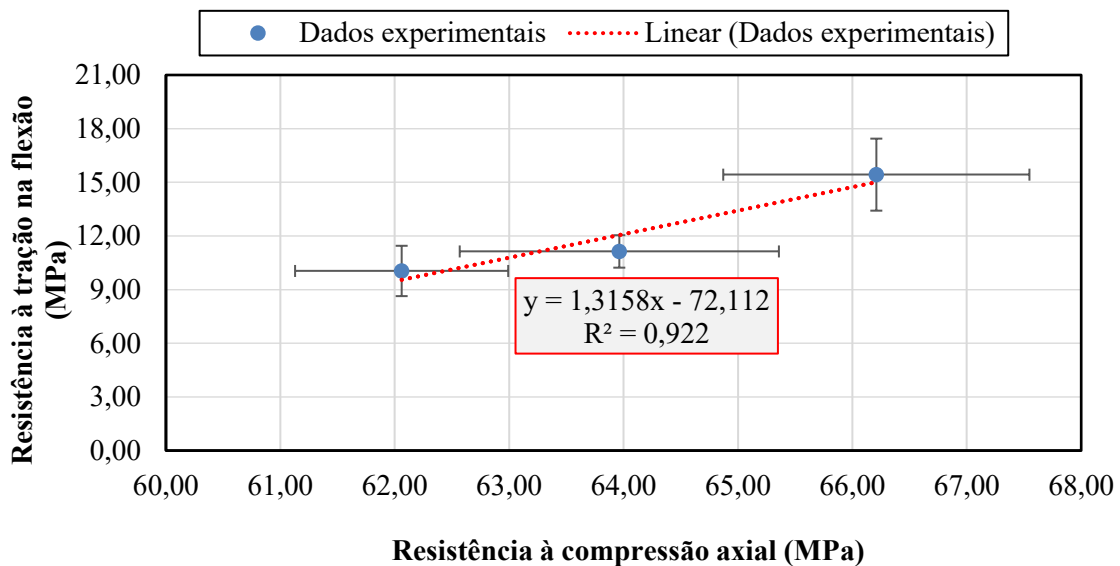
A zona de transição interfacial (ITZ) demonstra uma adesão deficiente, com lacunas e vazios aparentes. Idealmente, uma matriz geopolimérica bem aderida deveria apresentar um material mais denso e coeso ao redor da fibra. Caso essas falhas interfaciais se propaguem, podem comprometer o desempenho mecânico do material sob tensão. A presença de microporos e microfissuras na matriz geopolimérica indica possíveis retrações ou reações incompletas dos materiais ativados alcalinamente. Além disso, regiões com despreendimento de partículas da matriz podem estar associadas a tensões mecânicas ou adesão insuficiente da fibra.

4.3 CORRELAÇÕES

4.3.1 Resistência à compressão axial *versus* resistência à tração na flexão

Na Figura 63, é apresentado o gráfico que correlaciona os valores de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão exclusivamente para formulações com adição de fibras metálicas: MC100-PV0-FM1.0, MC100-PV0-FM1.5 e MC100-PV0-FM2.0. A linha de tendência foi ajustada com base nos dados experimentais, resultando na equação: $y = 1,3158x - 72,112$, com um coeficiente de determinação equivalente a 0,922.

Figura 63 - Gráfico de correlação entre resistência à compressão *versus* resistência à tração na flexão para as formulações MC100-PV0-FM1.0, MC100-PV0-FM1.5 e MC100-PV0-FM2.0, com linha de tendência representada pela equação $y=1,3158x-72,112$ ($R^2=0,922$)



Fonte: Autor (2025).

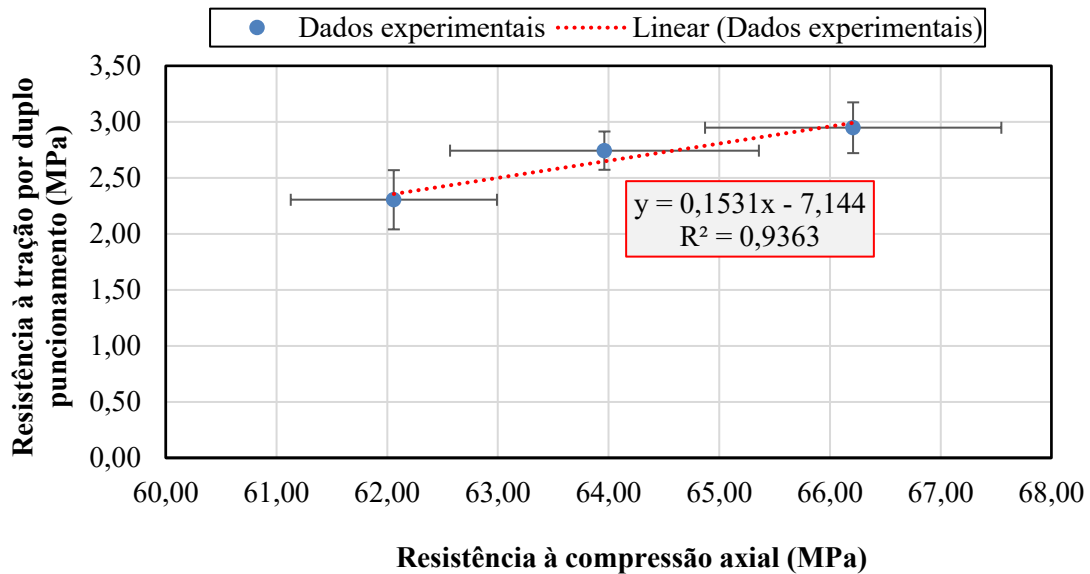
O coeficiente de determinação indica que 92,2% da variação nos valores de tração pode ser explicada pela compressão, revelando um ajuste excelente da linha de tendência aos dados experimentais. O valor elevado do R^2 sugere que a adição de fibras metálicas promove uma relação mais previsível entre compressão e tração, com menor influência de fatores externos ou erros experimentais. Esses resultados reforçam a eficiência do uso de fibras metálicas na melhoria das propriedades mecânicas do material, proporcionando maior capacidade de redistribuição de tensões e resistência em condições de tração.

4.3.2 Resistência à compressão axial *versus* Resistência à tração por duplo puncionamento (MPa)

Na Figura 64, apresenta-se o gráfico que correlaciona os valores de resistência à compressão axial e resistência à tração por duplo puncionamento (MPa) para as formulações

com adição de fibras metálicas. A linha de tendência foi ajustada com base nos dados experimentais, resultando na equação: $y = 0,1531x - 7,144$, com um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,9363$.

Figura 64 - Gráfico de correlação entre resistência à compressão axial *versus* resistência à tração por duplo puncionamento para as formulações MC100-PV0-FM1.0, MC100-PV0-FM1.5 e MC100-PV0-FM2.0, com linha de tendência representada pela equação $y=0,1531x - 7,144$ ($R^2=0,9363$)



Fonte: Autor (2025).

O elevado valor de R^2 (93,63%) demonstra uma forte correlação entre essas propriedades e reforça a hipótese de que a adição de fibras metálicas não só aprimora a capacidade do material em redistribuir tensões, mas também confere maior previsibilidade ao comportamento mecânico das argamassas geopoliméricas. Os resultados sugerem que as fibras desempenham um papel fundamental na integração da matriz, contribuindo para uma estrutura mais homogênea e resistente, essencial para aplicações em ambientes com alta demanda mecânica. Em estudo semelhante, Goaziz *et al.* (2022) desenvolveram um modelo polinomial de segundo grau que correlaciona a resistência à tração com a resistência à compressão do concreto geopolimérico reforçado com fibra de aço reta, obtendo um R^2 de 91,21%. Essa forte correlação evidencia o bom ajuste entre os dados experimentais e o modelo proposto, facilitando a previsão da resistência à tração por duplo puncionamento a partir da resistência à compressão axial, o que é crucial para o design estrutural e a avaliação de desempenho do concreto geopolimérico (Goaziz *et al.*, 2022).

4.3.3 Correlações em argamassas geopoliméricas à base de metacaulim reforçados com fibras de aço (MC100PV0) em função do volume de fibras

Os resultados apresentados na Tabela 32 e Figuras 65 (a) a (f) demonstram que a adição de fibras de aço melhora significativamente as propriedades mecânicas das formulações MC100PV0-FM. O aumento do teor de fibras resultou em maior resistência à tração na flexão, carga máxima de fissuração e tenacidade, destacando sua eficácia no controle da fissuração e na melhoria do desempenho mecânico.

Tabela 32 - Dados das correlações entre o volume de fibras de aço e as propriedades mecânicas das formulações MC100PV0-FM (1,0%, 1,5% e 2,0% de adição de fibra de aço):

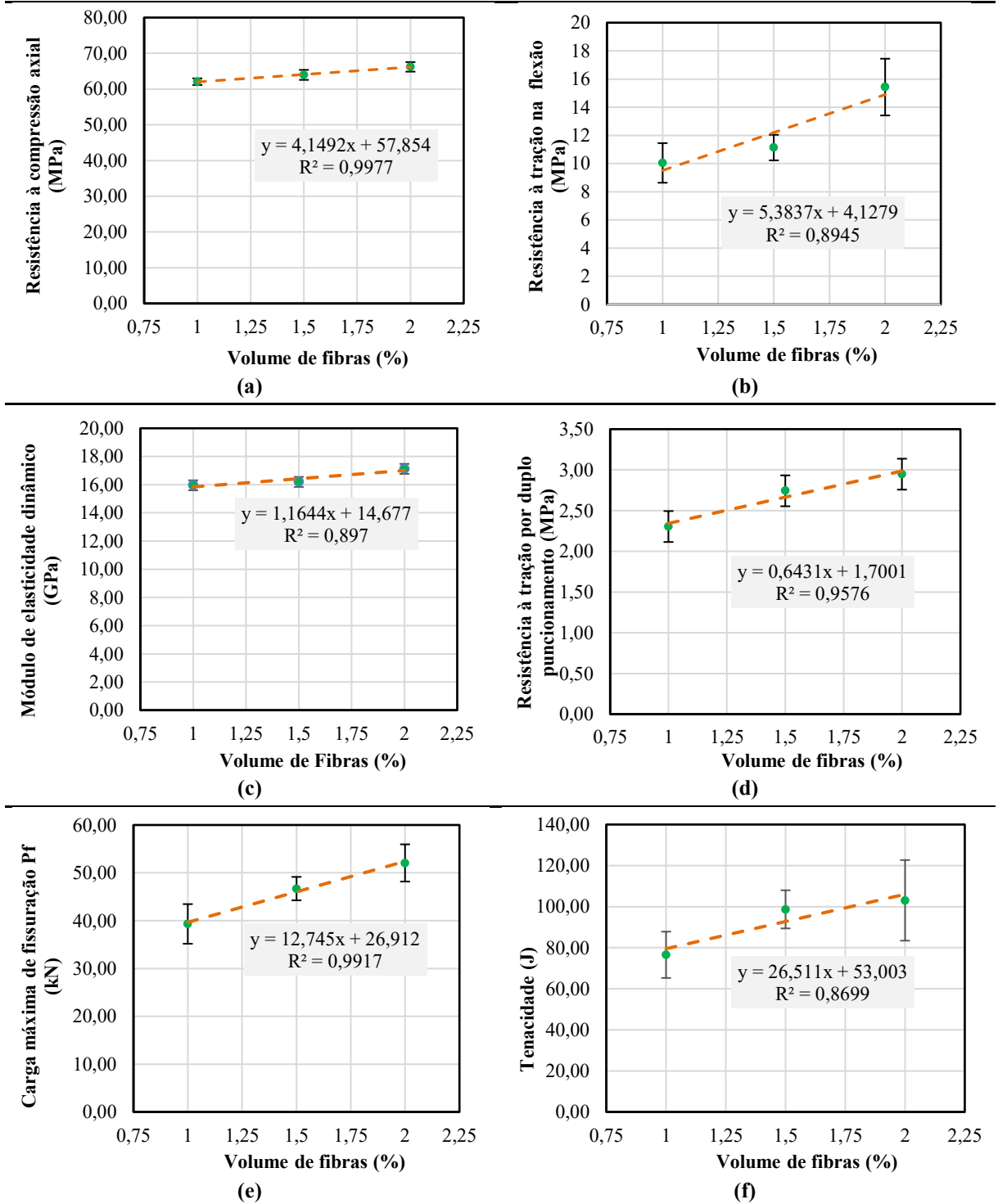
Propriedade Mecânica	Equação de Regressão Linear	R ²	MC100PV0-FM1.0 (1% Fibra)	MC100PV0-FM1.5 (1.5% Fibra)	MC100PV0-FM2.0 (2% Fibra)
Resistência à compressão axial (MPa)	$y = 4,1492x + 57,854$	0,9977	62,00 (62,06 ± 0,93)	64,07 (63,96 ± 1,39)	66,15 (66,21 ± 1,34)
Resistência à tração na flexão (MPa)	$y = 5,3837x + 4,1279$	0,8945	9,51 (10,05 ± ,41)	12,20 (11,14 ± 0,91)	14,89 (15,43 ± 2,01)
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	$y = 1,1644x + 14,677$	0,897	15,84 (15,96 ± 0,29)	16,42 (16,2 ± 0,46)	17,00 (17,12 ± 0,28)
Tensão de tração por duplo puncionamento (MPa)	$y = 0,6431x + 1,7001$	0,9576	2,34 (2,30 ± 0,26)	2,66 (2,74 ± 0,17)	2,98 (2,95 ± 0,23)
Carga Máxima de Fissuração Pf (kN)	$y = 12,745x + 26,912$	0,9917	39,66 (39,32 ± 4,14)	46,03 (46,70 ± 2,45)	52,37 (52,06 ± 3,89)
Tenacidade (J)	$y = 26,511x + 53,003$	0,8699	79,51 (76,56 ± 1,29)	92,77 (98,69 ± 9,29)	106,03 (103,07 ± 19,63)

Nota: Os valores apresentados na tabela incluem tanto os valores estimados, obtidos a partir das equações de regressão, quanto os valores reais medidos experimentalmente. Os valores reais estão destacados em negrito e entre parênteses, seguidos do respectivo desvio padrão amostral.

Fonte: Autor (2025).

O módulo de elasticidade dinâmico e a tensão de tração por duplo puncionamento também apresentaram crescimento consistente, evidenciando o impacto das fibras na rigidez e resistência do compósito. Embora a resistência à compressão axial tenha aumentado, esse efeito foi menos pronunciado, indicando que a principal contribuição das fibras está na melhoria da tenacidade e da capacidade de absorção de energia do material. Os elevados coeficientes de determinação (R²) confirmam a forte correlação entre o volume de fibras e as propriedades analisadas, com valores estimados próximos aos experimentais, validando a precisão dos modelos ajustados.

Figura 65 - Correlações entre o volume de fibras de aço e as propriedades mecânicas das formulações MC100PV0-FM (1,0%, 1,5% e 2,0% de adição de fibra de aço): (a) resistência à compressão axial; (b) resistência à tração na flexão; (c) módulo de elasticidade dinâmico; (d) tensão de tração por duplo puncionamento; (e) carga máxima de fissuração; (f) tenacidade



Fonte: Autor (2025).

4.4 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Na Tabela 33, são apresentadas as médias dos resultados obtidos das argamassas geopoliméricas estudadas, assim como a indicação de se o traço analisado é estatisticamente diferente do traço de referência (MC100-PV0). Além disso, somente nos ensaios de resistência à tração por duplo puncionamento, carga de fissuração e tenacidade, o traço analisado é comparado com o traço MC100-PV0-FM1.0, proporcionando uma análise mais abrangente das propriedades mecânicas.

Tabela 33 - Resumo dos principais resultados para as propriedades estudadas.

PROPRIEDADES	TRAÇOS					
	MC100-PV0 (REF)	MC100-PV0-FM1.0	MC100-PV0-FM1.5	MC100-PV0-FM2.0	MC80-PV20-AL	MC80-PV20-AL-FM2.0
Índice de consistência (mm)	243,33	241,00	241,67	241,33	229,33	238,00
Resistência à compressão axial - 28 dias (MPa)	45,10	62,06	63,96	66,21	43,16	58,63
Estatisticamente diferente de REF?	-	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM
Resistência à tração na flexão - 28 dias (MPa)	5,58	10,05	11,14	15,43	4,44	12,5
Estatisticamente diferente de REF?	-	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM
Módulo de elasticidade dinâmico - 28 dias (GPa)	13,26	15,96	16,2	17,12	11,22	12,95
Estatisticamente diferente de REF?	-	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO
Densidade de massa aparente - 28 dias (g/cm³)	2,08	2,13	2,15	2,22	2,12	2,23
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM
Resistência à compressão diametral - 28 dias (MPa)	4,11	5,76	6,27	8,11	3,17	6,32
Estatisticamente diferente de REF?	-	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM
Resistência à tração por duplo puncionamento (f_t) - 28 dias (MPa)	-	2,30	2,74	2,95	-	2,1
Estatisticamente diferente de MC100-PV0-FM1.0?	-	-	NÃO	SIM	-	NÃO
Carga de fissuração (P_f)	-	39,32	46,70	52,06	-	36,88
Estatisticamente diferente de MC100-PV0-FM1.0?	-	-	NÃO	SIM	-	NÃO
Tenacidade (J)	-	76,56	98,69	103,07	-	73,77
Estatisticamente diferente de MC100-PV0-FM1.0?	-	-	NÃO	NÃO	-	NÃO

Fonte: Autor (2025).

5 CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foram desenvolvidos geopolímeros à base de metacaulim, nos quais parte do precursor foi substituído por pó de vidro e alumina, e reforçados com fibras de aço retas. Foram analisados parâmetros como resistência mecânica e índice de consistência das argamassas geopoliméricas, visando a otimização da composição para a obtenção do melhor desempenho mecânico. A interpretação dos resultados permitiu avaliar a eficiência da interação entre matriz e fibras, identificar os principais desafios da formulação e orientar ajustes para maximizar a resistência mecânica, além de valorizar o aproveitamento sustentável de resíduos na produção de materiais cimentícios alternativos.

A partir das análises e dos resultados obtidos, destacam-se os seguintes aspectos:

- A adição de fibras metálicas não comprometeu a consistência das argamassas geopoliméricas no estado fresco, mantendo-se dentro da faixa de 240 ± 10 mm. O menor espalhamento observado foi de 229,33 mm para o traço de MC80PV20-AL.
- Do ponto de vista mecânico, ambas as formulações — MC100PV0 e MC80PV20-AL — apresentaram desempenhos sem diferenças estatisticamente significativas em resistência à compressão axial e à tração na flexão, ainda que os valores absolutos tenham sido superiores para MC100PV0, respectivamente, com incremento de 4,5% e 25,68% em relação a MC80PV20-AL. Os resultados indicam que ambas as argamassas possuem potencial para aplicações estruturais, atingindo níveis compatíveis com a classe C40 do concreto convencional.
- O reforço com fibras de aço resultou em ganhos expressivos nas propriedades mecânicas. O traço MC100PV0-FM2.0 atingiu 66,21 MPa em resistência à compressão axial, representando um aumento de 46,82% em relação ao traço sem fibras. Da mesma forma, o traço MC80PV20-AL-FM2.0 obteve 58,63 MPa, correspondendo a um acréscimo de 35,84% em comparação ao traço MC80PV20-AL. Em relação à resistência à tração na flexão, os incrementos foram ainda mais significativos: 176,69% para o MC100PV0-FM2.0, que atingiu 15,43 MPa, e 181,53% para o MC80PV20-AL, com valor de 12,50 MPa, em relação ao seu traço sem fibras.
- O reforço com fibras de aço contribuiu para o aumento do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos geopoliméricos, indicando maior rigidez.

Contudo, a diferença entre os teores de fibra foi menos expressiva nessa propriedade, sendo o principal benefício observado no comportamento pós-fissuração, com destaque para a elevação das tensões residuais e a melhoria da tenacidade, fatores essenciais para a capacidade de redistribuição de esforços.

- Dentre os teores de fibra analisados, o traço com 1,5% de fibra de aço em volume (MC100PV0-FM1.5) apresentou o melhor desempenho global nas propriedades mecânicas, especialmente em tensões residuais e tenacidade (energia total absorvida), sendo considerado o teor mais eficiente para reforço de geopolímeros à base de metacaulim.
- Em relação à densidade de massa no estado endurecido, observou-se um aumento nos traços MC80PV20-AL em comparação ao MC100PV0, atribuído à adição de alumina. Nos traços com reforço, a elevação do teor de fibras também resultou em maior densidade. No entanto, volumes mais elevados de fibra de aço podem ter favorecido a formação de vazios e aglomerados, ocasionando descontinuidades e potenciais defeitos na matriz.
- A análise microestrutural revelou que o traço MC100PV0 apresentou uma estrutura típica de géis N-A-S-H bem desenvolvidos, indicando uma geopolimerização eficiente. No caso do traço MC80PV20-AL, observou-se a formação de fases N-A-S-H, porém com a presença acentuada de material amorfo não reagido. Essa característica é atribuída à menor reatividade do pó de vidro e da alumina em comparação ao metacaulim, devido às suas diferenças de granulometria e área superficial específica. Embora a substituição tenha sido realizada visando o balanceamento estequiométrico do sistema, as adições atuaram majoritariamente como cargas inertes (filers) nas condições aplicadas, o que ocasionou alterações na microestrutura da matriz e potencialmente comprometeu o desempenho do gel geopolimérico formado.
- A incorporação de pó de vidro nas formulações geopoliméricas demonstrou ser uma alternativa promissora tanto do ponto de vista ambiental quanto técnico. Embora as características físicas do pó de vidro, como menor área superficial específica em comparação ao metacaulim e granulometria maior, possam ter limitado sua participação ativa na geopolimerização nas condições aplicadas, o pó de vidro e alumina contribuíram para o aumento da fração amorfa da matriz, conforme evidenciado pelas análises de DRX, atuando majoritariamente como

materiais de preenchimento na composição final. Além disso, seu uso representa uma estratégia eficaz para a valorização de resíduos industriais, alinhando o desenvolvimento de materiais alternativos aos princípios da economia circular.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo alcançou seu objetivo de investigar alternativas para a reutilização do pó de vidro e a substituição do cimento Portland, evidenciando caminhos para a otimização de geopolímeros reforçados com fibras de aço. No entanto, a variabilidade dos materiais e dos parâmetros de processamento requer investigações adicionais para aprimorar o desempenho do compósito. Com base nisso, sugerem-se os seguintes direcionamentos para pesquisas futuras:

- (i) **Caracterização detalhada da porosidade** - Realizar ensaios de intrusão de mercúrio ou tomografia da microestrutura para uma análise detalhada da distribuição e do tamanho dos poros, correlacionando-os com a resistência mecânica e a durabilidade do material.
- (ii) **Avaliação da durabilidade** - Investigar o desempenho a longo prazo do compósito geopolimérico reforçado com fibras de aço, incluindo resistência à penetração de cloretos, formação de eflorescências e outros mecanismos de degradação. Ensaio de envelhecimento acelerado e exposição a condições ambientais severas podem fornecer dados essenciais para prever sua vida útil em aplicações estruturais.
- (iii) **Otimização da alcalinidade da solução ativadora** - Investigar o efeito de diferentes concentrações e composições da solução alcalina na reação de geopolimerização, visando aprimorar as propriedades mecânicas e a estabilidade da matriz geopolimérica.
- (iv) **Ajuste da composição da matriz** - Avaliar a influência da variação nos teores de pó de vidro, assim como sua granulometria, de metacaulim e da adição de outros tipos de alumina na microestrutura e no desempenho do compósito, buscando um equilíbrio entre resistência, trabalhabilidade e durabilidade.
- (v) **Uso de ativadores alternativos** - Investigar ativadores derivados de resíduos industriais como alternativa ao Hidróxido de Sódio e Silicato de sódio, reduzindo custos e impactos ambientais sem comprometer a eficiência da geopolimerização.
- (vi) **Análise da influência da cura térmica** - Após a moldagem dos geopolímeros, investigar o impacto da cura térmica nas propriedades mecânicas e de durabilidade, avaliando diferentes temperaturas e tempos de exposição para otimização do processo de cura.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHNEJAD, Z. *et al.* Effects of Using Different Co-binders and Fibers on Mechanical and Durability Performances of Alkali-Activated Soapstone Binders (AAS). **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-23, 2021.

ALSAIF, A. S.; ALBIDAH, A. S. Compressive and flexural characteristics of geopolymer rubberized concrete reinforced with recycled tires steel fibers. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1230-1236, 2022.

ABRABE, A. B. B. **Glass is Good**. Disponível em: <http://www.abrabe.org.br/glass-isgood/>. Acesso em: 5 jan. 2024.

ABRAVIDRO. **Panorama Abravidros - O mercado vidreiro em números 2021**. Disponível em: <https://abravidro.org.br/mercado/panorama-abravidro/>. Acesso em: 12 fev. 2024.

AISHEH, Y. I. A. *et al.* Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01234, 2022.

AHMADI, H. *et al.* Metakaolin-red mud/carbon nanotubes geopolymer nanocomposite: Mechanical properties and structural studies. **Materials Research Express**, v. 9, n. 2, p. 025011, 2022.

ALBIDAH, A. S. Shear behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete deep beams. **Engineering Structures**, v. 275, p. 115271, 2023.

ALBIDAH, A. *et al.* **Bond performance of GFRP and steel rebars embedded in metakaolin based geopolymer concrete**. In: Structures. Elsevier, 2020. p. 1582-1593.

ALBIDAH, A. S.; ALSAIF, A. S. Mechanical performance of alkali-activated concrete reinforced with recycled tire steel fibers. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1271-1279, 2022.

ALI, A. A.; AL-ATTAR, T. S.; ABBAS, W. A. A statistical model to predict the strength development of geopolymer concrete based on $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio variation. **Civil Engineering Journal**, v. 8, n. 3, p. 454-471, 2022.

ALJUMAILI, M. W. *et al.* Investigating the Influence of Recycled Coarse Aggregate and Steel Fiber on the Rheological and Mechanical Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete. In: **Annales de Chimie. Science des Matériaux**. International Information and Engineering Technology Association (IIETA), 2024. p. 197.

ALJUMAILI, M. W. *et al.* Mechanical Characteristics and Durability of Metakaolin-Based Self-Compacting Geopolymer Concrete as A Function of Recycled Aggregate and Steel Fiber Contents. **Journal of Composite & Advanced Materials/Revue des Composites et des Matériaux Avancés**, v. 34, n. 4, 2024.

ALMUTAIRI, A. L. *et al.* Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00733, 2021.

ALOBEIDY, N. F.; KHALIL, W. I. Mechanical Properties of Modified Metakaolin-Based Geopolymer Concrete Containing Tires Rubber Waste and Reinforced with Recycled Steel Fibers. **Tikrit Journal of Engineering Sciences**, v. 31, n. 2, p. 43-59, 2024.

ALSAIF, A. S.; ALBIDAH, A. S. Compressive and flexural characteristics of geopolymer rubberized concrete reinforced with recycled tires steel fibers. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1230-1236, 2022.

ALVARENGA, C. B. C. S. *et al.* Utilização de resíduo de vidro na produção de geopolímero de base metacaulim submetido a cura ambiente e em estufa. **Ambiente Construído**, v. 22, p. 147-160, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens**. ASTM C215. West Conshohocken, PA, USA, 2019.

_____. **Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. ASTM E1876. West Conshohocken, PA, USA, 2022.

AMRAN, M. *et al.* Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103638, 2022.

ARCE, G. *et al.* Engineered geopolymer composites (EGCs) for sustainable transportation infrastructure. 2020.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: cimento portland - determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 8953: concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13278: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13280: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 16916: agregado miúdo - determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16939: concreto reforçado com fibras - determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento - método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16972: agregados - determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16973: agregados - determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 17053: agregado miúdo - determinação de impurezas orgânicas.** Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 17054: agregados - determinação da composição granulométrica - método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7222: concreto e argamassa - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522: concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, 2017.

AUERKARI, P. *et al.* **Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics.** Espoo, Finland: Technical Research Centre of Finland, 1996.

BASHAR, I. I. *et al.* Engineering properties and fracture behaviour of high volume palm oil fuel ash based fibre reinforced geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 286-297, 2016.

BERNAL, S. A. *et al.* Other potential applications for alkali-activated materials. In: **Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM.** Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. p. 339-379.

BERNAL, S. *et al.* Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 208-214, 2010.

BHUTTA, A. *et al.* Influence of fiber inclination angle on bond-slip behavior of different alkali-activated composites under dynamic and quasi-static loadings. **Cement and Concrete Research**, v. 107, p. 236-246, 2018.

BLASZCZYŃSKI, T.; KRÓL, M. Alkali activation of fly ash: Effect of the activator concentration. **Journal of Materials Science**, v. 52, p. 5380-5395, 2017.

BORGES, P. H. R. *et al.* Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14, p. 153-168, 2014.

Brasil. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019.

BUTH, I. S. **Avaliação da influência da adição de alumina e do teor de hidróxido de sódio nas propriedades de geopolímeros**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

CAO, R. *et al.* Study on the activity of metakaolin produced by traditional rotary Kiln in China. **Minerals**, v. 12, n. 3, p. 365, 2022.

CASTILLO, H. *et al.* State of the art of geopolymers: A review. **e-Polymers**, v. 22, n. 1, p. 108-124, 2022.

CHEN, X. *et al.* Effect of organic polymers on the properties of slag-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 216-224, 2018.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **Trabalho apresentado**, v. 8, p. 1-12, 2011.

CONG, P.; CHENG, Y.. Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 8, n. 3, p. 283-314, 2021.

COSTA, D. L. *et al.* Evaluation of the Addition of α -Al₂O₃ on the Mechanical and Thermal Properties in Binding Geopolymer. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2015. p. 497-502.

COSTA, L. M. *et al.* Influence of the addition of amorphous and crystalline silica on the structural properties of metakaolin-based geopolymers. **Applied Clay Science**, v. 215, p. 106312, 2021.

CROMOLINE QUÍMICA FINA. **Especificações: hidróxido de sódio (micropérolas)**. Diadema, 2019.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. The cement sustainability initiative: 10 years of progress-moving on to the next decade. **CSI**. 2012.

DADSETAN, S. *et al.* Extensive evaluation on the effect of glass powder on the rheology, strength, and microstructure of metakaolin-based geopolymer binders. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121168, 2021.

DAVIDOVITS, J. years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. In: **Geopolymer 2002 conference**. Saint-Quentin, France; Melbourne, Australia: Geopolymer Institute. p. 29, 2002.

DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. In: **First international conference on alkaline cements and concretes**. p. 131-149, 1994.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis and calorimetry**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and applications**. Geopolymer Institute, 2008.

DE SILVA, P.; SAGOE-CRENSIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 . **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 4, p. 512-518, 2007.

DHASMANA, A.; SINGH, S. P. Long-term mechanical characteristics of fibre reinforced metakaolin-based geopolymer concrete: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 93, p. 106-119, 2023.

DIAS, G. S. **Compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho reforçados com fibras metálicas e incorporação de pó de vidro**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/17099>.

DUXSON, P. *et al.* Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of materials science**, v. 42, p. 2917-2933, 2007.

EL ABD, A. *et al.* Characteristics and neutron imaging of capillary water absorption for metakaolin and steel fiber reinforced slag based-geopolymer mortars. **Journal of Building Engineering**, v. 82, p. 107960, 2024.

FARHAN, K. Z.; JOHARI, M. A. M.; DEMIRBOĞA, R. Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102628, 2021.

FARHAN, N. A.; SHEIKH, M. N.; HADI, M. NS. Effect of steel fiber on engineering properties of geopolymer concrete. **ACI Materials Journal**, v. 117, n. 3, p. 29-40, 2020.

FREITAS, T. O. G. **Efeito do pó de vidro na mitigação da reação álcali-silica de compósitos cimentícios de alto desempenho**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12137>.

GLASBY, T. *et al.* EFC geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. **Concrete**, v. 2015, p. 1-9, 2015.

- GOAIZ, H. A. *et al.* Evaluation of steel fiber reinforced geopolymer concrete made of recycled materials. **International Journal of Engineering**, v. 35, n. 10, p. 2018-2026, 2022.
- HAN, W. *et al.* Effects of Al/Na and Si/Na molar ratios on the alkalinity of metakaolin-based geopolymer pore solutions. **Materials**, v. 16, n. 5, p. 1929, 2023.
- HAN, X. *et al.* Utilization of municipal solid waste incineration fly ash with coal fly ash/metakaolin for geopolymer composites preparation. **Construction and Building Materials**, v. 403, p. 133060, 2023.
- HASANUZZAMAN, M.; RAFFERTY, A.; SAJJIA, M.; OLABI, A.-G. **Properties of Glass Materials**. In: **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**. Amsterdam: Elsevier, 2016. DOI: 10.1016/b978-0-12-803581-8.03998-9.
- HASSAN, A.; ARIF, M.; SHARIQ, M. A review of properties and behaviour of reinforced geopolymer concrete structural elements-A clean technology option for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 245, p. 118762, 2020.
- HUANG, Y.; HAN, M. **The influence of α -Al₂O₃ addition on microstructure, mechanical and formaldehyde adsorption properties of fly ash-based geopolymer products**. Journal of Hazardous Materials, 2011.
- IEA. **Cement**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- IEA; UNEP. **Global Status Report 2018: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Paris: IEA, 2018.
- INTERGLAD. **I. G. D.** Disponível em: https://www.newglass.jp/interglad_n/gaiyo/info_e.html. Acesso em: 15 mar. 2024.
- IVANOVIĆ, M. *et al.* The influence of thermodynamic parameters on alkaline activator of geopolymers and structure of geopolymers. **Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, v. 40, n. 1, p. 107-117, 2021.
- JUENGSUWATTANANON, K. *et al.* Correlation between initial SiO₂/Al₂O₃, Na₂O/Al₂O₃, Na₂O/SiO₂ and H₂O/Na₂O ratios on phase and microstructure of reaction products of metakaolin-rice husk ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 406-417, 2019.
- KHATER, H. M. Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, v. 5, p. 1-10, 2013.
- KOUAMO, H. Tchakoute *et al.* The effect of adding alumina-oxide to metakaolin and volcanic ash on geopolymer products: A comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 960-969, 2012.

- KRIVEN, W. M. *et al.* Intrinsic microstructure and properties of metakaolin-based geopolymers. **International Workshop on Geopolymer Binders: Interdependence of Composition, Structure and Properties**, p. 71-86, 2007.
- KUMAR, Y. N.; KUMAR, B. D.; SWAMI, B. L. P. Mechanical properties of geopolymer concrete reinforced with steel and glass fibers with various mineral admixtures. **Materials Today: Proceedings**, v. 52, p. 632-641, 2022.
- LAHOTI, M. *et al.* Mix design factors and strength prediction of metakaolin-based geopolymer. **Ceramics international**, v. 43, n. 14, p. 11433-11441, 2017.
- LEE, B. Y. *et al.* Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar—a feasibility study. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 15-20, 2012.
- LI, Q. *et al.* Effect of curing temperature on high-strength metakaolin-based geopolymer composite (HMGC) with quartz powder and steel fibers. **Materials**, v. 15, n. 11, p. 3958, 2022.
- LIANG, G. *et al.* Reuse of waste glass powder in alkali-activated metakaolin/fly ash pastes: Physical properties, reaction kinetics and microstructure. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 173, p. 105721, 2021.
- LUHAR, I.; LUHAR, S. Rubberized geopolymer composites: Value-added applications. **Journal of Composites Science**, v. 5, n. 12, p. 312, 2021.
- MADAI, F.; KRISTALY, F.; MUCSI, G. Microstructure, mineralogy and physical properties of ground fly ash based geopolymers. **Ceramics–Silikáty**, v. 59, n. 1, p. 70-79, 2015.
- MAURY, M. B.; BLUMENSCHHEIN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. 2012.
- MEHTA, A.; ASHISH, D. K. Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 29, p. 100888, 2020.
- MENGER, M. H. *et al.* Utilizing porcelain tile polishing residue in eco-efficient high-strength geopolymers with steel microfibers. In: **Structures**. Elsevier, 2023. p. 105630.
- MONTE, R. **Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos**. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18022016-124850/>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- NAZARI, A.; MAGHSOUDPOUR, A.; SANJAYAN, J. G. Flexural strength of plain and fibre-reinforced boroaluminosilicate geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 207-213, 2015.
- NAZIR, K. *et al.* Engineering properties of different fiber-reinforced metakaolin-red mud based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**, v. 385, p. 131496, 2023.

- NAZIR, K.; CANPOLAT, O.; UYSAL, M. Durability properties of steel, polyamide, and polyethylene fiber-reinforced geopolymer mortar made with recycled concrete aggregate and glass powder as fillers. **Journal of Building Engineering**, v. 76, p. 107313, 2023.
- OMRAN, A.; TAGNIT-HAMOU, A. Performance of glass-powder concrete in field applications. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 84-95, 2016.
- ONUAGULUCHI, O. *et al.* Performance of scrap tire steel fibers in OPC and alkali-activated mortars. **Materials and Structures**, v. 50, p. 1-10, 2017.
- PARK, S. *et al.* Effect of silica fume on the volume expansion of metakaolin-based geopolymer considering the silicon-to-aluminum molar ratio. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 16, n. 1, p. 20, 2022.
- PETERMANN, J. C.; SAEED, A.; HAMMONS, M. I. Alkali-activated geopolymers: a literature review. **Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate Airbase Technologies Division**, 2010.
- PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, v. 47, p. 11-25, 2014.
- PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and related alkali-activated materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, p. 299-327, 2014.
- PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymerization kinetics: insights from mathematical modeling. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 10, p. 777-784, 2009.
- QU, Y. *et al.* Study on the Reinforced Properties of Geopolymer Fibers with a Sustainable Development Role. **Sustainability (2071-1050)**, v. 16, n. 14, 2024.
- RAKHIMOVA, N. R.; RAKHIMOV, R. Z. Literature review of advances in materials used in development of alkali-activated mortars, concretes, and composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 11, p. 03119002, 2019.
- RANJBAR, N.; ZHANG, M. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, p. 103498, 2020.
- RANGAN, B. V. Geopolymer concrete for environmental protection. **The Indian concrete journal**, v. 88, n. 4, p. 41-59, 2014.
- RASHAD, A. M. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition—A comprehensive overview. **Construction and building materials**, v. 41, p. 303-318, 2013.
- RIAHI, S. *et al.* Investigation of interfacial and mechanical properties of alumina-coated steel fiber reinforced geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123118, 2021.

- RICCIOTTI, L. *et al.* Geopolymer composites for potential applications in cultural heritage. **Environments**, v. 4, n. 4, p. 91, 2017.
- ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050 / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.
- ROCHA, T. S. *et al.* Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na⁺ and K⁺). **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 453-461, 2018.
- SAEED, A. *et al.* Properties and applications of geopolymer composites: A review study of mechanical and microstructural properties. **Materials**, v. 15, n. 22, p. 8250, 2022.
- SAFARZADEH, Z.; BILONDI, Meysam Pourabbas; ZARESEFAT, Mojtaba. Laboratory investigation of the effect of using metakaolin and clay on the behaviour of recycled glass powder-based geopolymer mortars. **Results in Engineering**, v. 21, p. 101974, 2024.
- SAKULICH, A. R. Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and durability. **Sustainable Cities and Society**, v. 1, n. 4, p. 195-210, 2011.
- SAMAL, S.; BLANCO, I. An application review of fiber-reinforced geopolymer composite. **Fibers**, v. 9, n. 4, p. 23, 2021.
- SATHISH KUMAR, V.; GANESAN, N.; INDIRA, P. V. Engineering properties of hybrid fibre reinforced ternary blend geopolymer concrete. **Journal of Composites Science**, v. 5, n. 8, p. 203, 2021.
- SHAH, S. F. A. *et al.* Comparative study on the effect of fiber type and content on the performance of one-part alkali-activated mortar. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118221, 2020.
- SHELBY, J. E. **Introduction to glass science and technology**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2005.
- SHILAR, F. A. *et al.* Optimization of alkaline activator on the strength properties of geopolymer concrete. **Polymers**, v. 14, n. 12, p. 2434, 2022.
- SHILAR, F. A. *et al.* Molarity activity effect on mechanical and microstructure properties of geopolymer concrete: A review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e01014, 2022.
- SINGH, B. *et al.* Geopolymer concrete: A review of some recent developments. **Construction and building materials**, v. 85, p. 78-90, 2015.
- SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117455, 2020.

SI, R. *et al.* Atomic-structure, microstructure and mechanical properties of glass powder modified metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119303, 2020.

SLANÝ, M. *et al.* Metabentonite and metakaolin-based geopolymers/zeolites: Relation between kind of clay, calcination temperature and concentration of alkaline activator. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 148, n. 20, p. 10531-10547, 2023.

SOARES, S. M. **Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/14126>.

SRIVIDYA, T. *et al.* A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00812, 2022.

THOMAS, B. S. *et al.* Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. **Cleaner Materials**, v. 3, p. 100056, 2022.

UNA-PROSIL. **Certificado de análise: silicato de sódio em pó 2.0**. Cajamar, 2022.

United Nations. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)**. New York: United Nations, 2019.

VAN DEVENTER, J. S. J. *et al.* Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and biomass valorization**, v. 1, p. 145-155, 2010.

VOGT, O. *et al.* Reactivity and microstructure of metakaolin based geopolymers: Effect of fly Ash and liquid/solid contents. **Materials**, v. 12, n. 21, p. 3485, 2019.

WANG, S. *et al.* Experimental study on material ratio and strength performance of geopolymer-improved soil. **Construction and Building Materials**, v. 267, p. 120469, 2021.

WONG, L. S. Durability performance of geopolymer concrete: A review. **Polymers**, v. 14, n. 5, p. 868, 2022.

XU, Z. *et al.* Experimental study on mechanical properties and microstructures of steel fiber-reinforced fly ash-metakaolin geopolymer-recycled concrete. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 60, n. 1, p. 578-590, 2021.

YILMAZ, A. *et al.* Exploration of fiber-reinforced geopolymer mortars containing recycled aggregates and marble powder. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 49, n. 4, p. 5179-5202, 2024.

YUSUF, M. O. Bond characterization in cementitious material binders using Fourier-transform infrared spectroscopy. **Applied Sciences**, v. 13, n. 5, p. 3353, 2023.

ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. C. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 471, p. 490-495, 2017.

ZHANG, P. *et al.* Mechanical and fracture properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 28, n. 1, p. 299-313, 2021.

ZIDI, Z. *et al.* Synthesis of nano-alumina and their effect on structure, mechanical and thermal properties of geopolymer. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 7, n. 4, p. 524-535, 2019.

ZIEJEWSKA, C. *et al.* Eco-Friendly coal gangue and/or metakaolin-based lightweight geopolymer with the addition of waste glass. **Materials**, v. 16, n. 17, p. 6054, 2023.