



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS



EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA POR RESÍDUO DE PEBD
EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS PARA A PRODUÇÃO DE
CHAPAS CIMENTÍCIAS

MARIVONE SOUZA DE OLIVEIRA

MANAUS - AM
2025

MARIVONE SOUZA DE OLIVEIRA

EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA POR RESÍDUO DE PEBD
EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS PARA A PRODUÇÃO DE
CHAPAS CIMENTÍCIAS

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFAM).
Linha de Pesquisa: Propriedades Físicas, Mecânicas e Modelagem de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade
Coorientadora: Profa. Dra. Ivana Helena de La-Rocque Soares

MANAUS - AM
2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

O48e Oliveira, Marivone Souza de
Efeito da substituição parcial da areia por resíduo de PEBD em
argamassas geopoliméricas para a produção de chapas cimentícias
/ Marivone Souza de Oliveira. - 2025.
108 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Jean Carlos Silva Andrade.
Coorientador(a): Ivana Helena de La-Rocque Soares.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas,
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais, Manaus, 2025.

1. Metacaulinita. 2. Ativador alcalino. 3. Resíduo plástico. 4.
Argamassa. 5. Chapa cimentícia. I. Andrade, Jean Carlos Silva. II.
Soares, Ivana Helena de La-Rocque. III. Universidade Federal do
Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais. IV. Título

MARIVONE SOUZA DE OLIVEIRA

EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA POR RESÍDUO DE PEBD
EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS PARA A PRODUÇÃO DE
CHAPAS CIMENTÍCIAS

Dissertação apresentada e aprovada
como requisito para obtenção do título de
Mestre em Ciência e Engenharia de
Materiais ao Programa de Pós-Graduação
em Ciência e Engenharia de Materiais
(PPGCEM-UFAM).
Linha de Pesquisa: Propriedades Físicas,
Mecânicas e Modelagem de Materiais.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
JEAN CARLOS SILVA ANDRADE
Data: 04/06/2025 10:39:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade
Presidente da Banca / Universidade Federal do Amazonas (UFAM)



Documento assinado digitalmente
JAQUELÍGIA BRITO DA SILVA
Data: 04/06/2025 13:43:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Jaquelígia Brito da Silva
Membro / Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)



Documento assinado digitalmente
JOAO DE ALMEIDA MELO FILHO
Data: 04/06/2025 14:36:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho
Membro / Universidade Federal do Piauí (UFPI)

MANAUS – AM
2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às estrelas que guiaram meus passos, e ao chão firme que sustentou minha caminhada.

Aos meus pais, seu Raimundo (*in memoriam*) e dona Conceição, que com amor e sabedoria, sempre me incentivaram aos estudos. À minha mãe, pelos sacrifícios silenciosos, pelas falas e escutatórias tão precisas e pelas orações inabaláveis; ao meu pai, cuja memória me inspirou a perseverar, e nos momento de saudade lembrar “*Aqueles que se amam nunca se perdem*”.

Dedico também ao sustentáculo da minha fé espírita, cuja lição do Evangelho Segundo o Espiritismo, trago comigo:

“Do ponto de vista terreno, a máxima: Ajuda-te, que o céu te ajudará, é o princípio da lei do trabalho e, por conseguinte da lei do progresso, que põe em ação as forças da inteligência.

Deus, deu ao homem o desejo incessante do melhor, e é esse desejo que o impele à pesquisa dos meios de melhorar a sua posição, que o leva às descobertas, às invenções, ao aperfeiçoamento da Ciência, pois é esta que proporciona o que lhe falta. Pelas suas pesquisas, sua inteligência se engrandece, sua moral se depura.

Se Deus houvesse isentado o homem do trabalho do corpo, seus membros teriam atrofiado; se o houvesse isentado do trabalho da inteligência, seu espírito teria permanecido no estado de instinto animal. Por isso lhe fez do trabalho uma necessidade e lhe disse: procura e acharás; trabalha e produzirás. Dessa forma serás filho das tuas obras, terás delas o mérito e serás recompensado de acordo com o que tiveres feito”.

A Deus, que me dá sustento e força, toda honra e glória sejam para ti Senhor!

AGRADECIMENTOS

Sou grata ao meu orientador, Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade, por seus conhecimentos, rigor, incentivo e paciência com minhas limitações.

Minha gratidão à minha coorientadora, Prof.^a Dra. Ivana Helena de La-Rocque Soares, pelos conhecimentos, atenção e suporte em cada etapa deste trabalho.

Agradeço aos colegas Wanderson Veras e Rigley Corrêa Jr., companheiros nos estudos e nas risadas, aos amigos que acreditaram na minha capacidade, especialmente à Luciane Ribas, à Farízia e à Flor Bela, que com sensibilidade e compreensão da vida, me ofereceram palavras de encorajamento e suporte emocional.

Sou grata também aos Profs. Drs. Lizandro Manzato, Içamira Costa Nogueira e Jaime Casanova Soeiro Júnior, pelos conhecimento adquiridos nas disciplinas e experiências compartilhadas, pois ensinar é uma arte. Ao Prof. Dr. Marcos Marques da Silva Paula, pelas orientações e suporte administrativo no PPGCEM.

Não poderia deixar de expressar minha gratidão aos coordenadores, gerentes e técnicos do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC/UFAM), Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UFAM), Laboratório de Ensaio Físico-Químicos de Materiais (LEQM/UFAM), Laboratório de Laminação do Instituto de Ciências Exatas da UFAM, Centro Multiusuário para Análise em Fenômenos Biomédicos (CMABio-UEA), Laboratório de Ensaio Mecânicos da Konkrex Engenharia de Concreto Ltda, Polo de Inovação Tecnológica do Instituto Federal do Amazonas (IFAM), Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias (SISNANO), Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN/IFAM), Laboratório de Materiais Metálicos da Universidade Federal da Paraíba (LAMAM/UFPB), Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica e Caracterização de Materiais (LIME/ UFRN, pela atenção dispensada e infraestrutura disponibilizada para as análises e ensaios necessários à minha pesquisa.

Finalmente, agradeço à PROPESP/UFAM e ao PPGCEM/UFAM por me oportunizarem os estudos na pós-graduação e a obtenção do título de mestre, e às agências de fomento CAPES e FAPEAM pelo apoio financeiro concedido ao PPGCEM/UFAM.

RESUMO

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), têm entre suas metas a preservação dos recursos naturais e a qualidade do ar. Tendo em vista que na construção civil o consumo da areia é uma agressão ao meio ambiente por se tratar de um bem mineral não renovável, assim como o descarte do resíduo plástico, essa pesquisa propõe a investigação do efeito da substituição parcial da areia por resíduo de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) em argamassas geopoliméricas para a produção de chapas cimentícias, cujos objetivos são: analisar a microestrutura das argamassas geopoliméricas com substituição parcial da areia por resíduo de PEBD; estudar as propriedades físicas e mecânicas das argamassas e chapas cimentícias produzidas; analisar os resultados da resistência mecânica das argamassas em função da Análise de Variância (ANOVA) e classificar as chapas cimentícias para uso em vedação conforme os parâmetros da NBR 15498:2021. O resíduo de PEBD substituiu a areia em teores de 0, 25, 50, 75 e 100%. As chapas cimentícias foram produzidas em geopolímeros de metacaulinita à 650 °C, com ativadores alcalinos de (NaOH) e (Na₂SiO₃). Os materiais foram caracterizados por Fluorescência de Raios X (FRX), Análise Termogravimétrica (TGA/DSC), Difratomia de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e análise granulométrica à laser. As argamassas foram caracterizadas por FRX, TGA, DRX, FTIR, MEV-FEG/EDS e ensaio de resistência à compressão. As chapas foram caracterizadas pelos ensaios de resistência à tração na flexão, densidade aparente, absorção de água e porosidade. Foram realizadas análises estatísticas por ANOVA e Teste de Tukey na resistência à compressão e na resistência à tração na flexão. O FRX evidenciou o teor de 95,68% de aluminossilicatos na metacaulinita. As análises de TGA/DSC e FTIR confirmaram a transformação do caulim em metacaulinita. Nas argamassas, as análises de DRX revelaram que incorporação progressiva do resíduo reduz a cristalinidade. A análise por MEV-FEG/EDS revelou que matrizes reativas produziram argamassas mais densas e as menos reativas apresentaram maior porosidade. Os resultados na substituição de 25% de areia tiveram uma boa performance mecânica com 44,68 MPa de resistência à compressão, ficando abaixo somente do teor 0% com 72,91 MPa. A resistência à flexão variou de 11,71 a 5,95 MPa, atendendo aos requisitos de aceitação da NBR 15498:2021. Além disso a substituição da areia por PEBD produziu chapas mais leves com densidade aparente de 2,51 g/cm³ para 25% e 1,93 g/cm³ para 100% de resíduo plástico.

Palavras-chave: Metacaulinita; Ativador alcalino; Resíduo plástico; Argamassa; Chapa cimentícia.

ABSTRACTS

The Sustainable Development Goals (SDGs) include targets related to the preservation of natural resources and air quality. Given that sand consumption in the construction industry contributes to environmental degradation as it is a non-renewable mineral resource, along with the improper disposal of plastic waste, this study investigates the effects of partially replacing sand with Low-Density Polyethylene (LDPE) waste in geopolymer mortars for the production of cementitious plates. The objectives are to: analyze the microstructure of geopolymer mortars with partial sand replacement by LDPE waste; study the physical and mechanical properties of the produced mortars and cementitious plates; analyze the results of the mechanical resistance of mortars as a function of Analysis of Variance (ANOVA); and classify the cementitious plates for sealing applications according to the parameters outlined in NBR 15498:2021. LDPE waste replaced sand at levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. The cementitious plates were produced using metakaolin-based geopolymers synthesized at 650°C, activated with sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3). The materials were characterized using X-Ray Fluorescence (XRF), Thermogravimetric Analysis (TGA/DSC), X-Ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), and laser particle size analysis. The mortars were further analyzed by XRF, TGA, XRD, FTIR, SEM-FEG/EDS, and compressive strength testing. The plates were characterized through flexural tensile strength, bulk density, water absorption, and porosity tests. Statistical analyses were conducted using ANOVA and Tukey's test on compressive strength and flexural tensile strength evaluations. XRF results indicated an aluminosilicate content of 95.68% in the metakaolin. TGA/DSC and FTIR analyses confirmed the successful transformation of kaolin into metakaolin. In the mortars, XRD analyses revealed that the progressive incorporation of LDPE waste reduced crystallinity. SEM analysis showed that highly reactive matrices produced denser mortars, while less reactive matrices exhibited higher porosity. The 25% sand replacement demonstrated good mechanical performance, achieving a compressive strength of 44.68 MPa, second only to the 0% replacement, which reached 72.91 MPa. The flexural tensile strength ranged from 11.71 MPa to 5.95 MPa, meeting the acceptance criteria established by NBR 15498:2021. Furthermore, replacing sand with LDPE produced lighter plates with an apparent density of 2.51 g/cm³ for 25% and 1.93 g/cm³ for 100% plastic waste.

Keywords: Metakaolin; Alkaline activator; Plastic waste; Mortar; Cementitious plates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caulim (a) em estado rochoso (b) em estado granular	20
Figura 2 - (a) estrutura cristalográfica do caulim; (b) morfologia do caulim	20
Figura 3 - (a) Estrutura ordenada do caulim; (b) estrutura desordenada da metacaulinita	22
Figura 4 – Produtos fabricados com PEBD: (a) sacolas plásticas; (b) mangueira de jardim; (c) frascos de produtos. Potencial destinação dos plásticos no pós-consumo: (d) lixo no oceano (e) descarte irregular ..	33
Figura 5 – Materiais de construção produzidos com resíduo de PEBD (a) blocos intertravados; (b) alvenaria de tijolos; (c) pastilhas cerâmicas	36
Figura 6 - Esquema geral da produção dos geopolímeros	38
Figura 7 - Esquema geral de produção de matrizes geopoliméricas	39
Figura 8 – Sistema de construção LSF com chapas cimentícias: (a) estrutura LSF em aço galvanizado; (b) fixação da chapa na estrutura LSF envelopada por membrana impermeabilizadora; (c) detalhe da fixação das chapas em paredes em T; (d) edifício em LSF vedado com chapas cimentícias.	42
Figura 9 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa	45
Figura 10 – Materiais: (a) caulim; (b) <i>filler</i> de areia; (c) resíduo de PEBD; (d) hidróxido de sódio (NaOH); (e) silicato de sódio (Na ₂ SiO ₃)	46
Figura 11 – Preparo manual da argamassa: (a) adição do ativador à mistura seca; (b) aspecto inicial da mistura; (c) aspecto final da mistura	50
Figura 12 - (a) argamassa no misturador mecânico; (b) argamassa fresca após a mistura	51
Figura 13 – (a) corpos de prova moldados; (b) corpos de prova desmoldados ...	52
Figura 14 – (a) moldagem da chapa; (b) chapa moldada fresca (verso); (c) chapa desmoldada após 24 h (frente)	52
Figura 15 – (a) corpo de prova na máquina para rompimento; (b) corpos de prova rompidos	53
Figura 16 – (a) marcação da chapa para o ensaio de tração na flexão; (b) vista lateral dos corpos de prova para o ensaio	55
Figura 17 - (a) corpo de prova submetido ao ensaio de tração na flexão; (b) corpos de prova rompidos	55
Figura 18 - Curvas TGA e DSC do caulim	60
Figura 19 - Curvas TGA e DSC da metacaulinita	61

Figura 20 – Difrátogramas das análises por DRX dos materiais: caulim, metacaulinita, <i>filler</i> de areia e PEBD	62
Figura 21 – Espectros de FTIR do caulim, metacaulinita, <i>filler</i> de areia e PEBD .	63
Figura 22 - Curvas de distribuição granulométrica dos materiais	66
Figura 23 – Análise por MEV dos materiais: (a) caulim; (b) metacaulinita; (c) <i>filler</i> de areia; (d) resíduo plástico (PEBD)	68
Figura 24 – Resistência à compressão das argamassas GMK-W ₀ , GMK-W ₂₅ , GMK-W ₅₀ , GMK-W ₇₅ e GMK-W ₁₀₀ aos 7 e 28 dias de cura	69
Figura 25 – Análises por TGA das argamassas GMK-W ₀ , GMK-W ₂₅ , GMK-W ₅₀ , GMK-W ₇₅ e GMK-W ₁₀₀	75
Figura 26 – Difrátogramas das argamassas GMK-W ₀ , GMK-W ₂₅ , GMK-W ₅₀ , GMK-W ₇₅ e GMK-W ₁₀₀	76
Figura 27 – Espectros de FTIR das argamassas GMK-W ₀ , GMK-W ₂₅ , GMK-W ₅₀ , GMK-W ₇₅ e GMK-W ₁₀₀	78
Figura 28 – Análise por MEV-FEG/EDS das argamassas: (a1) (a2) GMK-W ₀ ; (b1) (b2)GMK-W ₂₅ ; (c1) (c2) GMK-W ₅₀ ; (d1) (d2)GMK-W ₇₅ ; (e1) (e2) GMK-W ₁₀₀	81
Figura 29 - Resistência à tração na flexão das chapas cimentícias GMK-W ₀ , GMK-W ₂₅ , GMK-W ₅₀ , GMK-W ₇₅ e GMK-W ₁₀₀ aos 7 e 28 dias de cura	84
Figura 30 – Densidades aparentes das chapas GMK-W ₀ , GMK-W ₂₅ , GMK-W ₅₀ , GMK-W ₇₅ e GMK-W ₁₀₀	86
Figura 31 – Absorção de água e porosidade das chapas cimentícias GMK-W ₀ , GMK-W ₂₅ , GMK-W ₅₀ , GMK-W ₇₅ e GMK-W ₁₀₀	87
Figura 32 – Comparação de médias pelo Teste de Tukey: resistência à compressão de argamassas curadas aos 28 dias	90
Figura 33 – Comparação de médias pelo Teste de Tukey: resistência à tração na flexão das chapas cimentícias curadas aos 28 dias	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos mínimos de resistência à tração na flexão para chapas cimentícias	44
Tabela 2 – Dosagens dos materiais para a produção das argamassas geopoliméricas	50
Tabela 3 – Composição química dos materiais: caulim, metacaulinita e <i>filler</i> de areia	58
Tabela 4 – Identificação das bandas e grupos funcionais dos espectros de FTIR do caulim, do <i>filler</i> de areia e do resíduo de PEBD	64
Tabela 5 – Composição química das argamassas GMK-W ₀ , GMK-W ₂₅ , GMK-W ₅₀ , GMK-W ₇₅ e GMK-W ₁₀₀	71
Tabela 6 – Composição dos aluminossilicatos das argamassas	71
Tabela 7 – Identificação das bandas e grupos funcionais dos espectros de FTIR das argamassas GMK-W ₀ , GMK-W ₂₅ , GMK-W ₅₀ , GMK-W ₇₅ e GMK-W ₁₀₀	78
Tabela 8 – Níveis, valores do fator e variáveis para ANOVA da resistência à compressão	88
Tabela 9 – ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias	89
Tabela 10 – Teste de Tukey da resistência à compressão das argamassas aos 28 dias	89
Tabela 11 – Níveis, valores do fator e variáveis para ANOVA da resistência à tração na flexão	91
Tabela 12 – ANOVA para resistência à tração na flexão aos 28 dias	92
Tabela 13 – Teste de Tukey da resistência à tração na flexão das chapas aos 28 dias	92

LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS

Å - Ångström

2θ - Faixa angular

Al – Alumínio

Al_2O_3 - Óxido de Alumínio

$Al_2O_3 \cdot 2(SiO_2) \cdot 2(H_2O)$ - Fórmula química do caulim

$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ – Fórmula química do caulim

$Al_2Si_2O_7$ – Metacaulinita

ANOVA - Análise de Variância

atm – Atmosfera

Ca – Cálcio

CaO - Óxido de Cálcio

CO₂ – Dióxido de Carbono

Cu-K α - Radiação de Raios X emitida por átomos de Cobre

DRX - Difractometria de Raios X

DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial

E_d - Módulo de elasticidade

EDS - Energy Dispersive Spectroscopy (Espectroscopia por Energia Dispersiva)

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPS - Poliestireno Expandido

et al. - Abreviação do Latim "*et alia*" (e outros)

Fe₂O₃ - Óxido de Ferro III, ou, Hematita

FEG – *Field-Emission Gun* (Feixe eletrônico por emissão de campo)

FRX - Espectrometria por Fluorescência de Raios X

FT - Faculdade de Tecnologia

FTIR - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

GEE – Gases de Efeito Estufa

GMK-W₀; GMK-W₂₅; GMK-W₅₀; GMK-W₇₅; GMK-W₁₀₀ - Argamassa geopolimérica ou chapa cimentícia de metacaulinita, com 0, 25, 50, 75 e 100% de resíduo plástico, respectivamente

GPa - Giga Pascal

Gt – Gigatonelada(s)

He – Gás Hélio

ICSD - *Inorganic Crystal Structure Database* (Banco de dados de estrutura de cristais inorgânicos)

ISO - *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

K – Potássio

K₂O - Óxido de Potássio

K₂SiO₃ - Silicato de potássio

kgf - Quilograma força

KOH - Hidróxido de potássio

kV – Quilovolt

LSF - *Light Steel Frame* (Estrutura de aço leve)

LTMN - Laboratório Temático de Microscopia e Nanotecnologia

Ma – Massa da areia

mA – miliampere

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

M – Molaridade

MPa - Mega Pascal

M_{PEPD} – Massa do resíduo de PEBD

MS – Módulo de Sílica

N – Gás Nitrogênio

Na – Sódio

Na₂O – Óxido de Sódio

Na₂SiO₃ - Silicato de Sódio

NaCl - Cloreto de Sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

nm – Nanômetro

NASH – Hidrato de aluminossilicato de sódio

OH – Hidroxila

P₂O₅ - Pentóxido de Fósforo

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PET - Polietileno Tereftalato

pH - potencial Hidrogeniônico que mede a acidez, neutralidade ou alcalinidade de soluções

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PVC – Policloreto de Vinila

® - Marca registrada no Brasil

Si – Silício ou Sílica

SiO₂ - Dióxido de Silício

TGA – Análise Termogravimétrica

TiO₂ - Dióxido de Titânio

TR - *Technical Report* (Relatório Técnico)

™ - *Trade Mark* (Símbolo de Marca Registrada internacional)

W₀; W₂₅; W₅₀, W₇₅; W₁₀₀ - Termo secundário para argamassa geopolimérica ou chapa cimentícia, com 0, 25, 50, 75 e 100% de resíduo plástico, respectivamente.

W/g – Dimensão de fluxo de calor

XX - Vinte em algarismos romanos

λ - Comprimento de onda

μL – Microlitro

μm – Micrômetro

ρ_a - Densidade da água

ρ_{ar} - Densidade da areia

ρ_{PEBD} – Densidade do resíduo plástico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo geral	19
1.2 Objetivos específicos	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Matérias-primas para geopolímeros	20
2.1.1 Caulim	20
2.1.2 Metacaulinita	22
2.1.3 Ativadores alcalinos	24
2.1.4 Areia	27
2.2 Resíduos na construção civil	30
2.2.1 O consumo de recursos naturais e a geração de resíduos	30
2.2.2 Resíduo plástico	32
2.2.2.1 O custo ambiental dos plásticos	32
2.2.2.2 Resíduo plástico como material de construção	34
2.3 Geopolímeros	37
2.4 Chapas cimentícias	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Materiais	46
3.2 Métodos	47
3.2.1 Beneficiamento e calcinação do caulim	47
3.2.2 Caracterização dos materiais	47
3.2.3 Dosagem das argamassas geopoliméricas	49
3.2.4 Produção das argamassas geopoliméricas	50
3.2.5 Moldagem dos corpos de prova para a caracterização das argamassas e chapas cimentícias	51
3.2.6 Caracterização das argamassas	52
3.2.7 Caracterização das chapas cimentícias	54
3.2.8 Análises estatísticas da resistência mecânica das argamassas e chapas cimentícias	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1 Caracterização dos materiais	58
4.1.1 Composição química por FRX	58
4.1.2 Análise térmica por TGA/DSC	59

4.1.3	Análise mineralógica por DRX	62
4.1.4	Análise de espectroscopia por FTIR	63
4.1.5	Análise granulométrica por difração à laser	66
4.1.6	Análise morfológica por MEV	67
4.2	Caracterização das argamassas	69
4.2.1	Resistência à compressão	69
4.2.2	Análise química por FRX	70
4.2.3	Análise térmica por TGA	74
4.2.4	Análise mineralógica por DRX	76
4.2.5	Análise de espectroscopia por FTIR	77
4.2.6	Análise morfológica por MEV-FEG/EDS	80
4.3	Caracterização das chapas cimentícias	84
4.3.1	Resistência à tração na flexão	84
4.3.2	Densidade aparente	85
4.3.3	Absorção de água e porosidade	87
4.4	Análises estatística de variância (ANOVA) com Teste de Tukey, da resistência mecânica das argamassas e chapas cimentícias	88
4.4.1	ANOVA com Teste de Tukey da resistência à compressão das argamassas	88
4.4.2	ANOVA com Teste de Tukey da resistência à tração na flexão das chapas	91
5	CONCLUSÕES	95
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

O crescimento significativo das pesquisas tecnológicas tem exigido da comunidade científica a busca de materiais alternativos que apresentem em sua composição elementos que melhorem a performance dos produtos finais comercializados, que possuam custo de produção vantajoso em relação a outros materiais cuja disponibilidade seja farta e de fácil extração, e ao mesmo tempo substituam com vantagem materiais nocivos ao ambiente.

A produção de cimento *Portland* é fonte significativa de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e apresenta um desafio ambiental para a indústria cimenteira. Cada tonelada de cimento produzida libera até 0,99 tonelada de CO₂ na atmosfera, devido ao clínquer, principal componente e emissor de CO₂ no cimento. Essa quantidade emitida varia com a eficiência do processo produtivo, os combustíveis utilizados e o tipo de cimento Portland produzido (Akintayo; Olanrewaju; Olanrewaju, 2024).

No ano de 2022, a indústria cimenteira global gerou 8% das emissões de CO₂, enquanto a brasileira contribuiu com cerca de 2,5%, e com o alcance de 30% de coprocessamento na matriz energética do cimento *Portland*, o Brasil tem recebido reconhecimento internacional por seus esforços ambientais (Santos *et al.*, 2022; Soares; Sousa, 2023; Zhao, 2024).

Embora os avanços na mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a produção global de cimento *Portland* superou 4 Gt em 2019 com projeção de 5 Gt em 2030 e 6 Gt até 2050, pois a demanda por cimento tende a acompanhar o crescimento populacional no mundo (Agrawal; Savoikar, 2022; Akintayo; Olanrewaju; Olanrewaju, 2024).

Para reduzir os impactos ambientais do CO₂, é indispensável buscar por cimentos alternativos ao *Portland*, e o caulim se destaca na produção de geopolímeros, devido à disponibilidade, custo competitivo, baixo impacto ambiental, microestrutura singular e grau de cristalinidade (Ayeni; Onwualu; Boakye, 2021).

A metacaulinita, obtida da calcinação do caulim, é a matéria-prima mais usada na produção de geopolímeros por ser fonte de aluminossilicatos, elementos essenciais à síntese dos geopolímeros, ela destaca-se por sua alta reatividade no processo de geopolimerização. No entanto, a composição química e as impurezas do caulim original podem influenciar essa reatividade e, conseqüentemente, as

propriedades mecânicas do geopolímero (Andrade, 2019; Aupoil *et al.*, 2019; Moya *et al.*, 2024).

Este trabalho analisará a microestrutura e as propriedades físico-mecânicas das argamassas e chapas cimentícias, e utilizará uma ferramenta estatística para comparar os resultados obtidos com os diferentes teores de resíduo plástico, e finalmente classificará as chapas segundo os critérios da NBR 15498:2021.

O estudo visa uma abordagem ambientalmente consciente. Para isso, utilizou o resíduo plástico, um material abundante na vida moderna e com alto potencial de reaproveitamento e reciclagem. Os plásticos estão presentes em diversos produtos, desde eletroeletrônicos, equipamentos médico-hospitalares até móveis, embalagens, bolsas e tubulações (Bauer *et al.*, 2022).

Os plásticos são materiais poliméricos sintéticos e devido à sua versatilidade, são amplamente usados em diversos setores, incluindo a construção civil. São categorizados em termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos podem ser derretidos e remodelados repetidamente, o que os torna altamente recicláveis, como o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD). Os termofixos formam estruturas rígidas e irreversíveis quando aquecidos, como as resinas epóxi e as resinas fenólicas (Cazan, 2022; Haque *et al.*, 2021).

O Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) é um termoplástico com características únicas e destaca-se no meio industrial por sua resistência ao impacto, alta flexibilidade, facilidade de processamento, excelentes propriedades elétricas, estabilidade e baixa permeabilidade em comparação com outros polímeros (Mariano *et al.*, 2022).

A pesquisa abordará a produção de geopolímeros, utilizando a metacaulinita como material precursor e o resíduo plástico de PEBD como substituto parcial da areia natural. Essa escolha busca minimizar o impacto ambiental causado pela indústria da construção, e demonstra o compromisso com a sustentabilidade ao contribuir para o desenvolvimento de materiais de construção ecológicos.

A substituição da areia natural em argamassas por resíduos plásticos combinados ou não com outros materiais residuais pode melhorar suas propriedades mecânicas. Essa melhoria depende dos teores ideais de substituição do resíduo plástico e dos materiais suplementares, requisitos fundamentais para a eficiência energética em construções (Li, Yingjie *et al.*, 2024).

A integração de resíduos plásticos em matrizes cimentícias reduz a dependência de recursos naturais, promove a reciclagem e reduz o descarte de resíduos. Além disso, métodos de construção energeticamente eficientes são aprimorados, aperfeiçoando as argamassas e melhorando sua sustentabilidade. Dessa forma, a substituição da areia natural por resíduos oferece vantagens econômicas, reduzindo os custos de construção e minimizando os danos ambientais relacionados à extração dos recursos naturais (Hassan; Balkis, 2024; Pikoń *et al.*, 2024).

Para o estudo foram selecionados como ativadores alcalinos o Hidróxido de Sódio (NaOH) e Silicato de Sódio (Na_2SiO_3), com teores e dosagens otimizados com base na literatura de (Soares, 2022).

1.1 Objetivo Geral

Investigar o efeito da substituição parcial da areia natural por resíduo de PEBD no comportamento mecânico de argamassas de geopolímero de metacaulinita.

1.2 Objetivos Específicos

- i. Analisar a microestrutura das argamassas geopoliméricas com substituição parcial da areia por resíduo de PEBD;
- ii. Estudar as propriedades físicas e mecânicas das argamassas e chapas cimentícias produzidas;
- iii. Analisar os resultados da resistência mecânica das argamassas em função da Análise de Variância (ANOVA);
- iv. Classificar as chapas cimentícias para uso em vedação conforme os parâmetros da NBR 15498:2021.

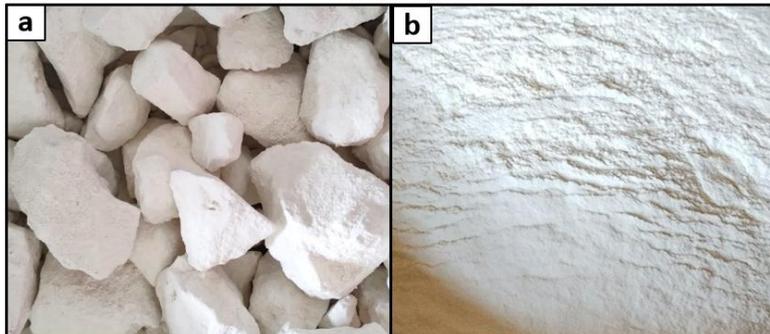
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Matérias-primas para geopolímeros

2.1.1 Caulim

O Caulim mostrado na Figura 1, é uma rocha argilomineral formada essencialmente por aluminossilicato, com predomínio da caulinita $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ e haloisita $[Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O]$, resultante do intemperismo e abundante na natureza, com ampla distribuição geográfica (EMBRAPA, 2020).

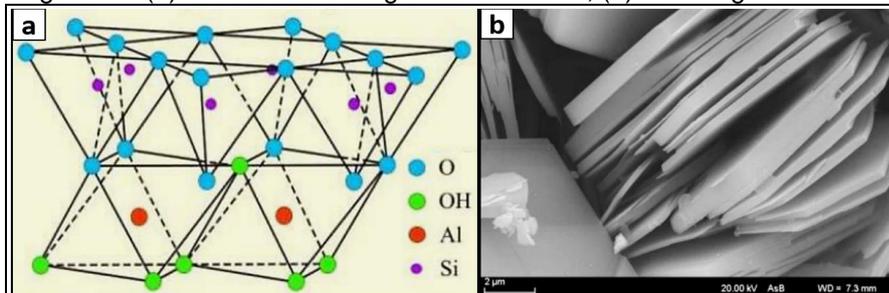
Figura 1 – Caulim (a) em estado rochoso (b) em estado granular



Fonte: Autoria própria (2024)

Esse argilomineral possui uma estrutura dioctaédrica 1:1, com camadas tetraédricas e octaédricas. A Figura 2(a) ilustra a conectividade entre os átomos e íons do caulim, destacando sua estrutura em camadas. A Figura 2(b) mostra a morfologia, evidenciando a estrutura de camadas empilhadas em placas.

Figura 2 – (a) estrutura cristalográfica do caulim; (b) morfologia do caulim



Fonte: Coelho (2020)

onde:

O - Oxigênio

Al - Cátions de folha octaédrica de Alumínio

OH - Hidroxila

Si - Cátions de folha tetraédrica de Silício

A fórmula química do caulim é $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$. Substâncias consideradas impurezas como areia, quartzo, feldspato, óxidos de ferro e outros podem ser encontradas em sua composição desde alguns traços até 50% do material (Coelho, 2020).

Os principais detentores de jazidas de caulim são Estados Unidos, Índia, China, Turquia, Irã, Alemanha, Mianmar, Japão, República Tcheca, Espanha e Brasil, com 80% das reservas globais. O Brasil é o 9º maior produtor mundial, com Índia e China na liderança (Serviço Geológico do Brasil, 2023). No país, as principais reservas estão no Amazonas (46,4%), Piauí (13,1%) e Rio Grande do Norte (12,7%), embora o Amazonas não tenha reportado produção devido as restrições à mineração em áreas de reserva (Serviço Geológico do Brasil, 2023).

Devido a variedade geológica no Brasil, os solos cauliniticos são classificados conforme a origem e localização. Os caulins primários são encontrados em todas as regiões do Brasil, exceto na Região Norte, e são formados a partir de rochas preexistentes, pela erosão de granitos ou alteração de pegmatitos (Luz *et al.*, 2005).

Na Região Norte, os caulins predominantes são os secundários de origem sedimentar, originados em ambientes como lagos, lagoas e deltas. Esses caulins possuem maior taxa de pureza e geralmente contêm menos quartzo e mica, e mais óxido de ferro e titânio. No Estado do Amazonas, o caulim pode ser encontrado na formação Alter do Chão na Rodovia BR-174 entre as cidades de Manaus e Presidente Figueiredo, na AM-010 que liga Manaus a Itacoatiara, como também em outras localidades (Barbosa, 2019; Luz *et al.*, 2005; Neves e Melo Filho, 2018).

O caulim pode apresentar a cor branca ou tons mais escuros dependendo do teor de ferro na composição. Uma característica marcante dos caulins sedimentares é a textura mais fina, com propriedades físico-químicas desejáveis para aplicações industriais, especialmente na indústria de papéis e de revestimentos cerâmicos. Outras características, são: pouco abrasivo, pouco poroso, retentor de umidade, não expansivo, baixa condutividade térmica e elétrica, fácil dispersão em água, quimicamente inerte em uma ampla faixa de pH, e quando processado com água, sua pureza pode atingir 99% (Campos *et al.*, 2018; EMBRAPA, 2020; Luz *et al.*, 2005).

Para Maruoka, *et al.* (2023), as características do caulim influenciam nas características da metacaulinita, e também nas propriedades dos geopolímeros. Para os autores, apesar da relevância da Região Amazônica em recursos naturais, os

conhecimentos e as publicações sobre o caulim da região ainda são limitadas.

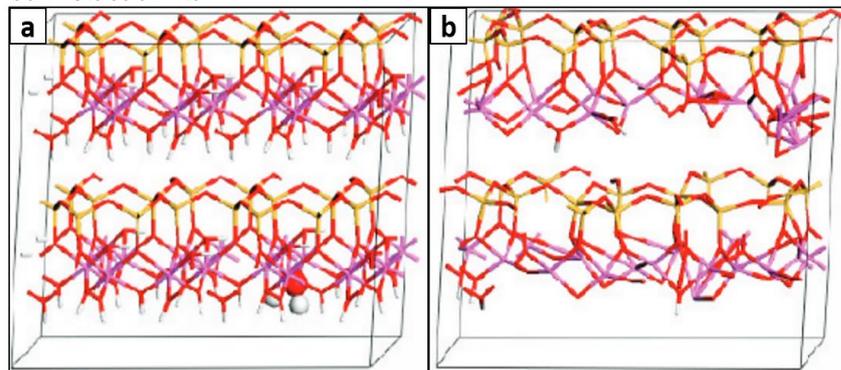
Longhi *et al.* (2022), afirmam que a presença de aluminossilicatos com concentração igual ou superior a 92% no caulim, pode conferir um incremento significativo nas propriedades dos geopolímeros, e caulins com altos níveis de impurezas produzem efeitos adversos na geopolimerização e na ocorrência de eflorescências na matriz, dependendo também dos ativadores e da água nos parâmetros de projeto.

Para Vergara e Colorado (2020), o caulim possui vasto campo de aplicações na construção civil, e quando usado como aditivo em argamassas e concretos com cimento *Portland*, previne a segregação dos componentes, melhora a plasticidade e a textura da matriz.

2.1.2 Metacaulinita

A metacaulinita é um material amorfo (de estrutura cristalina desordenada), diferentemente do caulim que tem estrutura ordenada, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – (a) Estrutura ordenada do caulim; (b) estrutura desordenada da metacaulinita



Fonte: White *et al.* (2010)

O processo que transforma o caulim $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ em metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$) é a calcinação, processo endotérmico realizado em temperaturas controladas entre 500°C e 900°C. Seus objetivos incluem a alteração da estrutura cristalina, a oxidação de materiais orgânicos, o aumento da condutividade elétrica, a produção de óxidos e a remoção de impurezas. Essa transformação resulta na modificação das propriedades físicas e na redução significativa da cristalinidade, o que torna a metacaulinita mais reativa permitindo uma melhor interação com a água e outros

componentes da mistura cimentícia e adequada para processos de ativação, resultando em produtos com melhor desempenho (Caballero *et al.*, 2019; Mehsas *et al.*, 2021).

A metacaulinita é conhecida como material pozolânico artificial, e na construção civil, matrizes cimentícias pozolânicas são preferidas pela capacidade de reduzir algumas reações químicas como a carbonatação, que prejudica as armadura das estruturas (Longhi *et al.*, 2020; Nicolini, 2021).

São diversas as aplicações da metacaulinita: na infraestrutura e superestrutura da construção civil; em produtos cerâmicos; em pigmentos para tintas; na agricultura; na indústria cosmética e farmacêutica; na produção de papel, como precursora na síntese de geopolímeros, e outros usos (Campos *et al.*, 2018; Longhi *et al.*, 2020).

Um fator importante no uso da metacaulinita como precursora nos geopolímeros são os limites de temperatura que envolvem as reações de desidroxilação e recristalização. Temperaturas abaixo de 600 °C, podem causar amorfização incompleta no caulim, tornando-o ineficaz na síntese do geopolímero. Por outro lado, temperaturas acima de 800°C são desvantajosas, pelo consumo excessivo de energia e o risco da recristalização da metacaulinita, transformando-a em espinélio e mulita, compostos indesejáveis que comprometem as propriedades mecânicas e a durabilidade dos geopolímeros (Linhares Júnior *et al.*, 2022).

O evento da desidroxilação é influenciado por vários fatores, como o tipo de caulim, o tamanho das partículas, o percentual de impurezas, a taxa de aquecimento para a calcinação e outros (Longhi *et al.*, 2020).

Partículas finas de metacaulinita resultam em níveis mais altos de alumínio dissolvido, essenciais para a geopolimerização. Isso permite uma interação mais eficiente e uma reação mais completa com os ativadores alcalinos, formando uma rede tridimensional densa e criando matrizes geopoliméricas mais robustas. Isso representa uma vantagem em relação a outros precursores com partículas mais grossas, pois a maior área superficial das partículas finas também aumenta a superfície disponível para a reação de geopolimerização (Kohout *et al.*, 2023; Mehsas *et al.*, 2021; Salman *et al.*, 2023).

Em termos de ativação térmica e eficiência energética, o caulim pode ser convertido em metacaulinita à 650 °C. Isso maximiza a eficiência da desidroxilação e minimiza o consumo de energia comparado com temperaturas mais elevadas. Esse

processo equilibra o uso da energia com as propriedades do material e se alinha à sustentabilidade. Em contrapartida, a localização das jazidas de caulim, a tecnologia de extração e de produção, os modais de transporte e as fontes de energia utilizados, são fatores determinantes para a viabilidade econômica e ambiental da produção de geopolímeros com metacaulinita (Maruoka *et al.*, 2023).

Geopolímeros sintetizados com metacaulinita de partículas finas apresentam resistência à compressão mais alta em comparação com metacaulinita de partículas médias e grossas. Um estudo mostrou que geopolímeros produzidos com metacaulinita fina atingiram resistências de 63,70 MPa, consideravelmente superiores aos geopolímeros com metacaulinita de partículas mais grossas que alcançaram 50,54 MPa (Kohout *et al.*, 2023).

Em outra pesquisa, argamassas geopoliméricas de metacaulinita, alcançaram resistências à tração na flexão 27% superiores, consumiram 52% menos energia e emitiram 65% menos CO₂ em comparação as argamassas de cimento *Portland* produzidas com os mesmos parâmetros. (Neupane, 2022).

2.1.3 Ativadores alcalinos

A ativação alcalina é definida como uma reação química em aluminossilicatos sólidos (precursores), induzida por um ativador alcalino simples ou composto, resultando em um material solidificado por meio de reações exotérmicas. Esse processo tem se tornado mais relevante devido ao potencial de utilizar resíduos e reduzir os impactos ambientais associados à produção tradicional de cimento *Portland* (Fořt *et al.*, 2024).

Podem ser utilizados como ativadores alcalinos os hidróxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos, óxidos ou outras substâncias solúveis capazes de aumentar o pH da mistura e acelerar a dissolução do precursor sólido. Hidróxidos e silicatos de potássio são mais comuns, no entanto, como os hidróxidos não contém sílica, ela pode ser adicionada ao sistema por meio dos silicatos. O NaOH é mais disponível e economicamente acessível que o KOH, principalmente devido à sua extensa escala de produção (Reis, 2022; Zhang *et al.*, 2020).

Uma forma de produzir geopolímeros de alta resistência é fazendo a ativação alcalina da metacaulinita, porém, alguns fatores influenciam nos resultados, como a

composição do caulim, o tipo, a composição e a concentração do ativador alcalino. Esses fatores interferem no tempo de pega; na trabalhabilidade; na microestrutura, podendo tornar a matriz geopolimérica mais densa e homogênea; além de interferir nas resistências à compressão, à flexão, ao calor e ao impacto (Rashad, 2013).

Geopolímeros ativados com silicato de potássio (K_2SiO_3) podem alcançar resistências mecânicas 42% superiores, em comparação aos ativados com silicato de sódio. Por outro lado, geopolímeros ativados com silicato de sódio endurecem mais rapidamente que os ativados com (K_2SiO_3). Quanto aos hidróxidos, o de sódio dissolve melhor e mais rapidamente os aluminossilicatos nas reações que o KOH (Liew *et al.*, 2016; Silva Neto, 2021).

Na fase principal de reação entre o ativador alcalino e os precursores ricos em aluminossilicatos é formado o gel de Hidrato de Aluminossilicato de Sódio (NASH). O gel NASH contribui para a formação de uma rede tridimensional mais homogênea e compacta nos geopolímeros devido as suas características interatômicas e às interações com os outros materiais, particularmente a sílica. Isso aprimora a microestrutura melhorando as propriedades mecânicas e a durabilidade desses geopolímeros. Desse modo, a concentração do ativador alcalino é o fator mais crítico no desempenho das matrizes geopoliméricas (Guan *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2024).

Para Davidovits *et al.* (1994), a reação de geopolimerização, junto com a estrutura e propriedades dos geopolímeros, é influenciada na razão Silício/Alumínio (Si/Al) principalmente pelo precursor sólido e pelo Na_2SiO_3 . Segundo Prasanphan *et al.* (2023), nesse processo, os geopolímeros reagem em uma solução altamente alcalina, reorganizando os aluminossilicatos em uma estrutura tridimensional amorfa e contínua que compartilha átomos de oxigênio para formar oligômeros de aluminossilicatos. Esses oligômeros que podem ser classificadas em cadeia de polissialato ($-Si-O-Al-O-$, Si/Al = 1), cadeia de siloxo de polissialato ($-Si-O-Al-O-Si-O-$, Si/Al = 2) e cadeia de dissiloxo de polissialato ($-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-$, Si/Al = 3) (Davidovits *et al.*, 1994; Duxson *et al.*, 2007).

As propriedades das argamassas geopolimérica dependem diretamente das composições dos precursores e dos ativadores usados, sendo que a razão Si/Al da quantidade de Si em relação ao Al nos átomos, afeta significativamente a estrutura molecular dos geopolímeros. Essa razão influencia diretamente propriedades críticas como a resistência mecânica e outras que definem a durabilidade dos produtos

geopolímeros (Prasanphan *et al.*, 2023).

Estudos indicam que uma maior razão Si/Al tende a resultar em uma matriz mais densa e resistente. Geopolímeros com proporção Si/Al de 2,5 mostram maior resistência à compressão e morfologia mais densa. Em determinadas proporções de Si/Al, a incorporação de sílica amorfa ao gel NASH pode aumentar a resistência à tração na faixa de 10-40%. A natureza hidrofílica desse gel, influenciada por grupos hidroxilas, também aumenta a retenção de água e a durabilidade dos geopolímeros. No entanto, o excesso de sílica pode reduzir o módulo de elasticidade e o excesso de hidróxido pode causar a precipitação do gel de aluminossilicato na fase inicial da reação de geopolimerização, resultando em geopolímeros com baixa resistência mecânica (Guan *et al.*, 2023; Kang; Li; Ma, 2024; Kim *et al.*, 2024).

Outras pesquisas apontam que soluções de Na₂SiO₃ com Módulo de Sílica (MS) entre 2 e 3, favorecem a produção de matrizes geopoliméricas por tempo moderado para transformação em gel (Davidovits *et al.*, 1994; Ponomar *et al.*, 2023).

Outras relações também interferem nas propriedades dos geopolímeros. A razão SiO₂/Al₂O₃ descreve a composição dos óxidos na produção de geopolímeros e é fundamental para impulsionar a reação de geopolimerização e a formação da rede estrutural da matriz geopolimérica. Alguns parâmetros de razões molares são indicados entre os compostos alcalinos totais que participam da mistura geopolimérica, como os parâmetros ($3,3 \leq \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 4,5$) e ($10 \leq \text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} \leq 25$), ambos recomendados como intervalos ideais para obtenção de produtos geopoliméricos com melhores propriedades e características que favorecem a durabilidade (Davidovits *et al.*, 1994; Prasanphan *et al.*, 2023).

Diversas pesquisas indicam que a resistência mecânica é afetada pelo nível de porosidade e absorção de água dos geopolímeros e que essas propriedades estão relacionadas às características e dosagens dos ativadores alcalinos utilizados na síntese. Uma razão mais alta de SiO₂/Al₂O₃ pode levar a uma rede mais estável e densa, proporcionando alta resistência mecânica. No entanto, razões muito altas podem reduzir a reatividade durante a ativação alcalina, afetando negativamente a formação dos geopolímeros (Batubara *et al.*, 2022; Esparham; Moradikhou, 2021; Prasanphan *et al.*, 2023).

A composição química dos ativadores alcalinos (NaOH e Na₂SiO₃) exerce um papel fundamental na formação da matriz geopolimérica e, conseqüentemente, nas

propriedades físicas e mecânicas dos geopolímeros. O NaOH promove a dissolução da metacaulinita, liberando íons Al^{3+} e Si^{4+} , enquanto o Na_2SiO_3 fornece silício adicional para a reação de polimerização, favorecendo a formação de uma estrutura mais coesa e resistente. A relação entre esses ativadores influencia diretamente a porosidade, a densidade e a resistência à compressão das argamassas, sendo que um balanço adequado entre ambos é essencial para otimizar a reação de geopolimerização (Aupoli *et al.*, 2019; Gopalakrishna; Dinakar, 2024)

Um estudo sobre argamassas com cinza volante e areia testou concentrações de NaOH de 6 a 18 M, e foi constatado que uma razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de 1,5 com NaOH de 16 M resultou na maior densificação do geopolímero em comparação a outros produzidos com razões diferentes. A densidade mais alta contribuiu para a redução da porosidade e uma resistência à compressão de ≈ 30 MPa em 28 dias de cura. Isso sugere que concentrações mais altas de NaOH e razões mais altas de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ podem aumentar a densidade, reduzir a porosidade e a absorção de água em argamassas geopoliméricas (Gopalakrishna; Dinakar, 2024).

O estudo de Rashad (2013) afirma que a ativação alcalina da metacaulinita com as combinações entre NaOH e Na_2SiO_3 na matriz, geralmente resulta em resistências mecânicas superiores quando comparada à ativação apenas com o (NaOH). O autor relata que matrizes com fibras de carbono que receberam o ativador composto com (NaOH + Na_2SiO_3), tiveram resultados de resistências à flexão variáveis entre 17 e 90 MPa, e outras matrizes contendo as mesmas fibras, que receberam o ativador simples de (NaOH) resultaram em resistências à flexão variáveis entre 14 a 50 MPa.

2.1.4 Areia

A areia um agregado miúdo com uma composição resistente e inerte, ou seja, não reage no processo químico entre água e o aglomerante. Suas funções são: preencher os vazios, reter a água, aumentar o volume, e, evitar fissuras na matriz cimentícia. Além disso, as areias podem ser naturais ou artificiais (Lopes, 2017).

As areias naturais são originadas pela fragmentação e erosão das rochas causadas pela ação da água ou do vento, que as transportam e depositam nos leitos de rios e oceanos, praias e desertos. Seu componente predominante é o Dióxido de Silício (SiO_2), com partículas de tamanhos variados e mesmo as areias de uma

mesma categoria, não tem dimensões uniformes (Domanskaya; Laskina, 2020).

O SiO_2 também conhecido como quartzo é um mineral abundante na natureza, com alta dureza e resistência ao desgaste e à degradação ao longo do tempo. Tais características garantem a presença constante do quartzo em diversos ambientes naturais, mas também contribuem consideravelmente para a produção de argamassas e concretos, onde o quartzo atua como um componente essencial para melhorar a resistência e a durabilidade das misturas cimentícias (Carasek *et al.*, 2016).

Características como o formato e composição granulométrica das areias influenciam na proporção, na distribuição dos componentes e na densidade de empacotamento da matriz cimentícia e se refletem em suas propriedades físicas e mecânicas. Outro aspecto importante é que argamassas mais densas são produzidas com areias densas, e como não há um valor ótimo para a densidade da areia, é importante notar que a proporção dos outros insumos também pode afetar a densidade das argamassas (Ahmed e Martínez, 2021; Ferreira *et al.*, 2022; Lopes, 2017; Sousa *et al.*, 2021).

O estudo de Nana *et al.* (2020) mostrou que argamassas geopoliméricas produzidas com metacaulinita e areia natural no tração 1:2,5 (metacaulinita e areia) usando ativador alcalino composto de NaOH e Na_2SiO_3 na proporção 2:3 em volume, apresentaram resistência à flexão de 8 MPa e resistência à compressão de 66 MPa após 28 dias de cura ambiente. A análise microestrutural revelou uma matriz densa com estrutura integrada e homogênea, porosidade reduzida e algumas microfissuras, características que contribuíram para a resistência mecânica e durabilidade.

O estudo de Sambucci, Sibai e Valente (2021) destaca que as argamassas geopoliméricas com metacaulinita e areia natural apresentam propriedades mecânicas e durabilidade superiores em comparação às argamassas com cimento *Portland*. A metacaulinita pode aumentar a resistência mecânica e a resistência à degradação ambiental, e a granulometria da areia contribui para a redução da porosidade e absorção de água. Fatores como a razão de Si/Al, concentração de álcalis, dosagem de água e condições de cura, influenciam nas características reológicas e microestruturais dessas argamassas, podendo levar ao desempenho otimizado em aplicações de construção, tais como revestimentos de pisos e paredes, reparos e reforços estruturais, chapas de revestimentos de fachada, e outras.

No entanto, os bons resultados obtidos com a areia natural, só agravam os

impactos ambientais em decorrência da exploração desse recurso. Estima-se que a demanda global por areia aumentará 45% até o ano 2060, tornando-se um recurso natural caro e escasso no mundo, pois apesar da aparente abundância, na prática, as areias dos rios são as mais apropriadas para as construções e a renovação das fontes de areia leva milhares de anos (Zhong *et al.*, 2022).

Nem todas as areias naturais atendem os requisitos para construção. As areias dos desertos são muito lisas e arredondadas, tem baixo coeficiente de atrito e pouca aderência a outros materiais. As areias marinhas são muito finas, arredondadas e retentoras de umidade, tem baixa resistência mecânica e são ricas em impurezas como o Cloreto de Sódio (NaCl). As areias de rios são geralmente arredondadas, apresentam granulometria bem distribuída e alto grau de pureza, características essenciais para a produção de argamassas e concretos com boa fluidez, compactação, resistência mecânica e durabilidade (Lopes, 2017; Zhong *et al.*, 2022).

São diversos os impactos da mineração da areia natural. No aspecto físico altera as características do local de extração, causando erosões e assoreamento do leito fluvial, inundações, alagamentos, retração das praias, entre outros. No aspecto químico, causa a degradação da qualidade da água, do ar e do solo por meio da poluição. No aspecto biológico, reduz a biodiversidade local e destrói ecossistemas, afetando o ambiente aquático, áreas de várzea, a flora e a fauna. No aspecto antropogênico, pode danificar a infraestrutura predial ao redor da área de extração, causar perdas em atividades econômicas e a precariedade das condições de vida pelo acesso restrito à água (Deng *et al.* 2022; Rentier e Cammeraat, 2022).

Dessa forma, torna-se urgente a necessidade de alternativas sustentáveis ao uso da areia natural nas construções assim como a necessidade de investimentos em pesquisa e desenvolvimento para encontrar substitutos satisfatórios para as areias naturais assim como avaliar os impactos socioeconômicos e ambientais dessas substituições (Leal Filho *et al.*, 2021).

Uma alternativa para as areias naturais são as areias artificiais ou recicladas, obtidas por processos de britagem, usinagem e reciclagem de resíduos de construções ou de resíduos industriais. Por se tratarem de materiais artificiais, a granulometria dessas areias é definida pelo tipo de processo aplicado e os requisitos de produção são determinados pelas normas de cada país (Gnanadurai *et al.*, 2021).

As areias artificiais, quando produzidas por britagem passam por peneiras

vibratórias até alcançarem a distribuição granulométrica entre 4,8 e 0,074 mm, entretanto, com formato anguloso e sem graduação uniforme. Nas construções são aplicadas em assentamento de pisos e tubulações e também como componentes de argamassas, concretos e misturas asfálticas (La Serna; Rezende, 2013).

O processamento e utilização de areias artificiais a partir de resíduos industriais reduz os impactos ambientais associados à extração das areias naturais, e contribui com a economia circular. Argamassas geopoliméricas com metacaulinita e areia artificial representam uma alternativa aos materiais de construção convencionais, pelo benefício da sustentabilidade e possibilidade de oferecer um bom desempenho físico-mecânico (Gnanadurai *et al.*, 2021; Pavlíková *et al.*, 2019).

O estudo de Benalia, Zeghichi e Benghazi (2022) investigou argamassas geopoliméricas com metacaulinita produzidas com areia natural e com areia reciclada a partir do concreto convencional, todas ativadas por um ativador composto por (NaOH + Na₂SiO₃). Os ensaios revelaram que as argamassas com areia natural apresentaram porosidade e densidade de 14% e 2,10 g/m³, respectivamente. As argamassas com areia artificial apresentaram porosidade e densidade de 19% e 2,17 g/cm³. Em termos de resistência, as argamassas com areia artificial se destacaram com 6 MPa na flexão e 37 MPa na compressão, superando as argamassas com areia natural com 4 MPa na flexão e 20 MPa na compressão. A maior reatividade do ativador nas argamassas com areia artificial foi apontada como fator mais influente nos resultados da resistência mecânica.

Devido ao tempo de endurecimento rápido e alta resistência inicial, as argamassas geopoliméricas com metacaulinita e areia artificial são aplicáveis em revestimentos de alvenarias, reparos estruturais, fixação e rejuntamento de peças cerâmicas e outras aplicações (Amer *et al.*, 2024; Pavlíková *et al.*, 2019).

2.2 Resíduos na construção civil

2.2.1 O consumo de recursos naturais e a geração de resíduos

Os agregados naturais são materiais minerais não renováveis extraídos do solo. No Brasil, a indústria da construção é a principal consumidora desses recursos, sendo que aproximadamente 49% dos minerais extraídos no país correspondem à areia e

ao cascalho, essenciais para as atividades do setor. Apesar do volume significativo de resíduos de construção e demolição, apenas uma pequena porcentagem é reciclada, destacando a dependência do setor de materiais virgens em vez de utilizar agregados reciclados (Nunes; Mahler, 2024).

Em termos globais, cerca de 40% dos agregados minerais são consumidos pela indústria da construção, cuja demanda segue em expansão. Segundo o Relatório Global sobre a Situação da Construção e Edificações (*Buildings-GSR*), publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e pela Aliança Global para Edificações e Construção (GlobalABC), o setor depende de materiais como cimento *Portland* e aço, responsáveis por 18% das emissões globais de CO₂ e por uma grande parcela dos resíduos da construção civil. Apesar dos avanços recentes, o setor ainda figura entre os principais responsáveis pela crise climática, consumindo 32% da energia global e contribuindo com 34% das emissões mundiais de CO₂ (*United Nations Environment Programme, 2025; Vijerathne et al., 2024*).

A reciclagem de resíduos de construções e industriais pode reduzir a dependência dos agregados para construção. Nesse contexto, surge a oportunidade de aumentar a reciclagem e utilizar agregados alternativos para mitigar os impactos ambientais e preservar os recursos naturais (Perkins *et al.*, 2021).

Apesar do setor da construção ser um grande consumidor de recursos não renováveis, o interesse desse setor é crescente em práticas sustentáveis e modelos de economia circular que possam mitigar danos ambientais e promover a preservação dos recursos naturais. Desse modo, estratégias e tecnologias inovadoras podem reduzir os desperdícios e aumentar a eficiência do setor (Thomas; Praveen, 2021).

No mesmo sentido, o setor de construção é um dos principais responsáveis pela geração de resíduos sólidos. Aproximadamente 30% dos resíduos globais anuais são originados desse setor e projeta-se o aumento com o crescimento populacional e a demanda por infraestrutura predial (Alotaibi; Martinez-Vazquez; Baniotopoulos, 2023).

As causas da geração de resíduos no setor da construção podem ser agrupadas em sete categorias: erros ou alterações de projeto; falhas na aquisição, manuseio e armazenamento dos materiais; condições locais da obra; falhas na execução dos serviços; ocorrência de acidentes; ineficiência na gestão e fatores externos como o clima. Por outro lado, os tipos de resíduos são influenciados pelo tipo e tamanho do projeto e pelas tecnologias construtivas aplicadas (Alotaibi; Martinez-Vazquez;

Baniotopoulos, 2023).

A pesquisa em climas tropicais de Meng *et al.* (2024) apontou que o uso de materiais cimentícios e metálicos, a área construída e a altura influenciam na geração de resíduos sólidos nos canteiros de obras. Na Turquia, a pesquisa de Metinal e Ayalp (2024) identificou e classificou 54 fatores de geração de resíduos, ressaltando que a compreensão pode ajudar a mitigar esses fatores, no entanto, obstáculos de ordem cultural, técnica, econômica e organizacional para a implementação de estratégias de gerenciamento de resíduos podem dificultar o progresso rumo à sustentabilidade na indústria da construção.

Materiais cimentícios podem contribuir com o gerenciamento de resíduos sólidos ao utilizar resíduos industriais nas composições, entretanto, a disponibilidade de resíduos como cinzas volantes e escórias é limitada, pois depende da produção de produtos primários. Esses resíduos são gerados em grandes quantidades em processos industriais como a combustão de carvão em usinas termelétricas e a produção de metais em usinas siderúrgicas. Conseqüentemente, sua disponibilidade depende da escala operacional e da frequência de produção dessas indústrias (Mahajan; Rupali; Mohanty, 2022; Verma *et al.*, 2023).

Essa dependência juntamente com o movimento mundial pela descarbonização, geram uma oferta flutuante de resíduos industriais, limitando o fornecimento. Outro fator limitante que pode afetar a confiabilidade desses resíduos é a variação em suas propriedades físico-químicas. Isso ressalta a importância da pesquisa com outros materiais residuais que sejam sustentáveis, tenham propriedades amplamente conhecidas e estáveis (Dalawai *et al.*, 2021).

2.2.2 Resíduo Plástico

2.2.2.1 O custo ambiental dos plásticos

Com o aumento da população global, a demanda por recursos também aumentou, e o desequilíbrio entre a taxa de consumo e a capacidade de sustentação, causou o aumento da produção de resíduos e da poluição ambiental (Pilz *et al.*, 2020).

Nesse cenário, estão os plásticos, que antes eram celebrados como uma das grandes conquistas do século XX devido à sua versatilidade, durabilidade e baixo

custo, e apesar da sua contribuição inegável para a vida moderna, hoje são criticados constantemente, pois o volume de lixo plástico descartado não se degrada na mesma velocidade do volume acumulado (Tang *et al.*, 2022).

Anualmente, o mundo produz cerca de 100 milhões de toneladas de produtos plásticos, dos quais 9% são reciclados, 12% são incinerados e 79% terminam em aterros sanitários ou são descartados no meio ambiente, indicando que embora as alterações climáticas e a poluição por lixo plástico sejam tratadas separadamente, elas estão relacionadas entre si (Atienza *et al.*, 2023).

O uso excessivo de plásticos tem causado impactos ambientais significativos, incluindo a sobrecarga de aterros sanitários, a contaminação do solo e das águas, e acúmulo de substâncias nocivas. Partículas de plásticos menores que 5 mm, quase invisíveis a olho nu, estão entrando na cadeia alimentar de seres aquáticos e, podem representar um risco à saúde humana, quando consumidos (Tang *et al.*, 2022).

Particularmente, o PEBD é um plástico amplamente utilizado na produção de sacolas plásticas, espumas, brinquedos, plásticos bolha, embalagens de alimentos e bebidas, entre outros fins como mostram as Figuras 4(a) (b) (c). No entanto, após o descarte, seus resíduos acumulam-se significativamente no meio ambiente, como mostram as Figuras 4(d) (e) (Hariadi *et al.*, 2021; Ohemeng e Okolu, 2019).

Figura 4 – Produtos fabricados com PEBD: (a) sacolas plásticas; (b) mangueira de jardim; (c) frascos de produtos. Potencial destinação dos plásticos no pós-consumo: (d) lixo no oceano (e) descarte irregular.



Fonte: *World Population Review* (2024)

O Brasil foi classificado como o quarto maior produtor de lixo plástico no mundo gerando cerca de 11 milhões de toneladas de resíduo plástico/ano, precedido apenas pelos Estados Unidos (71 milhões), China (55 milhões) e Índia (20 milhões). Desse montante, apenas 1,28% desse volume é reciclado e a maioria vai para aterros sanitários, é incinerada ou fica exposta no ambiente (*World Population Review*, 2024).

Conforme a produção de plásticos acompanha o ritmo do crescimento da população e da economia mundial, o volume de resíduos plásticos também aumenta. Esse é o custo ambiental do plástico.

Para mudar esse panorama e cumprir com os acordos da agenda climática global, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabeleceu objetivos, diretrizes e outras ações para o gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil. Dentre os objetivos destacam-se: o estímulo ao consumo de materiais sustentáveis, e o desenvolvimento de tecnologias que minimizem os impactos ambientais. Em resposta à PNRS, a indústria da construção civil, dentre outras, passou a incluir a pesquisa de tecnologias limpas em suas pautas de trabalho (Brasil, 2010).

Conforme o relatório técnico da ISO/TR 21960:2020, microplástico grande é toda partícula insolúvel em água com dimensões $1 \text{ mm} \leq e < 5 \text{ mm}$, proveniente de produtos ou parte de produtos contendo plástico. Nesse intervalo estão os *pellets* de plástico, que são grânulos de resinas, originados de processos fabris, e utilizados na fabricação de produtos para o consumo humano. Segundo essa norma o termo microplástico é aplicável as partículas entre $1 \mu\text{m} \leq e < 1 \text{ mm}$.

Para mitigar os danos ambientais pelo lixo plástico, várias tecnologias estão sendo estudadas. Uma alternativa é o desenvolvimento de plásticos degradáveis, outras alternativas são a reutilização e a reciclagem dos resíduos. As duas últimas, usam diferentes procedimentos, mas ambas tem o mesmo propósito de transformar os resíduos plásticos em produtos com alto valor agregado (Tang *et al.*, 2022).

2.2.2.2 Resíduo plástico como material de construção

Construções sustentáveis envolvem o uso equilibrado dos recursos naturais e podem fazer parte das ações globais no combate da poluição por plásticos, e aos efeitos crescentes das emissões de CO₂. Diante da crise climática, a indústria da construção precisa adotar novos materiais e tecnologias alinhadas com a

sustentabilidade e a responsabilidade ambiental. Isso envolve o aproveitamento dos resíduos das construções ou processos industriais (Atienza *et al.*, 2023).

Embora as argamassas geopoliméricas produzidas com metacaulinita e agregados naturais contribuam na redução das emissões de CO₂, as argamassas geopoliméricas produzidas com resíduos industriais entre eles os plásticos, ajudam na reciclagem e na redução do descarte desses materiais (Benalia; Zeghichi; Benghazi, 2022).

Todas as categorias de plásticos apresentam propriedades físicas e químicas bem definidas como cristalinidade, deformabilidade, resistência mecânica, estabilidade química e outras, permitindo múltiplos usos e funções diversas. No entanto, necessitam de estratégias de desenvolvimento sustentável para reduzir os impactos ambientais decorrentes de sua produção e utilização, e a incorporação de materiais residuais substituindo a areia natural em geopolímeros, aumenta essa sustentabilidade, reduzindo o descarte dos resíduos, se alinhando à economia circular e promovendo a eficiência energética (Mariano *et al.*, 2022; Tarazona *et al.*, 2022).

Ainda são limitados os estudos sobre o aproveitamento dos resíduos plásticos nas construções, particularmente na utilização como agregado miúdo em argamassas e concretos, porém, a literatura sugere que a utilização desses materiais nas matrizes cimentícias, pode auxiliar na mitigação dos danos ao meio ambiente (Pilz *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o resíduo de PEBD é investigado como possível alternativa e pode agregar considerável valor ao produto final. Como um polímero termoplástico sua densidade que varia de 0,91 a 0,94 g/cm³, e aproximadamente 60% de sua estrutura morfológica é cristalina. Tem ponto de fusão próximo a 115 °C, é altamente resistente a ataques químicos em temperaturas inferiores a 60 °C, é flexível e resistente a ruptura (Hariadi *et al.*, 2021).

O PEBD apresenta alta resistência ao impacto, boa processabilidade, excelente resistência à tração e alongamento na ruptura, e é notáveis como isolante elétrico. A alta demanda de produção devida à larga utilização, o alto volume de descarte e o aumento da produção de plástico reciclado no pós-consumo, fizeram a oferta de PEBD no mercado se expandir consideravelmente (Pham, 2021; Poh *et al.*, 2022).

A substituição parcial da areia por resíduos de PEBD em matrizes cimentícias, pode ser uma vantagem na fabricação de materiais leves e ambientalmente sustentáveis. A densidade inferior dos resíduos plásticos como o PEBD em relação a

areia natural permite a obtenção de compósitos com menor peso específico, contribuindo para a redução das cargas estruturais nos edifícios, como também facilitando o manuseio, transporte e instalação de elementos construtivos para aplicações não estruturais, como revestimentos, painéis decorativos ou placas cimentícias para pisos e paredes com funções estéticas ou de isolamento térmico (Gounden *et al.*, 2023; Soares *et al.*, 2022).

A Figura 5 mostra alguns materiais de construção produzidos com resíduos de PEBD, resultando em produtos esteticamente agradáveis, sustentáveis e com potencial para minimizar impactos ambientais, e evidencia a valorização desses resíduos como substitutos dos materiais convencionais (Ohemeng e Okolu, 2019).

Figura 5 – Materiais de construção produzidos com resíduo de PEBD: (a) blocos intertravados; (b) alvenaria de tijolos; (c) pastilhas cerâmicas



Fonte: Revista Exame (2022)

O estudo conduzido por El-Tanani *et al.* (2022) produziu geopolímeros de metacaulinita utilizando entre outros resíduos plásticos, o PEBD em substituição de 100% da areia natural. As argamassas utilizaram ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) como ativadores alcalinos na proporção de 160 g (cada) para 1 kg de material seco. A morfologia das argamassas mostrou estruturas amorfas, que foram comparadas às estruturas das argamassas produzidas com metacaulinita e areia. O resultado de resistência à compressão foi 9,05 MPa e a densidade foi 1,41 g/cm³. Os autores concluíram que vários fatores contribuíram para esses resultados, entre eles a falta de reatividade do resíduo em relação aos ativadores e a baixa aderência dos resíduos com as matrizes.

Estudos indicam que as propriedades das matrizes cimentícias são influenciadas pelas características físicas e químicas dos materiais agregados, inclusive os plásticos, influenciando no desenvolvimento da estrutura interna e no processo de hidratação e cura dessas matrizes. A resistências à compressão, à tração e à flexão refletem a eficiência desse processo. Uma hidratação eficiente fortalece a matriz, enquanto uma hidratação deficiente compromete sua resistência mecânica (Kim *et al.*, 2024; Verdolotti *et al.*, 2014).

No contexto das argamassas geopoliméricas à base de metacaulinita ativada por Na_2SiO_3 e NaOH , a hidratação refere-se a presença de água no processo de dissolução inicial e ativação das partículas de metacaulinita, assim como na formação das ligações químicas dentro da matriz geopolimérica. Durante a cura, os ativadores promovem a dissolução dos componentes reativos da metacaulinita e a formação de estruturas tridimensionais de aluminossilicatos hidratados. Esse processo resulta na compactação e densificação da microestrutura da matriz geopolimérica. Quanto mais homogênea e densa for essa microestrutura, menor será a presença de poros ou defeitos internos, propiciando uma resistência à compressão mais elevada (Kim *et al.*, 2024).

Matrizes cimentícias contendo agregados de resíduo plástico podem apresentar hidratação deficiente devido a diversos fatores. O aumento do teor de resíduo pode interferir na formação dos produtos de hidratação, além de favorecer a aglomeração das partículas, dificultando a distribuição uniforme e o acesso da água à matriz. A hidrofobicidade dos plásticos também pode prejudicar a penetração da água e a formação de ligações químicas essenciais à hidratação. Além disso, esses materiais podem conter elementos químicos que inibem as reações ou formem produtos indesejáveis, comprometendo a resistência da matriz (Kim *et al.*, 2024; Poh *et al.*, 2022; Verdolotti *et al.*, 2014).

2.3 Geopolímeros

Geopolímeros são produtos inorgânicos produzidos a partir de precursores sólidos naturais ou resíduos industriais processados, ativadores alcalinos e água. A proposta inicial dos geopolímeros foi a redução das emissões de CO_2 , e como material alternativo ao cimento *Portland* em obras de infraestrutura de transportes, construção

civil e aplicações offshore. O termo “geo” indica semelhança com materiais geológicos, e “polímero” se refere à química dos aluminossilicatos (Davidovits, 2013).

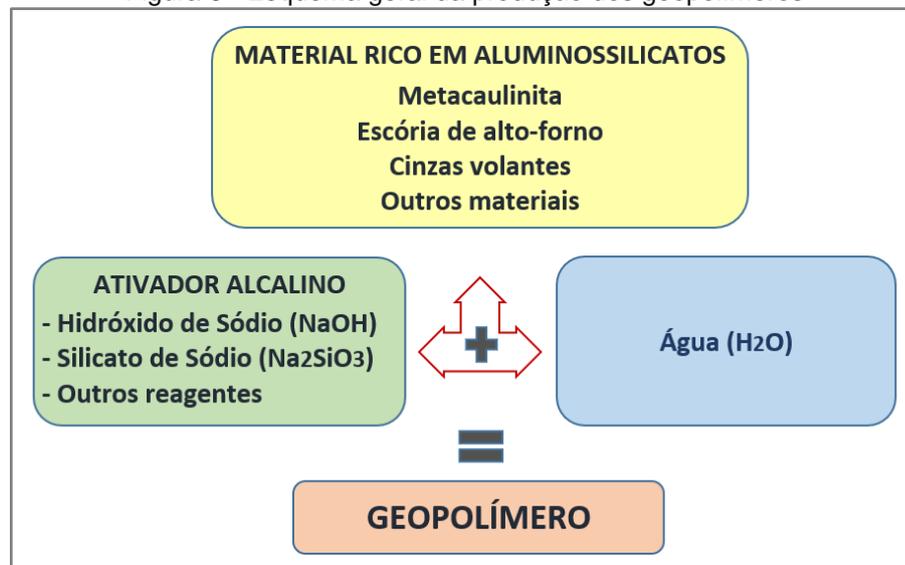
Conforme a avanço tecnológico, os geopolímeros tornaram-se a base de novos materiais, como: revestimentos cerâmicos, materiais para imobilização de resíduos, catalisadores, materiais para impressão, e outros (Cong; Cheng, 2021).

Esses compósitos ganharam notoriedade pelas propriedades de adesão das partículas e desempenho mecânico equivalente ou superior ao cimento *Portland*. São frequentemente estudados quanto a diversas características, tais como: propriedades térmicas, resistência mecânica, resistência à altas temperaturas e aos ataques químicos, baixa permeabilidade, estabilidade térmica, condutividade elétrica, baixa porosidade, durabilidade e outras (Moya *et al.*, 2024).

A geopolimerização ocorre com a quebra e a recombinação das cadeias de aluminossilicatos do precursor. Os íons (OH^-) e do (NaOH), principalmente dos sítios com alumínio, são fundamentais nesse processo, e possíveis impedimentos à essa reação, como a falta ou aprisionamento dos íons, ou, impurezas em excesso no precursor, podem afetar as propriedades finais das matrizes geopoliméricas (Kiventerä *et al.*, 2020).

A Figura 6 ilustra o esquema de produção dos geopolímeros, no qual os precursores são obtidos de fontes como rochas naturais, cinzas volantes, escórias de alto forno e outras. Os ativadores são compostos por metais alcalinos solúveis, geralmente Sódio (Na) ou Potássio (K) (Davidovits, 2013; Moya *et al.*, 2024).

Figura 6 - Esquema geral da produção dos geopolímeros



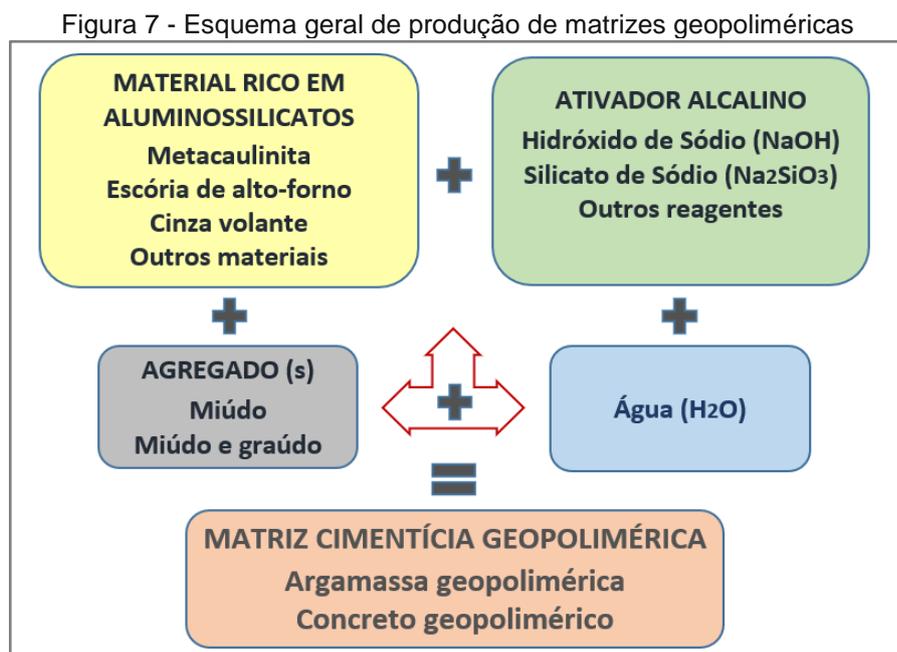
Fonte: Adaptado de Davidovits (2013) e Zhang *et al.* (2020)

Os ativadores alcalinos controlam o mecanismo da reação de geopolimerização. Isso se deve ao alto pH do ativador que realiza a hidrólise das partículas dos aluminossilicatos do precursor, promovendo a dissolução e a transformação em gel NASH que ocorre rapidamente (Igibah; Amu; Aderinola, 2022).

Para Nicolini (2021) geopolímeros podem se tornar mais resistentes e impermeáveis se forem curados por fonte térmica em temperaturas superiores à temperatura ambiente (entre 40 e 100 °C), entretanto, visando a eficiência energética, Davidovits (2013) defende que geopolímeros devem ser curados sempre à temperatura ambiente.

Geopolímeros formam ligações químicas fortes com diversos tipos de agregados, resultando em matrizes com propriedades químicas e mecânicas satisfatórias conforme a demanda. Eles proporcionam uma considerável economia de energia na produção do clínquer ao substituir o cimento Portland nas matrizes cimentícias (Longhi *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2022).

A Figura 7 mostra o esquema de produção da matriz geopolimérica que é semelhante ao da matriz de cimento *Portland*. Essa produção envolve a mistura dos insumos, a moldagem e a cura, com tempo de cura lento o suficiente para o preparo manual ou mecanizado, transporte até o local de destino, lançamento e moldagem, e atingem a maior parte da resistência mecânica em 24 h após o início da cura ambiente (Davidovits, 2013; Moya *et al.*, 2024).



Fonte: Adaptado de Davidovits (2013) e Oliveira *et al.* (2022)

Uma contribuição dos geopolímeros para a redução dos danos ambientais é a utilização de resíduos industriais em suas composições. Pesquisas recentes sugerem que geopolímeros produzidos com resíduos industriais podem atingir elevadas propriedades mecânicas e maior durabilidade, além da redução de até 80% nas emissões de CO₂. Essas ações reduzem o descarte de resíduos e sinalizam uma opção sustentável (Borçato *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2022).

Geopolímeros são mais sustentáveis que produtos de cimentos *Portland*, pois precisam de menos energia durante a produção, podendo reduzir as emissões de CO₂ até 90%. Além disso, sem a cura térmica, são ainda mais eficientes, diminuindo as emissões de CO₂ e o custo de produção das matrizes (Davidovits, 2013).

Um estudo analisou a viabilidade da substituição da areia natural por resíduos de PEBD, em proporções de 50% e 100%, na produção de chapas cimentícias com argamassas geopoliméricas de metacaulinita. As argamassas foram divididas em dois grupos: um com ativador alcalino simples (NaOH) e outro com ativador alcalino composto (NaOH e Na₂SiO₃) na proporção de 40-50 g, respectivamente. Os resultados mostraram que a resistência à compressão das argamassas com ativador simples foi inferior às com ativador composto, diminuindo conforme a substituição da areia pelo resíduo. Para argamassas com 50% e 100% de resíduo e ativador simples, as resistências foram de 12,47 e 7,71 MPa, respectivamente. Com ativador composto, as resistências foram de 22,69 e 10,68 MPa, respectivamente (Soares *et al.*, 2022).

Outro estudo produziu chapas cimentícias com argamassas geopoliméricas de metacaulinita e resíduo de PEBD nas proporções de 50 e 100% em substituição à areia natural. Essas argamassas foram produzidas com ativador alcalino composto (NaOH e Na₂SiO₃) na proporção 40-50 g. Os resultados mostraram que a resistência à tração na flexão na argamassa com 50% de resíduo foi 7,50 MPa e na argamassa com 100% de resíduo a resistência foi 6,20 MPa (Soares, 2024).

2.4 Chapas cimentícias

A demanda por obras mais rápidas e de alta qualidade impulsiona o uso de tecnologias e materiais de construção mais eficientes e econômicos. Inovações no processo fabril reduzem custos ao reduzir perdas de matéria-prima e mão de obra. Na obra, a modernização aumenta a produtividade, melhora o tempo de execução dos

serviços, reduz custos e geração de resíduos. Além disso, podem ajudar a atenuar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade (Holanda *et al.*, 2023).

Nesse contexto surgiu o *Light Steel Frame* (LSF), um sistema de construção a seco que utiliza perfis de aço galvanizado dobrados a frio para formar painéis estruturais e não-estruturais como paredes, pisos e coberturas. Suas principais características são a leveza que facilitam o transporte e montagem dos perfis, a durabilidade e segurança do aço resistente à corrosão, a flexibilidade no projeto e na execução, a economia nos custos devido a otimização de materiais e a redução do tempo de construção, e a sustentabilidade promovida pela eficiência energética e a redução de resíduos (Holanda *et al.*, 2023; Rukavina *et al.*, 2022).

No Brasil esse sistema tem despertado o interesse do mercado e é bastante procurado quando o objetivo do projeto é uma obra ou reforma limpa com prazo reduzido para a execução, aspectos também associados a resistência, praticidade e rapidez na montagem (Oliveira; Resende, 2021).

Existem diversos materiais de vedação aplicáveis ao sistema LSF, no entanto, de acordo com os objetivos estabelecidos, este trabalho se limita à abordagem de vedação com chapas cimentícias.

Chapas cimentícias são painéis pré-fabricados para vedação em construções a seco para vedação predial. São indicada para usos diversos como paredes retas ou curvas internas e externas, forros e divisórias, como paredes estruturais em construções leves (pré-fabricadas) e por serem mais leves que as alvenarias convencionais, aliviam as cargas estruturais dos edifícios. São produzidas com cimento *Portland*, agregado miúdo, aditivos e fibras sintéticas e/ou de celulose. Cada fabricante utiliza uma composição própria que se projeta na resistência mecânica, na absorção de água e outros requisitos normativos e de mercado (Holanda *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2022).

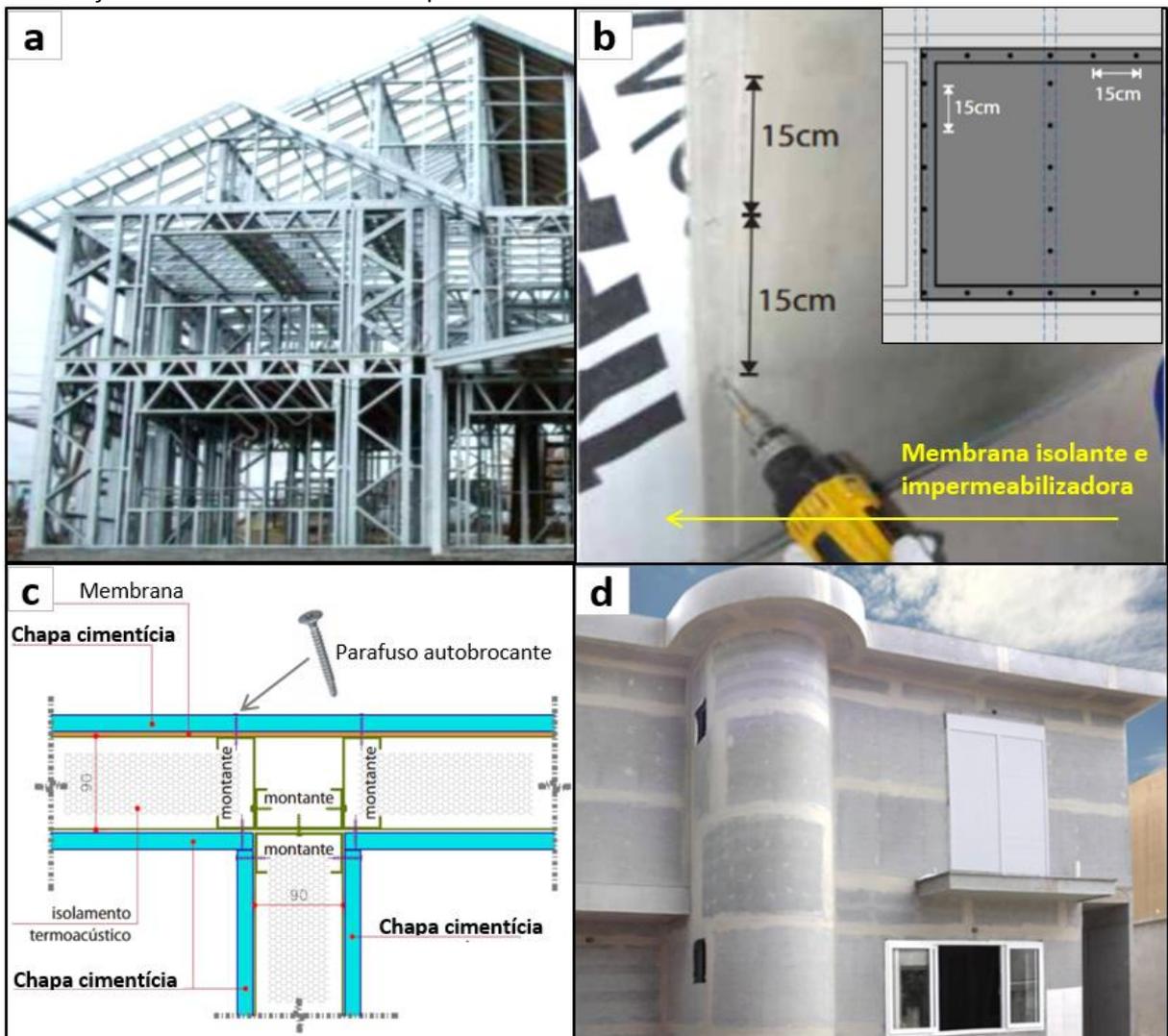
Para a fixação das chapas cimentícias no sistema LSF são necessários acessórios, tais como: parafusos, montantes, fitas de contraventamento, massa de rejunte, delimitador, sistemas para tratamento das juntas, e outros elementos a serem aplicados conforme as especificações do fabricante e de acordo com as normas técnicas estabelecidas, de forma a assegurar a eficiência do produto (Oliveira; Resende, 2021).

Há variações de tamanhos e espessuras em chapas cimentícias, mas todas

possuem características em comum, como: durabilidade, baixa absorção de água, são leves e recicláveis, aceitam diversos tipos de acabamento, dentre outras. Também há chapas com características específicas conforme os requisitos de fabricação e são: incombustíveis; antifúngicas, com isolamento térmica, e outras. (Speck, 2014).

A Figura 8a mostra uma estrutura típica LSF com perfis em aço; na 8b, é vista a fixação da chapa no perfil envelopado pela membrana impermeabilizadora e de isolamento termo-acústico; a 8c, é apresenta um detalhe da fixação das chapas nos montantes que mantêm o esquadro e nivelamento das chapas nas paredes; na 8d, uma construção em LSF vedada com chapas cimentícias

Figura 8 – Sistema de construção LSF com chapas cimentícias: (a) estrutura LSF em aço galvanizado; (b) fixação da chapa na estrutura LSF; (c) detalhe da fixação das chapas em paredes em T; (d) construção em LSF vedado com chapas cimentícias.



Fontes: Brickawall (2025); Daniel, Freitas (2023)

A investigação de materiais alternativos ao cimento *Portland* e à areia natural na produção de placas cimentícias para uso no LSF tem sido explorada devido as questões ambientais e as limitações de recursos naturais. Para mitigar esses desafios, vários estudos tem pesquisado materiais cimentícios suplementares e agregados alternativos.

A otimização de chapas cimentícias para o sistema LSF pode reduzir significativamente os impactos ambientais e os custos de construção. Incorporando materiais e processos inovadores, essa abordagem oferece uma solução potencial para reduzir as emissões de CO₂ e aumentar a eficiência econômica em projetos de construção. Estratégias tem sido exploradas para a redução do uso de cimento *Portland*, aumento da eficiência do material e incorporação de práticas sustentáveis para torna-las viáveis às necessidades da construção moderna (Yang *et al.*, 2024).

Uma pesquisa substituiu 100% da areia natural por resíduo de PVC e pó de vidro em argamassas de cinza volante álcali ativadas. Os resultados do efeito da substituição total da areia revelaram que essas argamassas superaram as argamassas à base de cimento Portland em termos de propriedades mecânicas, absorção de energia, condutividade térmica, e estimativa de emissões de CO₂ mostrando potencial para aplicação em chapas cimentícias com resistências à flexão e compressão de 9 e 11 MPa (El-Seidy *et al.*, 2023).

Outra pesquisa desenvolveu argamassas substituindo totalmente o cimento Portland por pó de vidro, escória de alto-forno e cinzas volantes. A areia natural foi substituída por areias artificiais de vidro e de fundição. As substituições propostas visaram a redução das emissões de CO₂, a sustentabilidade na utilização da areia, e demonstrar o potencial das argamassas em chapas cimentícias para o LSF e outras aplicações diversas. Os melhores resultados de desempenho mecânico foram obtidos com as argamassas de escória e areia de vidro que alcançaram resistências à flexão de 4,19 MPa e resistência à compressão de 41,9 MPa (Gholampour *et al.*, 2020).

A NBR 15498:2021 define os requisitos e ensaios de aceitação em chapas cimentícias e estabelece três categorias de chapas: A (uso externo com exposição direta às intempéries); B (uso externo com exposição indireta às intempéries); C (uso interno). Para as categorias A e B, a determinação da resistência à flexão deve ser feita com as chapas saturadas em água por 24 h, no mínimo. Para a categoria C, as chapas devem estar em condição ambiente.

A Tabela 1 contida na NBR 15498:2021 apresenta os requisitos mínimos para aceitação da resistência à tração na flexão para chapas cimentícias.

Tabela 1 – Requisitos mínimos de resistência à tração na flexão para chapas cimentícias

Classe	Requisitos mínimos (MPa)	
	Categoria A e B (condição saturada)	Categoria C (condição ambiente)
Classe 1	4	4
Classe 2	7	7
Classe 3	13	10
Classe 4	18	16
Classe 5	25	22

Fonte: NBR 15498:2021

As chapas cimentícias para o sistema LSF são caracterizadas por sua leveza, isolamento térmico e resistência mecânica. A avaliação das propriedades físicas e mecânicas, como densidade e resistência à flexão, são essenciais para a estabilidade estrutural dessas chapas. A integração e otimização de diferentes materiais em sua composição podem aprimorar essas características e propriedades. O tipo de material cimentício, os agregados e outros aditivos na argamassa são determinantes nos resultados da resistência à flexão, e o aprimoramento desses componentes e dos aditivos são requisitos para obtenção de chapas mais duráveis e resistentes (Li, Yingjie *et al.*, 2024; Zheng *et al.*, 2022).

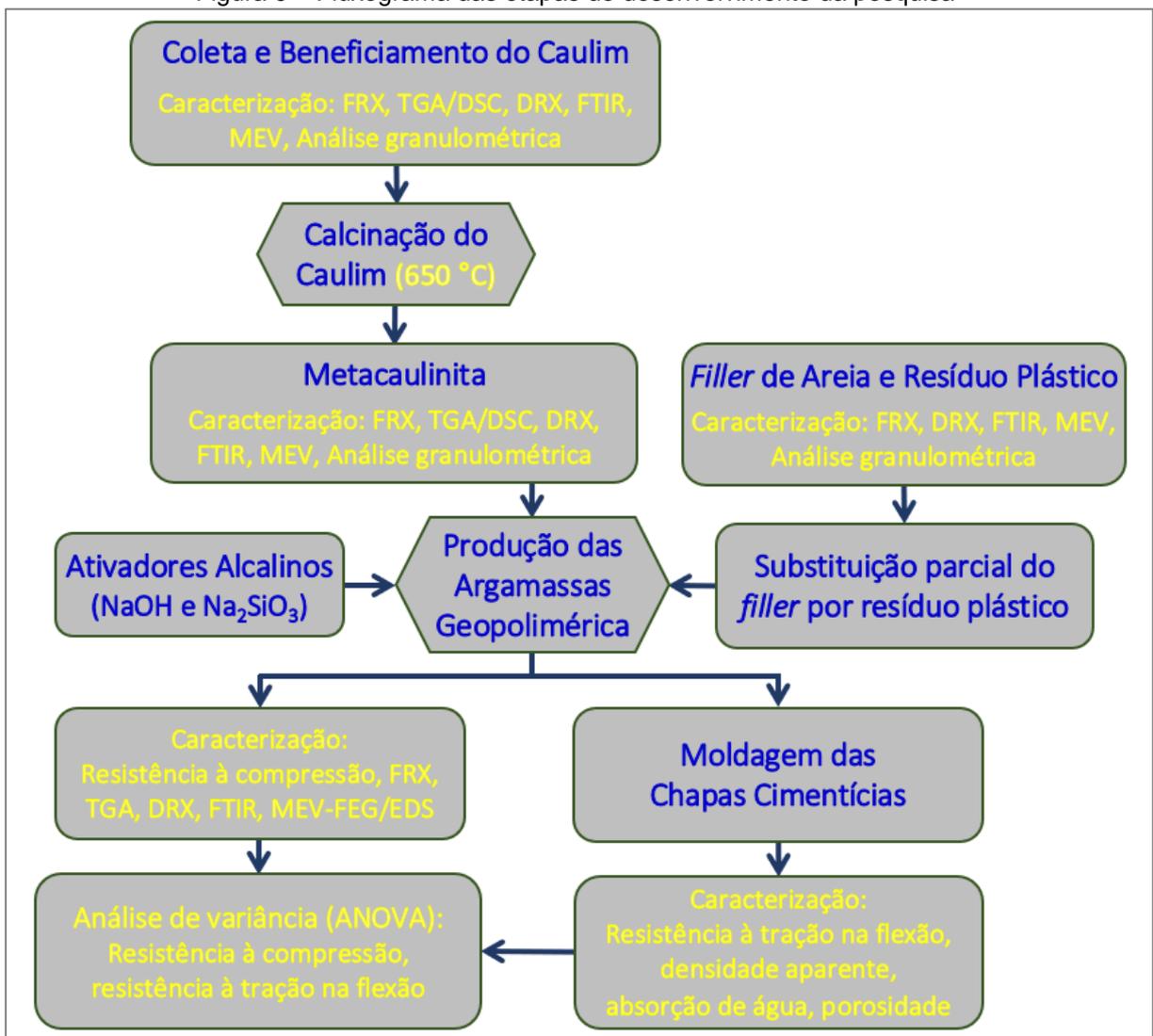
A determinação da capacidade de suportar tensões de flexão é essencial para garantir que as chapas cimentícias sejam utilizadas sem imperfeições ou deformações excessivas. Isso é fundamental para aplicações estruturais que exigem integridade, funcionalidade e segurança. A resistência à flexão determina a durabilidade, a capacidade de carga e o desempenho estrutural das chapas, e contribui para a conservação dos edifícios e estruturas que utilizam essas chapas, o que é indispensável para a segurança dos usuários e a durabilidade das construções (Hong *et al.*, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 9 mostra a sequência das etapas desenvolvidas neste trabalho.

O processo iniciou-se com a coleta e beneficiamento do caulim, seguido pela calcinação para obtenção da metacaulinita, que, junto aos demais materiais, passou por caracterizações físico-químicas detalhadas. Em seguida, os ativadores alcalinos foram adicionados para a formulação das argamassas, com a substituição parcial do *filler* de areia por resíduo de PEBD. Após a produção e moldagem dos corpos de prova, foram realizadas as análises físico-químicas, microestruturais e mecânicas, para avaliar o desempenho das argamassas geopoliméricas e chapas desenvolvidas.

Figura 9 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2024)

3.1 Materiais

O caulim utilizado e mostrado na Figura 10(a), é proveniente da jazida de coordenadas 2035'09.22"S e 60001'56".83O próxima à Rodovia BR-174, na cidade de Presidente Figueiredo, região metropolitana de Manaus/AM. O filler de areia mostrada na Figura 10(b) é originária do leito de rio e foi adquirida no comércio local de Manaus. O resíduo plástico em formato de flocos mostrado na Figura 10(c) tem dimensões < 5 mm e foi obtido da empresa Reciclagem Amazonas.

Como ativadores alcalinos foram escolhidos o NaOH Figura 10(d) e o Na_2SiO_3 Figura 10(e). O NaOH com concentração molar de 12 M foi adquirido da *Nox Solutions*. O Na_2SiO_3 foi adquirido da Quimidrol com MS de 2,17 na razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ sendo 14,5% de Na_2O e 31,5% de SiO_2 , em massa.

A água foi fornecida pela estação de abastecimento da UFAM.

Figura 10 – Materiais: (a) caulim; (b) filler de areia; (c) resíduo de PEBD; (d) Hidróxido de Sódio (NaOH); (e) Silicato de Sódio (Na_2SiO_3)



Fonte: Autoria própria (2024)

3.2 Métodos

3.2.1 Beneficiamento e calcinação do caulim

O caulim requer o processo de beneficiamento antes da utilização para a remoção de impurezas e frações de areia. O beneficiamento envolveu as seguintes etapas: destorroamento manual do caulim seco em um almofariz com pistilo, à temperatura ambiente; peneiramento úmido com lavagem em água, na peneira *Tyler* #200 com malha de 0,075 mm; secagem em estufa a 100 °C por 12 h, seguida de resfriamento na própria estufa por mais 12 h; segundo destorroamento manual à temperatura ambiente em almofariz com pistilo; peneiramento seco na peneira *Tyler* #200 com malha de 0,075 mm, para uniformização das partículas.

Baseado no estudo de Soares (2022), foi estabelecida a temperatura de 650 °C para o procedimento de calcinação que foi iniciada à temperatura ambiente de 30 °C e elevada até 650 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min por 1 h. Em seguida, o material resfriou na mufla por 12 h para ser preservado da umidade. Por último, o material foi armazenado em sacos com fecho hermético. A calcinação ocorreu no Laboratório de Laminação do Departamento de Geociências do Instituto de Ciências Exatas/UFAM, na Mufla Linn Elektro Therm™, modelo KK-260 com temperatura até 1300 °C.

3.2.2 Caracterização dos materiais

Nos materiais foram realizadas as análises de Fluorescência por Raios X (FRX), Termogravimetria e Calorimetria Exploratória Diferencial (TGA/DSC), Difratomia de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), análise granulométrica por difração à laser e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Para a determinar da composição química, foram realizadas as análises por FRX. No caulim e na metacaulinita para verificar os teores dos aluminossilicatos (SiO_2 e Al_2O_3) essenciais à formação da estrutura geopolimérica. No *filler* de areia para identificar os principais elementos presentes e possíveis contaminantes. As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC) da

FT/UFAM, no Espectrômetro *Malvern Panalytical Instruments*TM modelo Epsilon 3XL com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA em atmosfera de gás Hélio (He) com pressão 10 atm/10 kgf/cm².

Para verificar a temperatura de desidroxilação do caulim e sua transformação em metacaulinita, foi feita a análise de TGA/DSC. Na metacaulinita, a análise foi para verificar sua estabilidade. As análises foram realizadas no Laboratório de Ensaio Físico-Químicos de Materiais (LEQM) da FT/UFAM, no Analisador Térmico Simultâneo, modelo Q600 da *TA Instrument*TM com taxa de aquecimento de 10 °C/min até a temperatura de 1200 °C, em atmosfera inerte com fluxo de gás Nitrogênio 5.0.

Com o objetivo de identificar as mudanças de fases nos materiais, foram conduzidas as análises por DRX. No caulim para verificar as fases cristalinas, na metacaulinita para verificar a estrutura amorfa sem cristalinidade significativa. Na areia para revelar fases minerais no resíduo de PEBD por se tratar de um termoplástico predominantemente amorfo, para confirmar a ausência de cristalinidade mineral. A análise foi realizada no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica e Caracterização de Materiais (LIME) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), no difratômetro *Ascii*TM Dump operado com radiação Cu-K α ($\lambda=0.1541 \text{ \AA}$), na faixa angular entre 5 a 80 (2θ) com passo 0,02° e velocidade de 5°/min.

As análises por FTIR foram realizadas no caulim para identificar os grupos funcionais e confirmar a estrutura cristalina do material. Na metacaulinita para confirmar a transformação estrutural. Nos agregados para identificar os grupos funcionais. As análises foram realizadas pelo Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologia no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais do Instituto Federal do Amazonas (SisNANO/LSCN/IFAM), no Espectrofotômetro Infravermelho com dispositivo de Reflectância Total Atenuada (ATR) da *Agilent Technologies*TM, Cary 630, no modo transmitância na faixa de 4.000 a 650 cm⁻¹, com resolução de 8/cm⁻¹ e acúmulo de 128 varreduras.

A análise granulométrica dos materiais foi realizada pelo método de difração à laser. A finura do caulim e metacaulinita foram verificadas conforme a NBR 6502:2022 e a classificação dos agregados conforme a NBR 9935:2024. As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais Metálicos (LAMAM) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Essas análises foram obtidas pelo método de difração de raios laser a seco, com um granulômetro modelo *CILAS*TM 1090. A distribuição do material

foi mensurada em uma faixa de tamanho entre 0,04 e 500 μm , dividida em 100 classes.

As morfologias do caulim, da metacaulinita e dos agregados foram observadas nas análises de MEV, e auxiliar no entendimento das interações entre os agregados e a matriz. As análises foram realizadas no Centro Multiusuário para Análise em Fenômenos Biomédicos (CMABio-UEA). As amostras foram submetidas a metalização para posterior observação no analisador JEOL™ JSM IT500 HR nas escalas de 10 μm , 50 μm e 200 μm .

Em todas as análises do caulim e da metacaulinita, as amostras foram peneiradas na peneira *Tyler* #200 com malha de 0,075 mm, nas mesmas condições de preparo para o uso nas argamassas.

3.2.3 Dosagem das argamassas geopoliméricas

Para a dosagens das argamassas, foi necessária a determinação da densidade aparente da areia por meio das equações 01 e 02 conforme a NBR 16916:2021. A densidade do resíduo plástico ($\rho = 0,94 \text{ g/cm}^3$) foi adotada do estudo de Soares *et al.* (2022). As diferenças de densidade entre o PEBD e a areia foram consideradas para a substituição da areia pelo resíduo, e foi aplicada a equação 03.

$$\rho_{ar} = \frac{m}{V - V_a} \quad \text{Equação (01)}$$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad \text{Equação (02)}$$

$$M_{PEBD} = \left(\frac{m}{\rho_{ar}} \right) \times \rho_{PEBD} \quad \text{Equação (03)}$$

onde:

ρ_{ar} - densidade aparente da areia, em (g/cm^3);

m - massa da areia seca em estufa, em (g);

V - volume do frasco, em (cm^3);

V_a - volume de água, adicionada ao frasco, em (cm^3);

m_1 - massa do conjunto (frasco + agregado), em (g);

m_2 - massa total (frasco + agregado + água), em (g);

ρ_a - densidade da água, em (g/cm^3).

M_{PEBD} – Massa do resíduo plástico, em (g);

ρ_{PEBD} – Densidade do resíduo plástico (g/cm^3).

A dosagem dos ativadores alcalinos foi baseada no estudo de Soares (2022), sendo determinado os teores de $\text{NaOH} = 30 \text{ g/mol}$, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 40 \text{ g/mol}$, metacaulinita

= 100 g, razão água/metacaulinita = 0,6 e razão metacaulinita/agregado = 1/1.

A Tabela 2 apresenta as dosagens dos materiais para o preparo das argamassas geopoliméricas.

Tabela 2 – Dosagens dos materiais para a produção das argamassas geopoliméricas

Argamassa	Metacaulinita (g)	Filler de areia (g)	Resíduo de PEBD (g)	Água (g)	Ativador alcalino composto	
					NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)
GMK-W ₀	100	100	0,0	18	30	40
GMK-W ₂₅	100	75	9,0	18	30	40
GMK-W ₅₀	100	50	18,1	18	30	40
GMK-W ₇₅	100	25	27,1	18	30	40
GMK-W ₁₀₀	100	0	36,2	18	30	40

Fonte: Adaptado de Soares *et al.* (2022)

onde:

GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀ correspondem as argamassas geopoliméricas com 0, 25, 50, 75 e 100% de resíduo de PEBD, respectivamente;

3.2.4 Produção das argamassas geopoliméricas

A sequência do preparo manual das argamassas é mostrada na Figura 11. Os agregados e a metacaulinita foram pesados em balança Tecnal® com capacidade de 1 kg e precisão de 0.01 g. Os agregados foram misturados manualmente, depois juntados à metacaulinita e misturados por 3 min. Em seguida foi adicionado o ativador alcalino (Figura 11a) e por último a água. Todos os componentes foram misturados por mais 1 min e as Figuras 11b e 11c mostram a textura inicial e final da mistura manual.

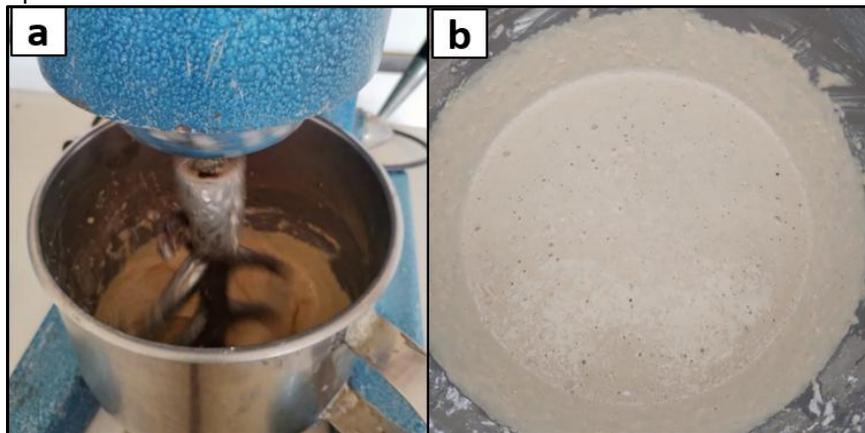
Figura 11 – Preparo manual da argamassa: (a) adição do ativador à mistura seca; (b) aspecto inicial da mistura; (c) aspecto final da mistura



Fonte: Autoria própria (2023)

O procedimento manual foi seguido do mecanizado, no misturador mecânico de argamassas da MATEST® E 094X, operado com velocidade inicial de 140 rpm por 3 min para uniformizar a mistura (Figura 12a). Em seguida, a velocidade foi aumentada para 285 rpm por mais 3 min permitindo uma argamassa mais homogênea (Figura 12b). A produção das argamassas foi realizada no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da FT/UFAM, e adaptadas do método descrito por (Longhi *et al.*, 2020).

Figura 12 - (a) argamassa no misturador mecânico; (b) argamassa fresca após a mistura.



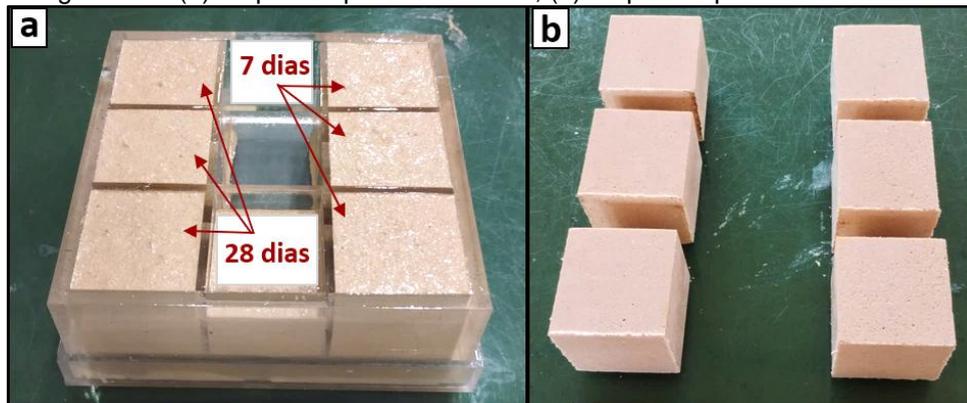
Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.5 Moldagem dos corpos de prova para a caracterização das argamassas e chapas cimentícias

A moldagem dos corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão se baseou na norma ASTM C109/C109M:2023. Usou-se um molde de acrílico com fundo e paredes removíveis, dividido em cavidades cúbicas com dimensões de 5 cm. A base do molde foi coberta por filme plástico e as cavidades foram pinceladas com desmoldante para facilitar a retirada dos corpos após a cura de 24 h. Inicialmente uma camada de argamassa de 2,5 cm foi despejada até a metade das cavidades e adensada com 32 golpes seguidos. Em seguida, a camada final foi despejada, repetindo-se o adensamento.

Ao todo, foram moldados seis corpos de prova, três para rompimento aos 7 dias e três aos 28 dias de cura (Figura 13a). Após 24 h de cura, os corpos foram desmoldados (Figura 13b), envolvidos em filme plástico e identificados quanto ao tempo de cura.

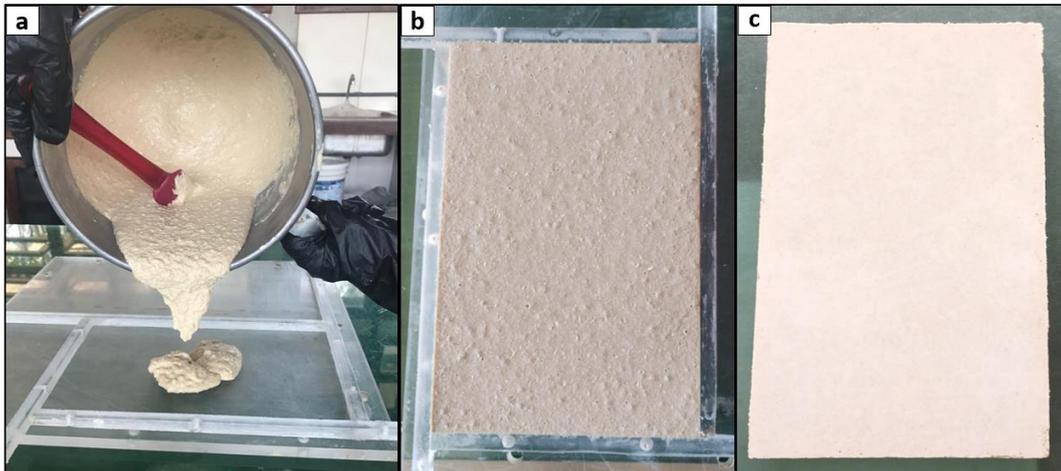
Figura 13 – (a) corpos de prova moldados; (b) corpos de prova desmoldados



Fonte: Autoria própria (2024)

A moldagem das chapas cimentícias foi baseada na NBR 15498:2021. A Figura 14(a) mostra a argamassa sendo despejada em um molde de acrílico com dimensões (16 x 25 x 1) cm, adensada com 20 golpes e permaneceu em temperatura ambiente por 24 h, como mostrado na Figura 14(b). Neste procedimento não houve o uso de desmoldante. A Figura 14(c) mostra a chapa desmoldada após 24 h e envolvida em filme plástico para a preservação da umidade durante a cura de 28 dias. No total, foram produzidas cinco chapas, uma para cada teor de resíduo plástico.

Figura 14 – (a) moldagem da chapa; (b) chapa moldada fresca (verso); (c) chapa desmoldada após 24 h (frente).



Fonte: Autoria própria (2023)

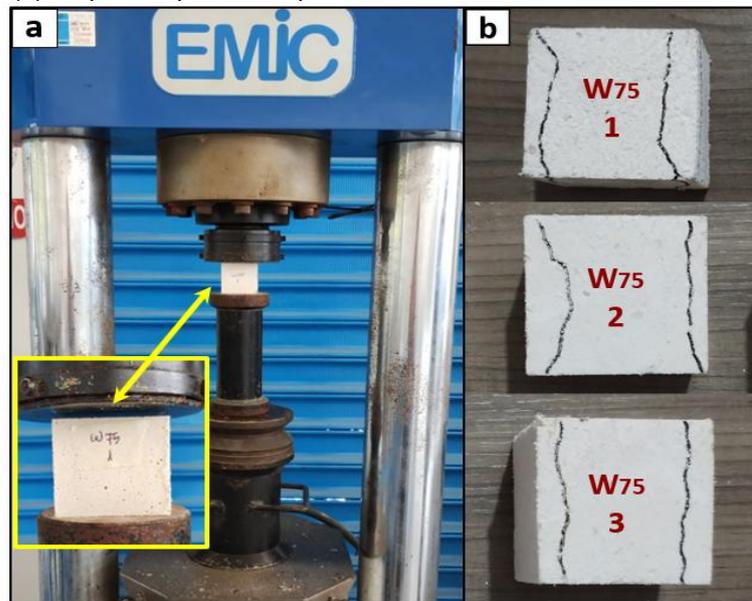
3.2.6 Caracterização das argamassas

As argamassas foram caracterizadas quanto ao ensaio de resistência à compressão e análises de FRX, TGA, DRX, FTIR e a microscopia eletrônica de varredura com a tecnologia do Feixe Eletrônico por Emissão de Campo acompanhado

pela Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV-FEG/EDS).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado para verificar o efeito da substituição da areia pelo resíduo de PEBD nas argamassas. Para isso adotou-se a norma ASTM C109/C109M:2023. O rompimento dos corpos de prova foi feito no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Konkrex Engenharia de Concreto Ltda, na Máquina Universal de Ensaio INSTRON™ EMIC AC6.08 com célula de carga de 200 t, como mostra a Figura 15(a) com o corpo de prova posicionado para o rompimento e a Figura 15(b) com os corpos de prova rompidos.

Figura 15 – (a) corpo de prova na máquina para rompimento; (b) corpos de prova rompidos.



Fonte: Autoria própria (2024)

Após o rompimento dos corpos, a resistência à compressão das argamassas foi determinada pela equação 04.

$$\delta = \frac{F}{A} \quad \text{Equação (04)}$$

onde:

δ - tensão, em (MPa);

F - força, em (N);

A – área, em (mm²).

As amostras para as análises químicas e morfológicas foram retiradas da região central dos corpos de prova curados aos 28 dias. Para as análise por FRX, TGA, DRX e FTIR, as amostras foram trituradas em moinho de bolas e peneiradas em peneira # 100, resultando em partículas menores que 0,150 mm. Exceto as análise de TGA e

MEV, todas as demais análises citadas foram realizadas nos mesmos laboratórios, equipamentos e condições de análise do caulim e da metacaulinita.

As análises das composições químicas das argamassas foram realizadas por FRX, especialmente para verificar a presença e a variação do teor de aluminossilicatos quando da substituição da areia pelo resíduo de PEBD.

As análises por TGA serviram para verificar a estabilidade térmica das argamassas. As análises foram realizadas no Laboratório SisNANO/LSCN/ IFAM no Analisador Shimadzu™ TGA-50H. A taxa de aquecimento foi 20 °C/min, de 25 °C até 1000 °C, em atmosfera inerte com fluxo de gás Nitrogênio 5.0.

As análises por DRX foram utilizadas para identificar as fases e possíveis alterações cristalográficas nas argamassas à medida que a areia foi substituída pelo resíduo plástico.

As análises por FTIR foram realizadas para identificar grupos funcionais e mudanças químicas associadas à presença do resíduo plástico nas argamassas.

Para a análise de MEV-FEG/EDS realizada no LIME/UFRN, os corpos foram envolvidos em filme plástico, e as amostras rochosas foram extraídas por fraturas com alicate universal de 200 mm. A morfologia da superfície foi analisada usando um Microscópio Eletrônico de Varredura de Alta Resolução com emissão de campo (MEV-FEG) – Fabricante Carl ZEISS™, modelo Auriga 40, operando a 5,0 kV com filamento de tungstênio. Antes das análises MEV-FEG, todas as amostras foram revestidas com uma fina camada de ouro por 60 s em um Sputter Coater BAL-TEC SCD 005 usando atmosfera de argônio sob vácuo, para evitar carregar a amostra durante a varredura. De forma complementar, e acoplado ao MEV-FEG foi utilizado o Detector de Energia Dispersiva (EDS), Fabricante Bruker, Modelo Xflash Detector 410-M para a identificação composicional observadas na morfologia de cada amostra.

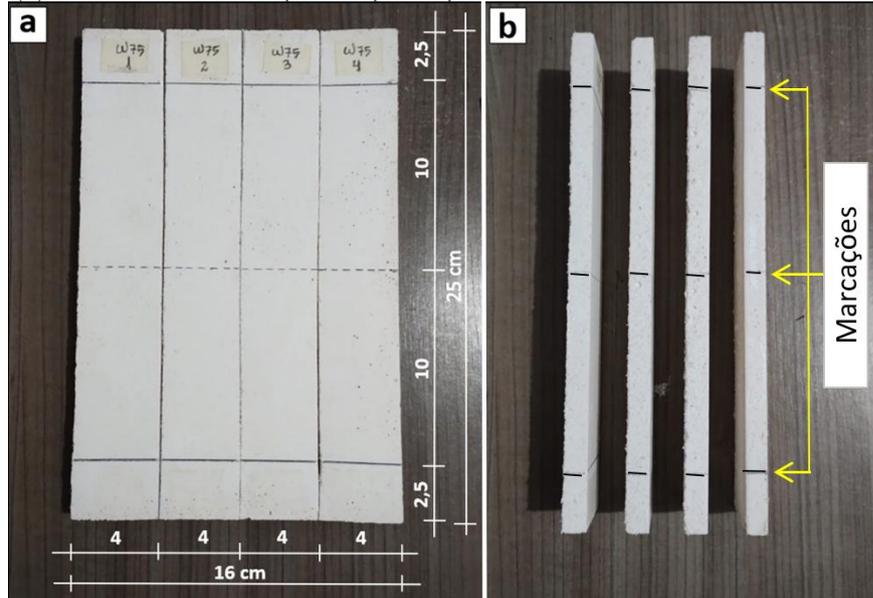
3.2.7 Caracterização das chapas cimentícias

As chapas cimentícias foram caracterizadas quanto ao ensaio de resistência à tração na flexão, densidade aparente, absorção de água, porosidade.

O ensaio de tração na flexão em três pontos foi realizado para avaliar as tensões de resistência à flexão em estado seco e como requisito de aceitação e classificação da NBR 15498:2021. Cada chapa foi dividida em quatro partes com

dimensões (4 x 25 x 1) cm (Figura 16a) com uma serra mármore Makita® com disco diamantado para cerâmica. Após os cortes, cada corpo de prova foi marcado em três pontos (eixo central e à 2,5 cm das bordas) (Figura 16b). O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC–FT/UFAM), na Máquina de Ensaio Oswaldo Filizola® AME-5kN com velocidade de 0,5 mm/min.

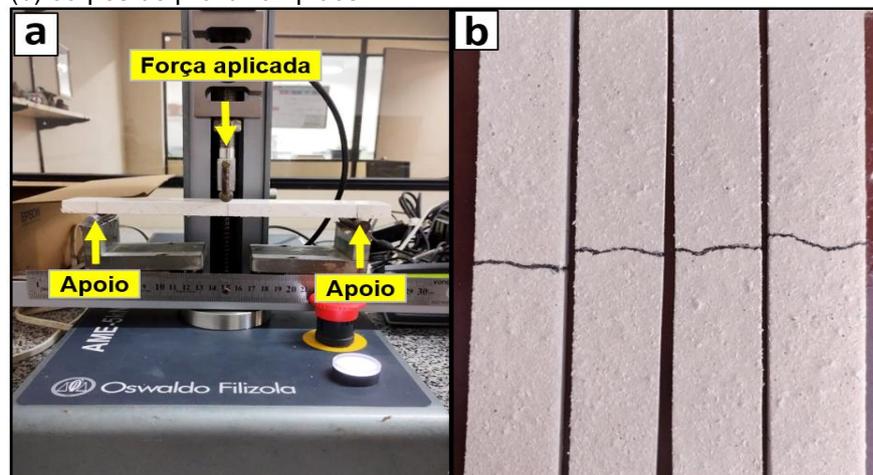
Figura 16 – (a) marcação da chapa para o ensaio de tração na flexão; (b) vista lateral dos corpos de prova para o ensaio.



Fonte: Autoria própria (2024)

Durante o ensaio, cada corpo de prova foi submetido a uma carga concentrada constante no eixo central, refletida nos pontos de apoios demarcados causando deflexão até o rompimento, como mostrado nas Figuras 17(a) e 17(b).

Figura 17 - (a) corpo de prova submetido ao ensaio de tração na flexão; (b) corpos de prova rompidos.



Fonte: Autoria própria (2023)

A resistência à tração na flexão, foi calculada com a equação 05, retirando-se a média aritmética entre os quatro corpos de prova.

$$R_f = \frac{3P_{\max} \times L}{2b \times e^2} \quad \text{Equação (05)}$$

onde:

R_f - resistência à tração na flexão, em (MPa);

P_{max} - carga de ruptura por flexão, em (N);

L - distância entre os eixos do suporte, em (mm);

b - largura do corpo de prova, em (mm);

e - espessura média do corpo de prova (média das medidas), em (mm).

O ensaio de densidade aparente foi feito para avaliar a compacidade das chapas, ou seja, a eficiência com que os materiais foram distribuídos para minimizar a presença de poros na mistura cimentícia, e como requisito facultativo de aceitação da NBR 15498:2021. Os ensaios de absorção de água e porosidade serviram para avaliar a resistência à umidade e suas relações com a resistência mecânica das chapas cimentícias. São recomendados pela norma citada como métodos de avaliação da *performance* das chapas.

Para a execução dos ensaios os corpos de prova foram retirados da borda externa dos corpos fraturados no ensaio de tração na flexão. Quatro corpos de prova com dimensões (4 x 5 x 1) cm de cada chapa, foram secos em estufa à 110 °C por 24 h. Após 1 h de resfriamento, os corpos foram pesados em balança Tecnal®. Em seguida, esses corpos foram saturados em água por 24 h e a massa saturada (m_{sat}) de cada um foi medida na mesma balança. Após esse procedimento, as massas imersas dos corpos foram medidas em balança hidrostática VEB GERÄTEWERK™ com pressão nominal até 50 MPa.

Para a determinação de cada variável foi considerada a média entre os quatro valores dos corpos de prova de cada chapa. A densidade aparente foi calculada por meio da equação 06, a absorção de água foi determinada pela equação 07, o índice de vazios (I_v) necessário ao cálculo da porosidade foi calculado com a equação 08 e a porosidade determinada pela equação 09.

$$\rho_{ap} = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação (06)}$$

$$Abs = \frac{(m_{sat} - m_s)}{m_s} \times 100 \quad \text{Equação (07)}$$

$$lv = \frac{(m_{sat} - m_s)}{(m_{sat} - m_i)} \quad \text{Equação (08)}$$

$$P = \left[\frac{lv}{(lv + 1)} \right] \times 100 \quad \text{Equação (09)}$$

onde:

ρ_{ap} – densidade aparente, em (g/cm³);

m_s - massa seca em estufa da argamassa, em (g);

m_{sat} - massa saturada da argamassa, em (g);

m_i - massa imersa da argamassa, em (g);

Abs - absorção de água da argamassa, em (%);

lv - índice de vazios, em (valor absoluto);

P - porosidade da argamassa, em (%).

3.2.8 Análises estatísticas da resistência mecânica das argamassas e chapas cimentícias

Para avaliar estatisticamente a influência da substituição da areia por resíduo na resistência à compressão das argamassas, foi realizada a ANOVA com nível de significância de 5%. A resistência foi a variável resposta para determinar o melhor teor de substituição, considerando o percentual de resíduo como fator único e as formulações das argamassa como níveis. Essa análise foi utilizada para avaliar a influência dos teores de resíduo plástico nas argamassas, considerando a hipótese nula (H_0), que pressupõe a equivalência das médias, e a hipótese alternativa (H_1), que indica pelo menos uma diferença entre elas. Quando a ANOVA aponta significância estatística, aplica-se o Teste de Tukey para identificar o teor que resulta na melhor resistência à compressão. A rejeição de H_0 ocorre se a diferença média significativa (d.m.s.) for menor que a média entre os grupos, indicando distinção estatística entre as médias. Para a aplicação da ANOVA e o Teste de Tukey foi utilizado o software Minitab® 19.

A ANOVA e o Teste de Tukey para a resistência à flexão das chapas foram conduzidos da mesma forma que a análise para a resistência à compressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Composição química por FRX

A Tabela 3 apresenta a composição química por FRX dos materiais.

Tabela 3 – Composição química dos materiais: caulim, metacaulinita e *filler* de areia

COMPOSTO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Outros
Caulim (%)	55,54	39,88	0,39	0,66	0,14	1,26	1,87	0,26
Metacaulinita (%)	54,20	41,48	0,36	0,65	0,13	1,19	1,80	0,19
<i>Filler</i> de areia (%)	97,38	1,36	0,44	0,33	0,18	outros	outros	0,31

Fonte: Autoria própria (2024)

onde:

SiO₂ – Dióxido de Silício (Quartzo);

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio (Alumina);

P₂O₅ – Pentóxido de Fósforo;

K₂O – Óxido de Potássio;

CaO – Óxido de Cálcio;

TiO₂ – Dióxido de Titânio;

Fe₂O₃ – Óxido de Ferro III (Hematita)

A análise química apresentada na Tabela 3 revelou que o caulim e a metacaulinita contêm 95,42% e 95,68% de aluminossilicatos, respectivamente. Este resultado está alinhado com Longhi *et al.* (2022), que recomenda a utilização de caulins com 92% ou mais de aluminossilicatos para calcinação da metacaulinita e produção de geopolímeros.

Na metacaulinita, a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ atingiu 97,48%, superando o requisito mínimo de 70% estabelecido pela norma para materiais pozolânicos NBR 12653:2014. Esse resultado confirma a natureza pozolânica do material, evidenciando seu potencial para aplicações em geopolímeros.

O *filler* de areia apresentou predominância de SiO₂ em sua composição e não apresentou impurezas ou contaminantes que pudessem comprometer a reatividade das argamassas. Essas características são essenciais para a eficiência e a qualidade dos produtos geopoliméricos.

Adicionalmente, o PEBD é um composto formado pela polimerização do Etileno (C₂H₄). É um polímero com ramificações de comprimentos variáveis, desde as

butílicas curtas (CH₃) até as butílicas longas (-CH₂-CH₂-CH₂-CH₃) com os grupos Metileno (CH₂) e o grupo Metil (CH₃) ao final da cadeia, conforme (Poh *et al.*, 2022).

Os percentuais dos aluminossilicatos e a massa molar dos elementos disponíveis na literatura foram utilizados para o cálculo estequiométrico dos compostos químicos, a fim de verificar as razões molares ($3,3 \leq \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 4,5$) e ($10 \leq \text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} \leq 25$) recomendadas por Davidovits *et al.* (1994).

Neste estudo, a razão SiO₂/Al₂O₃ foi 3,46 indicando uma proporção equilibrada entre Si e Al, essencial para a formação de uma rede tridimensional estável e sugerindo que a proporção entre os compostos foi adequada para promover uma geopolimerização eficiente.

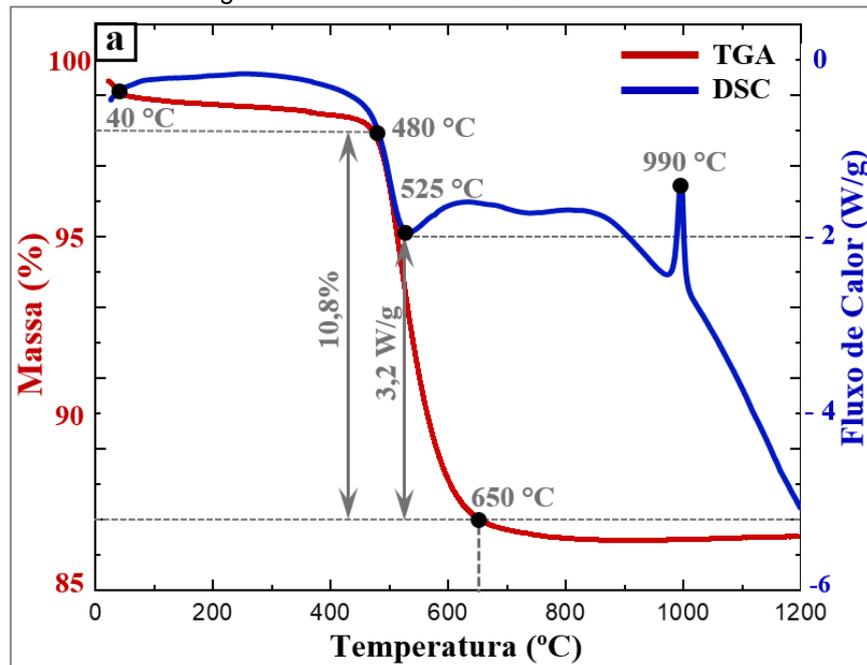
A razão H₂O/Na₂O obtida de 14,5 também ficou no intervalo recomendado por Davidovits *et al.* (1994), indicando que a quantidade de água foi ajustada adequadamente em relação ao Na₂O. Visto que essa razão influencia a reatividade da matriz, afetando tanto a velocidade de reação de geopolimerização quanto a resistência mecânica da argamassa geopolimérica, o equilíbrio entre a água e os ativadores alcalinos é fundamental na formação dos geopolímeros e ajuda a evitar o excesso de porosidade na matriz, de acordo com (Gopalakrishna; Dinakar, 2024).

Portanto, as razões molares obtidas mostram que a dosagem adotada atuou nas características das argamassas e chapas, conferindo a estabilidade da rede tridimensional e na reatividade necessária para a formação dos geopolímeros.

4.1.2 Análise térmica por TGA/DSC

A Figura 18 mostra as curvas de TGA e DSC do caulim e a Figura 19 as curvas da metacaulinita.

Figura 18 - Curvas TGA e DSC do caulim

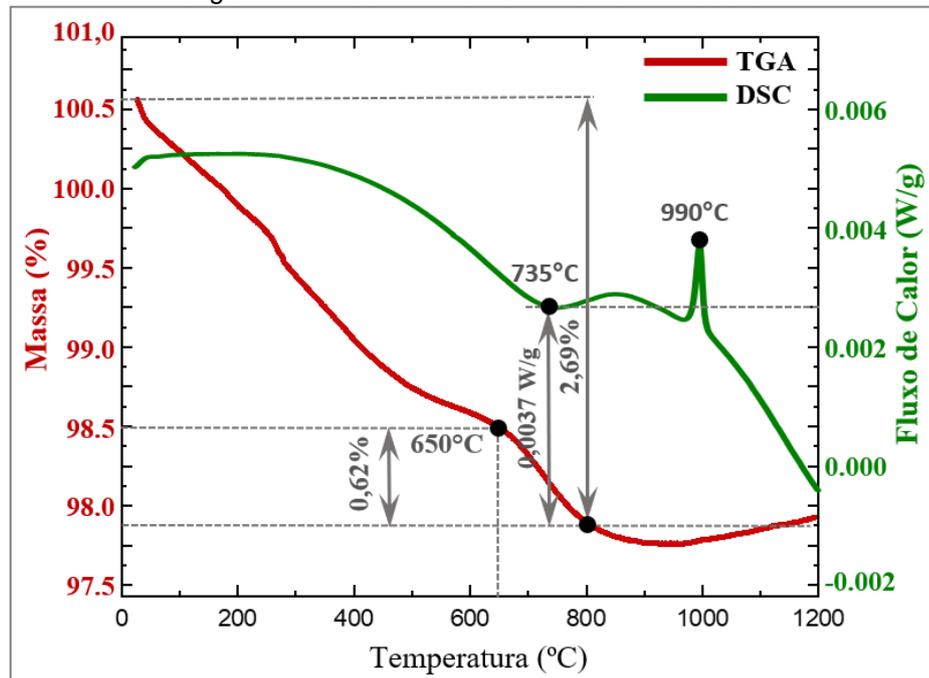


Fonte: Autoria própria (2024)

Na curva TGA da Figura 18, a perda de massa do caulim até 650 °C revela duas fases distintas: primeiro, a perda de massa inicial de 0,38% a 40 °C, correspondente à eliminação da água adsorvida na superfície da amostra; depois, entre 480 °C e 650 °C a perda de massa representa o início e o fim do processo de desidroxilação. Durante esse intervalo, a perda de massa foi 11%. Esse resultado tem similaridade com Soares *et al.* (2022) e de acordo com Longhi *et al.* (2020) como a desidroxilação é influenciada pela taxa de aquecimento na calcinação, é essencial conhecer o intervalo de temperatura do evento para a compreensão dos processos envolvidos.

Na curva DSC, o pico endotérmico em 480 °C, indica a absorção de calor e corresponde à desidroxilação da caulinita, com perda dos grupos hidroxila e início da transformação estrutural. O destaque ocorre no segundo pico, em 525 °C onde há uma absorção mais expressiva de calor de 3,2 W/g que promove a conversão do caulim em metacaulinita, similar a Caballero *et al.* (2019). Em 990 °C, ocorreu um pico exotérmico com liberação de calor, que indica a recristalização e a possível formação de mulita que pode melhorar a resistência mecânica, especialmente em aplicações de alta temperatura, contribuindo para geopolímeros mais duráveis em ambientes extremos devido à resistência ao choque térmico, e favorecendo o uso de geopolímeros em aplicações refratárias, pois em termos de condutividade térmica reduz a transferência de calor, segundo (Bezerra; Luz, 2024).

Figura 19 - Curvas TGA e DSC da metacaulinita



Fonte: Autoria própria (2024)

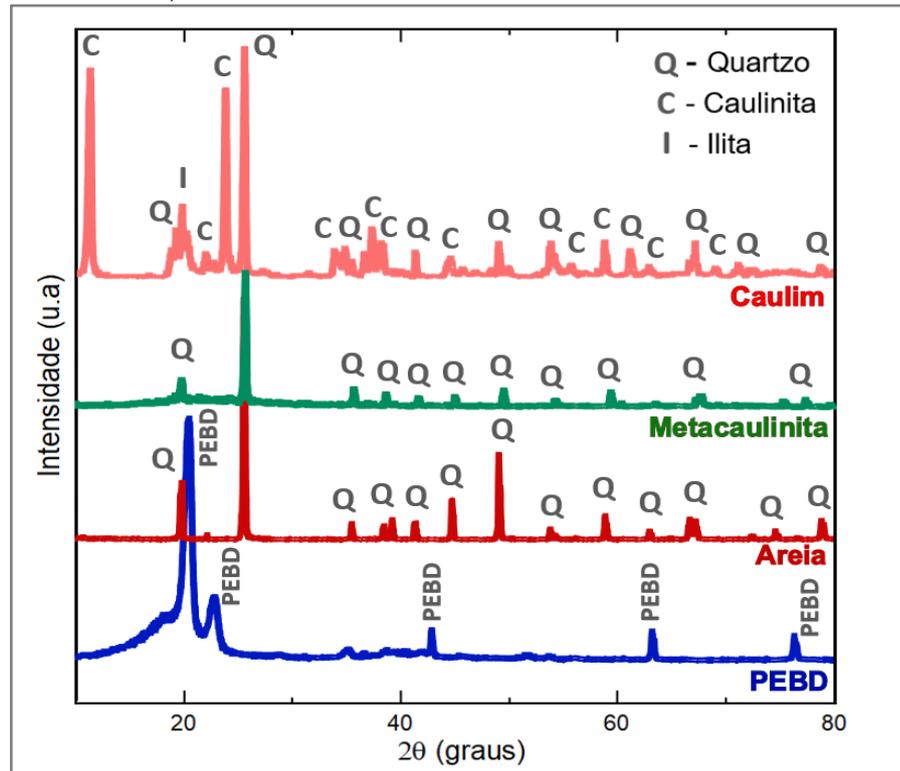
A curva TGA da metacaulinita da Figura 19 revelou uma perda contínua de massa de 2,69% de 30 a 800 °C e no intervalo entre 650 e 800 °C a perda de 0,62% indica a desidroxilação das partículas remanescentes do caulim. Essas perdas de massa também foram observadas por Caballero *et al.* (2019) e Longhi *et al.* (2019) com amostras de metacaulinita a 700 °C e 750 °C respectivamente, indicando que traços remanescentes de caulim podem se manifestar em diferentes temperaturas de calcinação.

A análise da curva DSC revelou que o primeiro pico endotérmico ocorreu a 650 °C, com uma absorção de calor possivelmente associada à reorganização da estrutura amorfa da metacaulinita. Em 735 °C, observou-se um pico exotérmico com fluxo de calor de 0,0037 W/g indicando uma significativa liberação de calor que influenciou a estrutura final da metacaulinita com a formação de novas fases cristalinas que podem potencializar o seu desempenho. O pico exotérmico em 990°C mostra um evento de liberação de calor associado à recristalização e formação de fases estáveis, possivelmente a mulita, fase cristalina de alta estabilidade térmica e mecânica, de acordo com (Bezerra; Luz, 2024). O registro desses eventos são importantes para auxiliar no ajuste dos parâmetros de calcinação do caulim e na otimização do desempenho da metacaulinita na dosagem de geopolímeros.

4.1.3 Análise mineralógica por DRX

A Figura 20 mostra os difratogramas dos materiais. Os minerais estão catalogados no *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD).

Figura 20 – Difratogramas das análises por DRX dos materiais: caulim, metacaulinita, *filler* de areia e PEBD.



Fonte: Autoria própria (2025)

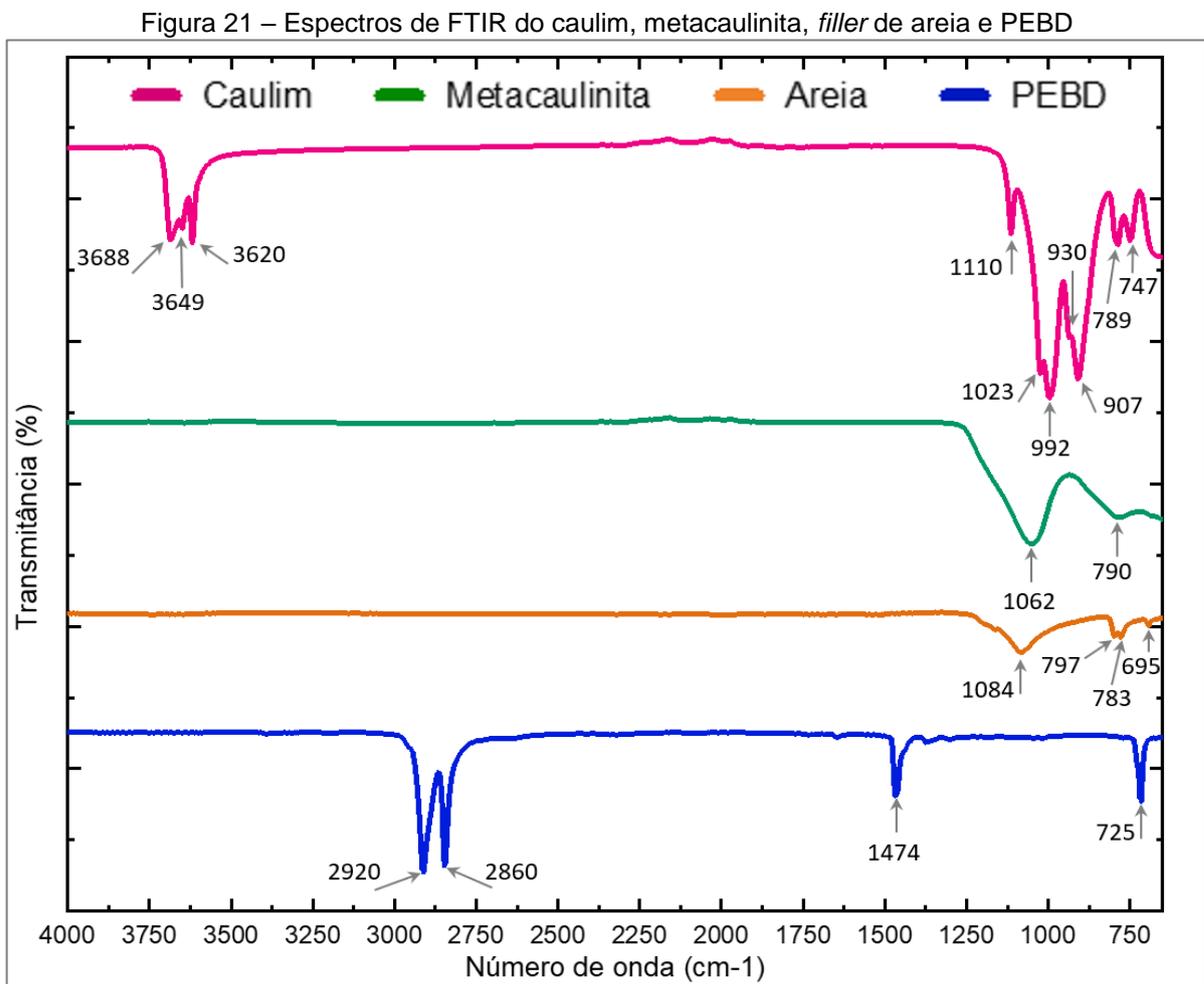
A ocorrência dos picos de cristalinidade do caulim observados na Figura 20 se devem aos aluminossilicatos contidos na caulinita $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$ - ICSD 63192 e aparecem no intervalo de 10° a 70° 2θ , da Ilita $[KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2]$ - ICSD 90144 que apresenta um pico característico a 19° 2θ , e do quartzo (SiO_2) – ICSD 16331. Após a calcinação e a formação do quartzo (SiO_2), observou-se na metacaulinita a redução desses picos, evidenciando a transição do estado cristalino para o amorfo, resultado também verificado por (Andrade, 2019; Atienza *et al.*, 2023; Moya *et al.*, 2024).

A predominância do quartzo no *filler* de areia se deve a abundância, durabilidade e alta dureza desse mineral, segundo Carasek *et al.* (2016). Esse composto também foi confirmado na análise por FRX (Tabela 3).

A cristalinidade observada no difratograma do PEBD está relacionada ao grau de ramificação ($\text{CH}_3/1000\text{C}$) das cadeias poliméricas, tanto longas quanto curtas. Conforme a literatura, o PEBD apresenta um maior grau de ramificação, e isso resulta na menor cristalinidade devido à interrupção do empacotamento regular das cadeias poliméricas (Poh *et al.*, 2022).

4.1.4 Análise de espectroscopia por FTIR

A Figura 21 mostra os espectros de FTIR dos materiais e a Tabela 4 apresenta as principais bandas e grupos funcionais desses materiais.



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 4 – Identificação das bandas e grupos funcionais dos espectros de FTIR do caulim, do *filler* de areia e do resíduo de PEBD.

CAULIM	
Posição da banda (cm⁻¹)	Atribuição
3688	Alongamento externo do grupo O-H
3649	Alongamento interno do grupo O-H
3620	Alongamento interno do grupo O-H
1110	Vibração da ligação Si-O
1023	Alongamento de Si-O-Si
992	Deformação da ligação Si-O
930	Deformação interna de O-H
907	Deformação interna de O-H
789	Alongamento de Si-O-Si
747	Deformação da ligação Si-O-Al
FILLER DE AREIA	
Posição da banda (cm⁻¹)	Atribuição
1084	Alongamento simétrico de Si-O-Si
797	Alongamento assimétrico de Si-O
783	Alongamento simétrico de Si-O
695	Flexão simétrica Si-O-Si
PEBD	
2920	Alongamento assimétrico de C-H
2860	Alongamento simétrico de C-H
1474	Deformação de flexão de C-H
725	Flexão C-H

Fonte: Autoria própria (2025)

Os principais picos das bandas no FTIR do caulim, foram: em 3688 cm⁻¹ com alongamento do grupo O-H, referente ao grupo hidroxilas na superfície da caulinita, 3649 e 3620 cm⁻¹ com alongamento dos grupos O-H na superfície interna no plano entre as folhas tetraédricas e octaédricas da caulinita. O pico em 1110 cm⁻¹ está associado à ligação Si-O, enquanto o pico em 1023 cm⁻¹ corresponde ao alongamento simétrico Si-O-Si, característico da estrutura cristalina da caulinita. O pico em 992 cm⁻¹ está relacionado à deformação da ligação Si-O. O pico em 930 está associado à deformação do grupo hidroxila na superfície interna da estrutura. O pico em 907 cm⁻¹ indica a deformação angular O-H do Al-OH na folha octaédrica das ligações O-H. O pico em 789 cm⁻¹ é referente ao alongamento e flexão Si-O-Si, e indica a presença de quartzo na estrutura. Por fim, o pico em 747 cm⁻¹ está associado à deformação Si-O-

Al, relacionados a presença de silício e alumínio, que contribuem para a estabilidade estrutural do caulim. Esses picos são similares aos apresentados no estudo dos caulins amazônicos de (Maruoka *et al.*, 2023).

A estabilidade do caulim exerce uma influência determinante na formação e no desempenho dos geopolímeros. Durante a ativação alcalina, a estabilidade estrutural da metacaulinita (proveniente do caulim termicamente modificado) garante a liberação controlada de íons $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$. Isso favorece a formação da rede tridimensional, melhora a coesão e a aderência entre as partículas e conseqüentemente a resistência mecânica dos geopolímeros, segundo (Wang *et al.*, 2021).

O espectro da metacaulinita mostra a ausência de vibrações O-H em 3688, 3649 e 3620 cm^{-1} sugerindo a perda de hidroxilas e a transição para uma estrutura amorfa. Porém, o difratograma da metacaulinita (Figura 20) ainda revelou picos no caulim, possivelmente não detectados pelo FTIR devido à sua baixa concentração. Os picos das bandas em 1110, 1023 e 992 cm^{-1} se dissiparam devido à calcinação, formando uma banda ampla em 1062 cm^{-1} , atribuída à presença de sílica amorfa. Além disso, os picos em 930 e 907, relacionados ao grupo O-H, desapareceram, indicando a remoção dos grupos hidroxila e se fundiram com picos 789 e 747 cm^{-1} , na transição para uma estrutura amorfa. A calcinação também fez surgir um pico em 790 cm^{-1} , associado ao alongamento e flexão do Si-O-Si. Esse comportamento sugere que a sílica tetraédrica permaneceu inalterada, o que é confirmado pela análise de DRX e está de acordo com os estudos de (Elgubbi; Othman; Harun, 2021; Maruoka *et al.*, 2023).

As principais bandas e grupos funcionais revelados no espectro do *filler* de areia, foram: os picos em 1084 e 695 cm^{-1} foram atribuídos às vibrações simétricas da ligação Si-O-Si. Os picos em 797 e 783 cm^{-1} estão associados ao alongamento assimétrica e simétrica da ligação Si-O respectivamente, de acordo com Hackem *et al.* (2023). Esses grupos funcionais demonstram que o SiO_2 é o principal componente do *filler* de areia. Isso foi confirmado pela análise por FRX (Tabela 3) e pelo difratograma do *filler* (Figura 20).

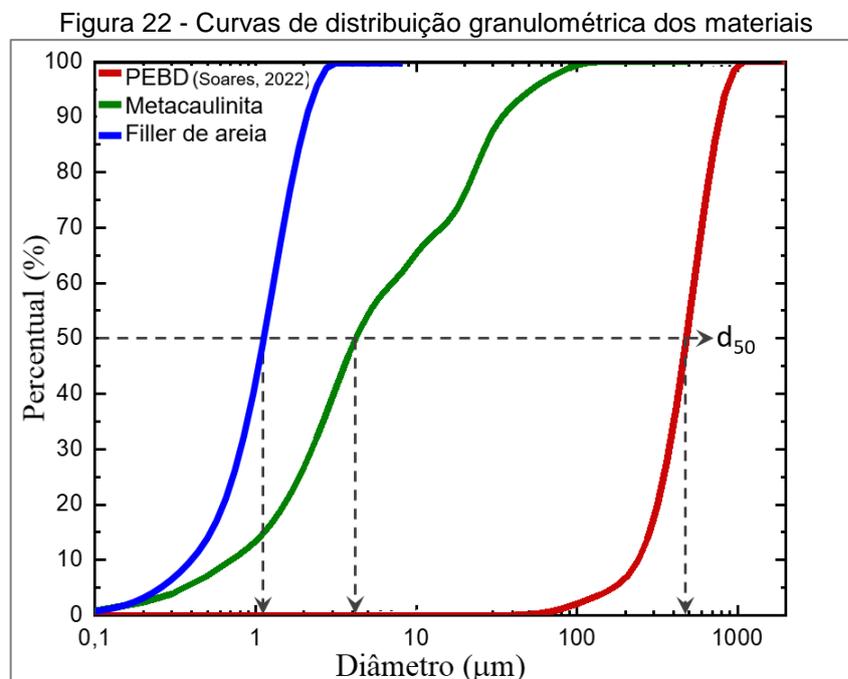
O espectro de FTIR do PEBD indica que os picos das bandas em 2920 e 2860 cm^{-1} estão relacionados ao alongamento assimétrico e simétrico da ligação C-H dos hidrocarbonetos que compõem esse material. O pico em 1474 cm^{-1} indica a deformação de flexão da ligação C-H e a existência de compostos alcanos, como

parafinas, oligômeros e outros característicos desse termoplástico. O pico em 725 cm^{-1} é referente à flexão C-H e a presença de compostos olefínicos como o etileno (C_2H_4). Todos esses picos são característicos do grupo metileno (CH_2), predominantes no PEBD, segundo (Tang *et al.*, 2022).

A análise de FTIR do PEBD foi fundamental para avaliar sua compatibilidade com os demais materiais utilizados na produção de argamassas e chapas cimentícias, pois ao compreender sua estrutura química, é possível prever sua interação com a matriz geopolimérica, seu efeito nas propriedades mecânicas e sua influência na durabilidade dos materiais finais. Assim, a espectroscopia dos materiais não apenas confirma sua composição, mas também pode auxiliar nas decisões relativas a formulação dos geopolímeros, podendo auxiliar na estabilidade e no melhor desempenho dos produtos desenvolvidos.

4.1.5 Análise granulométrica por difração à laser

A Figura 22 apresenta as curvas de distribuição de tamanho de partículas dos materiais obtidas pela análise granulométrica à laser.



A curva granulométrica da metacaulinita indicou que seu diâmetro médio (d_{50}) ficou em $4,2\ \mu\text{m}$ e 95% do seu volume total ficou no limite de $50\ \mu\text{m}$, sendo classificada

como argilomineral fino pela NBR 6502:2022. Como material precursor de geopolímeros isso representa um benefício, pois a maior área superficial das partículas finas favorece o aumento da reatividade desse material, particularidade confirmada pela análise de MEV e por Mehsas *et al.* (2021). Este fator, juntamente com o teor de aluminossilicatos de 95,68% (Tabela 3), pode melhorar as propriedades mecânicas dos geopolímeros.

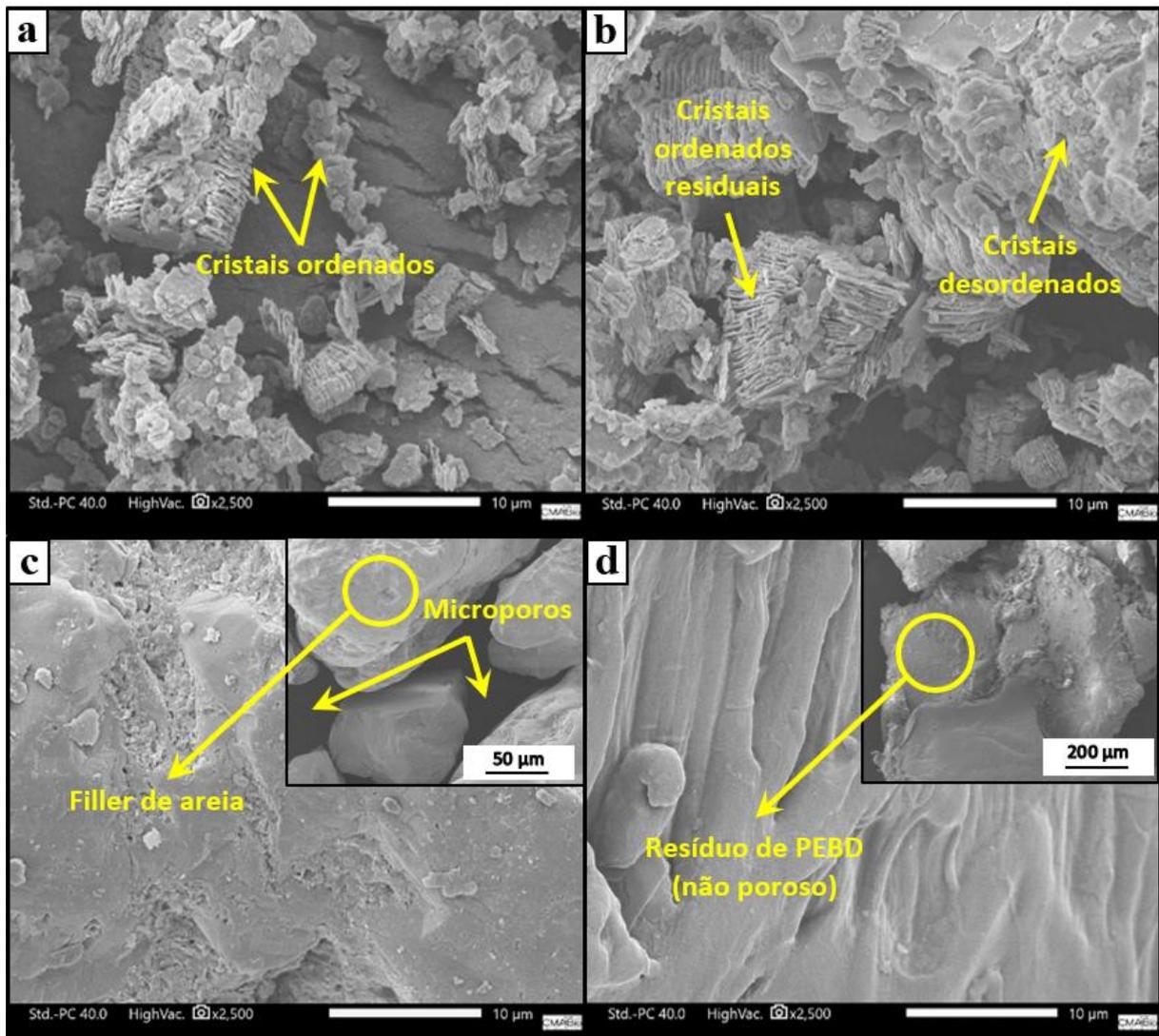
O agregado miúdo natural apresentou uma curva granulométrica com d_{50} de 1,2 μm e volume total de partículas com até 3 μm , sendo classificado como material pulverulento ou *filler de areia* com dimensão inferior a 75 μm , conforme a NBR 9935:2024. Essa classificação granulométrica é uma vantagem, pois o *filler* de areia é utilizado em matrizes geopoliméricas para potencializar as propriedades mecânicas com o preenchimento dos vazios por meio de uma compactação mais eficiente e para maximizar o empacotamento das partículas da matriz geopolimérica atuando na redução da porosidade, de acordo com (Bhina *et al.*, 2023).

O resíduo de PEBD apresentou partículas maiores, com d_{50} de 490 μm e por possuir baixa densidade foi classificado com agregado artificial leve, conforme a NBR 9935:2024. A composição do PEBD pode melhorar a trabalhabilidade, mas também pode aumentar a porosidade e reduzir a resistência mecânicas dos geopolímeros, como indicado (Li, Yingjie *et al.*, 2024).

4.1.6 Análise morfológica por MEV

A Figura 23 apresenta as micrografias de MEV dos materiais nas escalas de 200, 50 e 10 μm .

Figura 23 - Análise por MEV dos materiais: (a) caulim; (b) metacaulinita; (c) *filler* de areia; (d) resíduo de PEBD



Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 23, a análise de MEV revelou que o caulim (Figura 23a) possui cristais de caulinita pseudo-hexagonais com distribuição heterogênea, enquanto a metacaulinita (Figura 23b) apresenta uma estrutura amorfa, mais irregular e menos ordenada com algumas partículas residuais não reagidas. Essa transformação ocorreu devido a desidroxilação durante o processo de calcinação, que removeu as moléculas de água da estrutura cristalina do caulim, tornando-a mais porosa e desordenada. Como resultado, houve o aumento na área superficial da metacaulinita, tornando-a mais reativa e adequada aos processos de ativação e aplicações como material cimentício suplementar, de acordo com (Mehsas *et al.*, 2021).

Na micrografia do *filler* de areia (Figura 23c), a porosidade observada é devida ao formato e tamanho das partículas permite a passagem de água e ar na mistura

cimentícia, influenciando positivamente no empacotamento das partículas da matriz, melhorando a homogeneização e a consistência das argamassas, aspecto confirmado por (Carasek *et al.*, 2016).

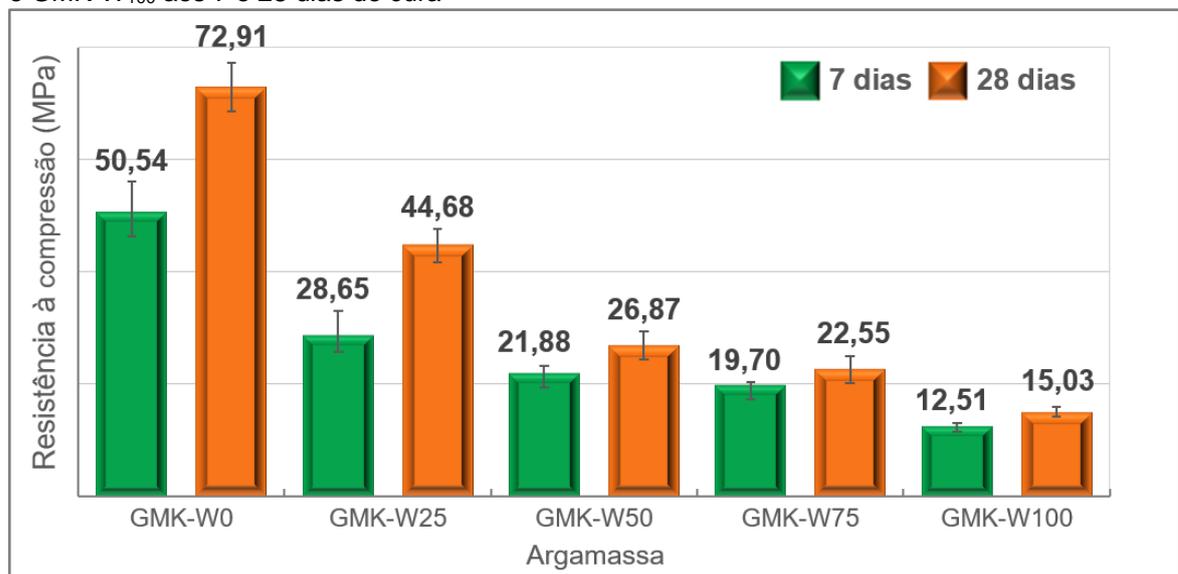
Por outro lado, a micrografia do resíduo (Figura 23d) mostra que o PEBD não é poroso e sua superfície hidrofóbica pode dificultar a dispersão uniforme e resultar em uma distribuição irregular dos materiais na mistura cimentícia com potenciais problemas de adesão e coesão, aspecto comentado por (Tang *et al.*, 2022).

4.2 Caracterização das argamassas

4.2.1 Resistência à compressão

A Figura 24 apresenta os resultados das resistências à compressão das argamassas aos 7 e 28 dias de cura.

Figura 24 – Resistência à compressão das argamassas GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀ aos 7 e 28 dias de cura



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 24 mostra que a resistência à compressão entre 7 e 28 dias aumentou significativamente nas argamassas com 0% e 25% de resíduo de PEBD, alcançando um ganho de 56% na GMK-W₂₅, entre 7 e 28 dias de cura. Em contrapartida, nas argamassas GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀, esse aumento de resistência foi menos pronunciado, variando de 14 a 22%. Nas argamassas contendo resíduo, a resistência variou de 44,68 MPa para 25% de PEBD a 15,03 MPa para 100%,

enquanto a argamassa sem o resíduo plástico alcançou 72,91 MPa, evidenciando a tendência de redução da resistência com o aumento do teor de resíduo.

No caso da GMK-W₀ e GMK-W₂₅, pode-se deduzir que, entre outras variáveis, a eficiência da cura favoreceu as reações químicas e a organização estrutural dessas argamassas, resultando em um desempenho mecânico superior entre 7 e 28 dias. Por outro lado, fatores como a hidrofobicidade do PEBD e o aumento do teor desse resíduo nas argamassas GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀ possivelmente interferiram na formação das estruturas tridimensionais de aluminossilicatos hidratados, responsáveis pela densificação da microestrutura das matrizes geopoliméricas, como afirmam Kim et al. (2024) e Verdolotti *et al.* (2014). Esses resultados indicam que o processo de cura é fundamental para o aprimoramento das propriedades geopoliméricas, maximizando a resistência à compressão ao longo do tempo.

A redução da resistência à compressão durante o período de cura pode estar associada a diversos fatores, como concentração e dosagem dos ativadores alcalinos. Neste estudo, a molaridade do NaOH foi de 12 M e a razão Na₂SiO₃/NaOH foi 1,33. Para alguns autores as concentrações do NaOH abaixo de 10 M e acima de 16 M podem ser ineficientes na síntese do precursor e a formação estrutural dos geopolímeros, como também uma razão Na₂SiO₃/NaOH entre 1,5 e 2 pode favorecer a estrutura geopolimérica, conforme apontam Gopalakrishna e Dinakar (2024), Kang *et al.* (2023) e Shilar *et al.* (2022). A granulometria dos agregados pode afetar tanto a resistência mecânica quanto a porosidade dos produtos geopoliméricos, conforme afirmam Kohout *et al.* (2023) e Bhina *et al.* (2023). As características e propriedades do PEBD também podem influenciar no ganho de resistência durante a cura dos produtos geopoliméricos devido a sua baixa rigidez e interação limitada com a matriz geopolimérica, reduzem a aderência entre as partículas na matriz e comprometem a transmissão de esforços, contribuindo para a redução da resistência à compressão, de acordo com (Tang *et al.*, 2022).

4.2.2 Análise química por FRX

A Tabela 5 apresenta a composição química por FRX, e a Tabela 6 destaca a composição dos aluminossilicatos nas argamassas.

Tabela 5 – Composição química das argamassas GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀.

Composto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	Outros
GMK-W ₀ (%)	80,36	15,08	0,44	0,42	0,18	0,98	1,65	0,60	0,29
GMK-W ₂₅ (%)	78,61	16,41	0,51	0,44	0,20	1,10	1,80	0,67	0,26
GMK-W ₅₀ (%)	74,94	19,33	0,56	0,50	0,24	1,31	2,01	0,81	0,30
GMK-W ₇₅ (%)	71,82	21,28	0,62	0,53	0,29	1,51	2,66	1,00	0,29
GMK-W ₁₀₀ (%)	67,57	25,13	0,65	0,55	0,30	1,62	2,76	1,14	0,28

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 6 – Composição dos aluminossilicatos das argamassas

Elemento	Al	Si
GMK-W ₀ (%)	12.969	78.957
GMK-W ₂₅ (%)	14.165	77.127
GMK-W ₅₀ (%)	16.791	73.185
GMK-W ₇₅ (%)	18.571	69.768
GMK-W ₁₀₀ (%)	22.016	65.602

Fonte: Autoria própria (2025)

As análises por FRX indicaram que, entre os compostos da Tabela 5, os óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Na₂O apresentaram alterações significativas, que se refletiram tanto na estrutura quanto no desempenho mecânico das argamassas (Figura 24). Além da influência do *filler* de areia, com SiO₂, da metacaulinita com SiO₂ e Al₂O₃, os ativadores alcalinos Na₂SiO₃ e NaOH também repercutiram nas alterações químicas nas composições das argamassas que variaram suas razões de SiO₂/Na₂O.

Nas argamassas contendo resíduo de PEBD, a substituição progressiva do *filler* de areia por resíduo de PEBD reduziu a disponibilidade de SiO₂, permanecendo somente as frações de SiO₂ da metacaulinita e do Na₂SiO₃. Por outro lado, enquanto o SiO₂ decresceu o Al₂O₃ e outros compostos aumentaram nas argamassas, limitando a formação do gel NASH, pois a estrutura do gel depende do equilíbrio entre o Si e o Al para formar uma rede tridimensional estável. Isso ocorreu porque o PEBD não participa da reação de geopolimerização por ser um polímero sem estrutura química reativa com Si e Al, conseqüentemente sem capacidade de atuar na formação do gel estruturante nem contribui para o empacotamento das partículas, devido a sua baixa

densidade, hidrofobicidade e ausência de reatividade química, segundo Poh *et al.* (2022) e Tang *et al.* (2022). Como resultado, observa-se uma redução na densidade do material (Figura 30) com uma possível alteração na coesão do gel formado, de forma similar a (El-Tanani *et al.*, 2022).

Como a areia desempenha um papel fundamental na densificação da matriz, sua substituição parcial pelo resíduo plástico pode comprometer a coesão estrutural aumentando a porosidade e afetar outras propriedades físicas e mecânicas das argamassas geopoliméricas, conforme Bhina *et al.* (2023). Dessa forma, a redução do teor de SiO_2 está mais associada à menor quantidade de areia disponível na mistura do que a um efeito direto no empacotamento das partículas.

Outro fator relevante é que a metacaulinita, principal fonte de Al_2O_3 na formulação das argamassas, contém menos SiO_2 que a areia (Tabela 3). Como a quantidade de metacaulinita permaneceu constante enquanto a areia foi reduzida, a disponibilidade da solução alcalina para dissolver a metacaulinita pode ter aumentado, favorecendo a liberação de Al_2O_3 na matriz. Além disso, o teor total de SiO_2 diminuiu devido à substituição do *filler*, mas permaneceu elevado em razão da presença de Na_2SiO_3 no sistema. Outros compostos como o TiO_2 e Fe_2O_3 , provenientes da metacaulinita, tornaram-se mais representativos nas matrizes à medida que o resíduo aumentou. Isso ocorreu porque a redução do *filler* diminuiu a fração de SiO_2 , enquanto a metacaulinita permaneceu constante.

A análise da composição dos aluminossilicatos das argamassas (Tabela 6), constatou que o aumento do teor de resíduo e a redução da fração de areia resultaram na diminuição das razões Si/Al das argamassas em comparação à argamassa de referência GMK-W₀.

A relação Si/Al é um dos principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos geopolímeros, por meio da formação dos gel NASH. Razões mais altas de Si/Al tendem a formar matrizes mais densas e razões mais baixas podem reduzir a resistência mecânica. Neste estudo, verificou-se que a redução progressiva da razão Si/Al diminuiu a resistência à compressão das argamassas (Figura 24). As razões Si/Al obtidas por FRX, foram: GMK-W₀ (6,09), GMK-W₂₅ (5,44), GMK-W₅₀ (4,36), GMK-W₇₅ (3,76) e GMK-W₁₀₀ (2,99). Essa razão influencia no desempenho mecânico e nas propriedades físicas dos geopolímeros e sua redução está relacionada à redução das resistências à compressão das argamassas, como relatado

por (Prasanphan *et al.*, 2023).

A variação na composição final das argamassas (Tabela 5) alterou a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ das matrizes geopoliméricas, em função da interferência do resíduo de PEBD que afetou a distribuição dos componentes reativos, possivelmente reduzindo a interação entre NaOH e Na_2SiO_3 e impactando na formação do gel geopolimérico, segundo Tang *et al.* (2022). Para Prasanphan *et al.* (2023), valores abaixo do intervalo recomendado por Davidovits *et al.* (1994) podem afetar a formação da estrutura das matrizes. No entanto, além dessa razão, fatores como a porosidade e a baixa interação do resíduo com a matriz também influenciaram a resistência mecânica. Esse efeito foi evidente na resistência à compressão das argamassas (Figura 24), principalmente na argamassa GMK-W₁₀₀, onde a substituição total do *filler* de areia por PEBD resultou na menor razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre todas as demais, associada a maior porosidade (Figura 31) e a menor interação com a matriz, como observado no MEV (Figura 28e).

Em relação ao Na_2O , associado ao NaOH e ao Na_2SiO_3 , a Tabela 5 mostrou que embora a metacaulinita e o Na_2SiO_3 disponibilizem Si para a formação da matriz geopolimérica, o teor de SiO_2 diminuiu em função da substituição do *filler* areia pelo resíduo que é amorfo e não contém grupos funcionais que possam contribuir para a formação estrutural das argamassas, fazendo com que o Na_2O aumentasse nas argamassas. Assim, as razões $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ das argamassas foram: GMK-W₀ (48,70), GMK-W₂₅ (43,67), GMK-W₅₀ (35,28), GMK-W₇₅ (27,00) e GMK-W₁₀₀ (24,48). Nota-se que a redução da razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ resultou no aumento significativo de Na_2O na estrutura das argamassas, e embora o Na_2O promova a dissolução da metacaulinita, seu excesso pode gerar a presença de sódio não reagido na mistura como também a formação de estruturas menos rígidas que potencializam o aumento a porosidade e a redução da resistência mecânica das matrizes, como apontam (Gao *et al.*, 2014; Sikora *et al.*, 2021).

A razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ influencia a quantidade do Si disponível para a reação e na cinética de geopolimerização das matrizes. Com o aumento da substituição do *filler* de areia por PEBD, o efeito da razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de 40/30 g pode ter se tornado mais crítico, pois as matrizes precisam de uma compensação para equilibrar a menor aderência entre o resíduo e a fase geopolimérica. Sem essa compensação, as matrizes tendem a apresentar maior porosidade e menor resistência mecânica,

como indicado por Aupoli *et al.* (2019) e Gopalakrishna e Dinakar (2024). Uma razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ mais alta e equilibrada pode aumentar a disponibilidade de Si, favorecendo a formação de um gel NASH mais denso e estruturado, compensando assim, a baixa interação entre as matrizes geopoliméricas e o resíduo plástico, e maximizando sua resistência mecânica (Hanafiah *et al.*, 2017).

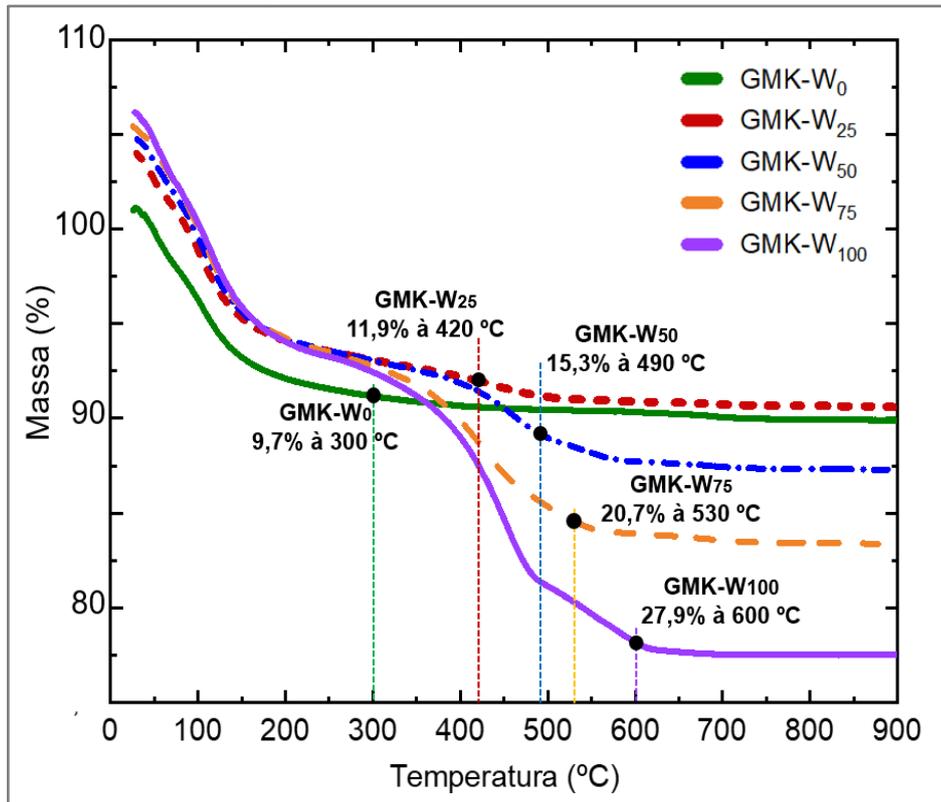
Observou-se que a interação entre os ativadores alcalinos e o resíduo de PEBD é limitada em geopolímeros, pois este polímero é inerte e hidrofóbico e isso reduz sua capacidade de integração com a matriz. A relação ideal entre Na_2SiO_3 e NaOH pode variar de acordo com o teor de resíduo, sendo recomendado avaliar seu efeito na porosidade e na uniformidade estrutural da matriz geopolimérica. Essa análise é essencial para que as proporções de NaOH e Na_2SiO_3 possam contribuir de forma eficiente para a homogeneidade da composição geopolimérica, especialmente quando resíduos como o PEBD são incorporados.

Dessa forma, ajustes na dosagem dos ativadores alcalinos podem minimizar os efeitos adversos da incorporação do resíduo de PEBD e contribuir para um melhor desempenho estrutural. Essa análise reforça que a otimização da dosagem dos ativadores pode compensar as alterações químicas nos geopolímeros decorrentes da incorporação do PEBD. Portanto, o balanceamento dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Na_2O é essencial para o aprimoramento e a sintetização dos geopolímeros, e com efeito, os melhores resultados.

4.2.3 Análise térmica por TGA

As curvas TGA da Figura 25 mostram a perda de massa das argamassas em função da temperatura e as tendências relacionadas à substituição da areia por resíduo de PEBD.

Figura 25 – Análises por TGA das argamassas GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀



Fonte: Autoria própria (2024)

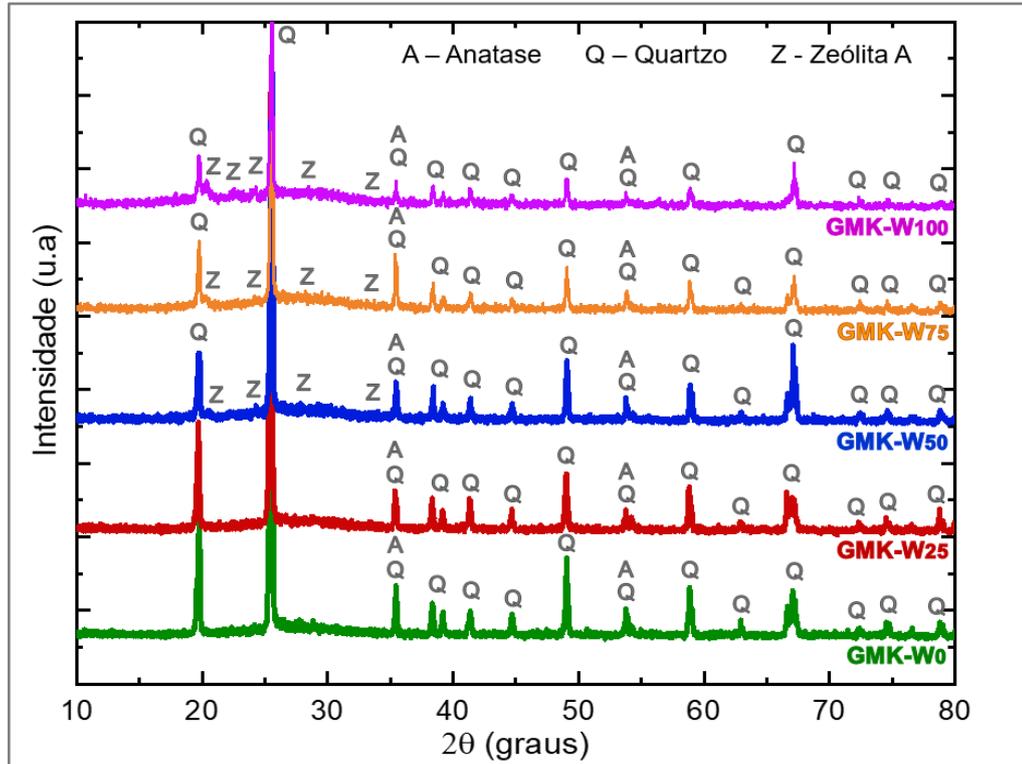
As análises por TGA nas argamassas revelaram a perda contínua de massa devido à evaporação da água adsorvida e da água estrutural entre 30 e 300 °C. As curvas indicam que a perda de massa aumentou com a substituição do *filler* de areia pelo resíduo de PEBD, o que sugere sua degradação térmica ao longo do aquecimento, conforme descrito por Tang *et al.* (2022). A argamassa GMK-W₀ apresentou uma perda de 9,7% e as demais com diferentes teores de resíduo apresentaram maiores declínios das curvas e demonstraram perdas variáveis de 11,9% na GMK-W₂₅ até 27,9% na GMK-W₁₀₀.

Cada argamassa alcançou uma estabilidade térmica parcial em uma temperatura distinta no intervalo de 300 a 600 °C. Após 600°C, as argamassas apresentaram menor variação na perda de massa, indicando a estabilidade térmica total. Entre as argamassas com resíduo, a GMK-W₅₀ estabilizou parcialmente a 490 °C e a GMK-W₁₀₀ estabilizou parcialmente a 600 °C com a maior perda de massa registrada. Esse comportamento está associado ao maior nível de degradação térmica do PEBD de acordo com Tang *et al.* (2022) e pode ter influenciado a estabilidade térmica da matriz.

4.2.4 Análise mineralógica por DRX

A Figura 26 representa os difratogramas da análise de DRX das argamassas.

Figura 26 – Difratogramas das argamassas GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀



Fonte: Autoria própria (2025)

Os difratogramas apresentados pela Figura 26 revelam a presença de fases cristalinas residuais e fases amorfas. Os picos mais intensos nas argamassas GMK-W₀ e W₂₅ correspondem ao quartzo do *filler* de areia e a fases cristalinas residuais.

A anatase é uma fase cristalina do TiO₂, presente como impureza na metacaulinita. Sua presença não depende do teor do *filler* de areia ou do resíduo de PEBD, pois seus picos permanecem constantes em todas as argamassas. Entretanto, o aumento do resíduo plástico pode influenciar a intensidade relativa dos picos da anatase devido ao efeito de diluição das frações cristalinas nas matrizes.

A formação da Zeólita A nas argamassas GMK-W₅₀, W₇₅ e W₁₀₀ foi observada com o aumento da substituição do *filler* de areia por teores de resíduo. Essa formação pode estar relacionada à estrutura pseudo-zeolítica da metacaulinita e à dosagem do ativador alcalino, conforme descrito por Soares (2022), que identificou a influência da composição do ativador na cristalização de zeólitas em matrizes geopoliméricas.

Apesar da natureza inerte, o PEBD pode influenciar indiretamente a retenção de água na matriz geopolimérica devido à sua hidrofobicidade e comportamento físico dentro da mistura, podendo criar zonas de baixa umidade, impedindo a dispersão uniforme dos ativadores alcalinos e afetar a hidratação do precursor reativo, nesse caso, a metacaulinita. A distribuição irregular da água pode modificar a viscosidade da mistura cimentícia, com isso a formação homogênea do gel NASH e impactar nas propriedades físicas e mecânicas, fenômeno que pode ter ocasionado a formação das Zeólitas A, e de acordo com Khemaissia *et al.* (2024), a formação das zeólitas depende das condições alcalinas, da composição química e do ambiente estrutural produzido pelos componentes da argamassa.

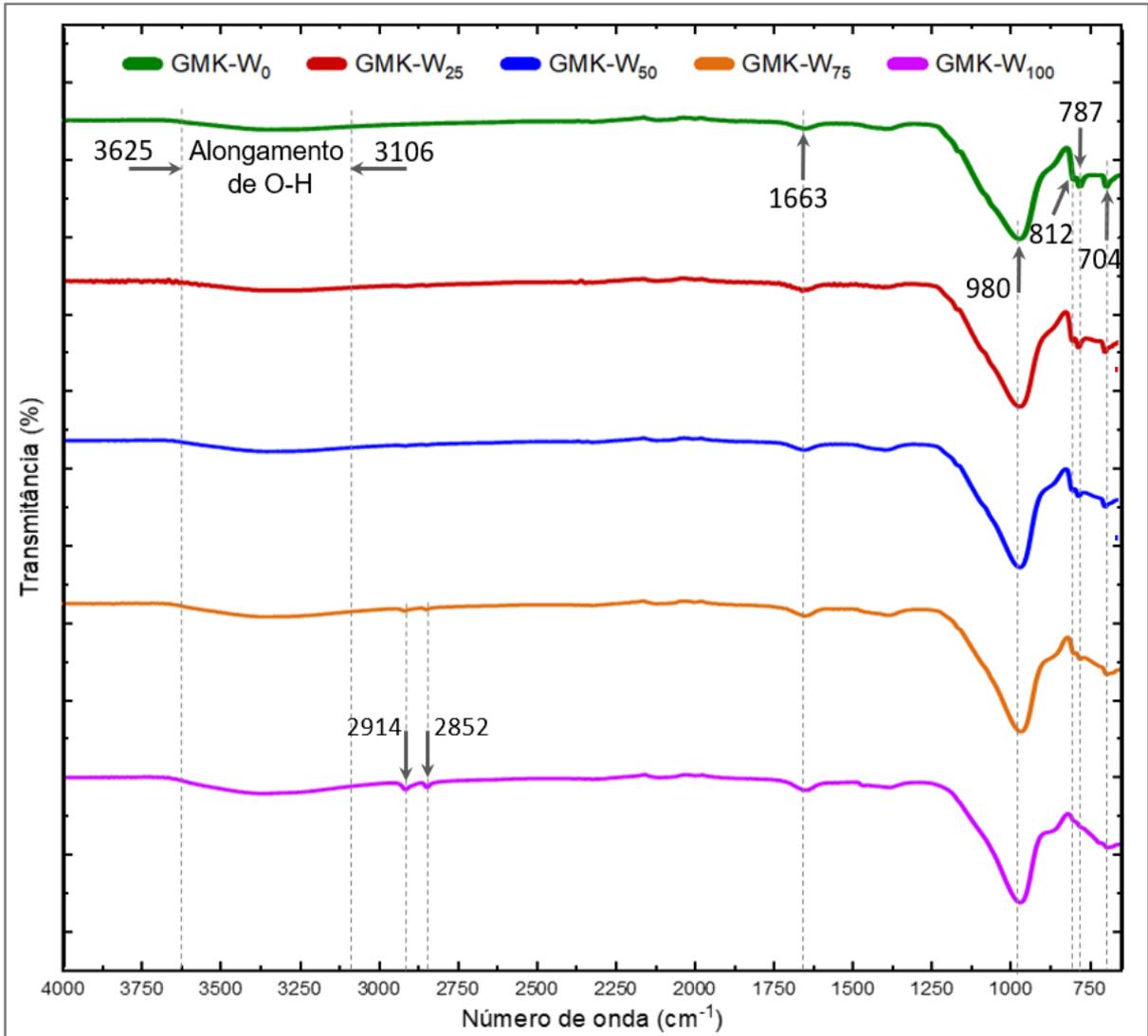
Os picos correspondentes ao quartzo estão presentes ao longo de todos os difratogramas das argamassas, enquanto os picos de anatase estão localizados no intervalo de 35° a 55° (2θ). Os picos característicos da Zeólita A estão concentrados no intervalo entre 19° e 34° (2θ). O aumento de uma banda difusa com halos amorfos entre 18° e 35° (2θ) está associado à matriz amorfa da metacaulinita e ao acréscimo do resíduo plástico, conforme (Andrade, 2019).

Com a incorporação crescente do resíduo e sua interação com os demais componentes da matriz, houve redução na cristalinidade das fases residuais. Esse efeito, aliado ao aumento da fração amorfa e à formação de zeólitas, pode estar relacionado à redução da resistência mecânica das argamassas com maiores teores de resíduo (Figura 24). A menor presença de fases cristalinas estruturantes, como o quartzo da areia, e o aumento do PEBD podem ter comprometido a coesão das matrizes geopoliméricas devido à falta de suporte estrutural adequado, devido ao quartzo com sua estrutura rígida e bem definida, contribuir para a distribuição eficiente das tensões mecânicas e a estabilidade da mistura, segundo (Carasek *et al.*, 2016). Em contrapartida, o PEBD pode criar zonas de baixa adesão entre os componentes reativos e afetar a microestrutura das argamassas geopoliméricas.

4.2.5 Análise de espectroscopia por FTIR

A Figura 27 ilustra os espectros das bandas de FTIR e a Tabela 6 detalha os picos correspondentes dessas bandas nas argamassas.

Figura 27 – Espectros de FTIR das argamassas GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 7 – Identificação das bandas e grupos funcionais dos espectros de FTIR das argamassas GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀.

POSIÇÃO DA BANDA (cm ⁻¹)	ATRIBUIÇÃO
3625 - 3106	Alongamento do grupo O-H
2914	Alongamento C-H
2852	Alongamento C-H
1663	Flexão H-O-H
983	Alongamento de Si-O-Si
812	Alongamento de Si-O-Si e Si-O-Al
787	Alongamento de Si-O-Si e Si-O-Al
704	Alongamento de Si-O-Si

Fonte: Autoria própria (2025)

As principais posições e picos das bandas identificados nos espectros de FTIR das argamassas, foram:

A banda 3625–3106 cm^{-1} está relacionada ao alongamento do grupo O-H, sendo atribuída à presença de água adsorvida nas argamassas, como apontado por Azevedo, Strecker e Lombardi (2018). Sua intensidade pode variar conforme a molaridade da solução de NaOH, tendendo a aumentar com o acréscimo da molaridade ou diminuir com a redução desta, conforme descrito por (Gopalakrishna; Dinakar, 2024).

Os picos em 2914 e 2852 cm^{-1} observados nas argamassa GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀, estão associados ao resíduo de PEBD. O espectro do PEBD (Figura 21) apresenta picos em 2920 e 2860 cm^{-1} , muito próximos aos picos em 2914 e 2852 cm^{-1} na Figura 27, que correspondem as ligações C-H dos hidrocarbonetos presentes no PEBD, e confirmado por (Tang *et al.*, 2022).

A presença dos picos 2914 e 2852 cm^{-1} , especialmente nas argamassas com maiores teores do resíduo, sugere que o resíduo permaneceu inerte nas matrizes, sem sinais de degradação térmica significativa. Além disso, observa-se que, quanto maior a quantidade do resíduo, maior é a intensidade dos picos. Dessa forma, pode-se deduzir que o PEBD não reagiu quimicamente com as matrizes, embora sua presença tenha influenciado a estrutura das argamassas geopoliméricas, pela formação de regiões pouco densas comprometendo a homogeneidade do material e aumento da porosidade (Figuras 28 e 31).

O pico em 1663 cm^{-1} está relacionado à flexão H-O-H da água adsorvida nas argamassas curadas possivelmente devido a reação à umidade ambiente, como observado por (Chen, Liang *et al.*, 2016; Li, Yefan *et al.*, 2024).

O pico em 983 cm^{-1} corresponde ao alongamento assimétrico das ligações Si-O-Si, essenciais para a formação da estrutura geopolimérica. O deslocamento progressivo dessa banda com o aumento do teor do resíduo, sugere alterações na razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, conforme evidenciado pela análise de FRX (Tabela 5).

Os picos em 812 e 787 cm^{-1} estão associados ao alongamento Si-O-Si e Si-O-Al, e são indicativos da transição estrutural durante o processo de cura das argamassas, segundo (Haq *et al.*, 2015).

O pico em 704 cm^{-1} é referente à flexão de Si-O-Si e aponta a transição estrutural durante a cura das argamassas, de acordo com (Chen, Liang *et al.*, 2016;

Gopalakrishna e Dinakar, 2024).

Adicionalmente, a análise por FRX (Tabela 5) indica que a substituição progressiva do *filler* de areia pelo PEBD nas argamassas resultou na redução do teor de SiO₂ e no aumento do Al₂O₃. Essa variação do teor do resíduo pode explicar o deslocamento das bandas de Si-O-Si e Si-O-Al para números de onda menores em relação aos espectros de FTIR da metacaulinita e do *filler* de areia (Figura 21), como descrito por (Azevedo; Strecker; Lombardi, 2018).

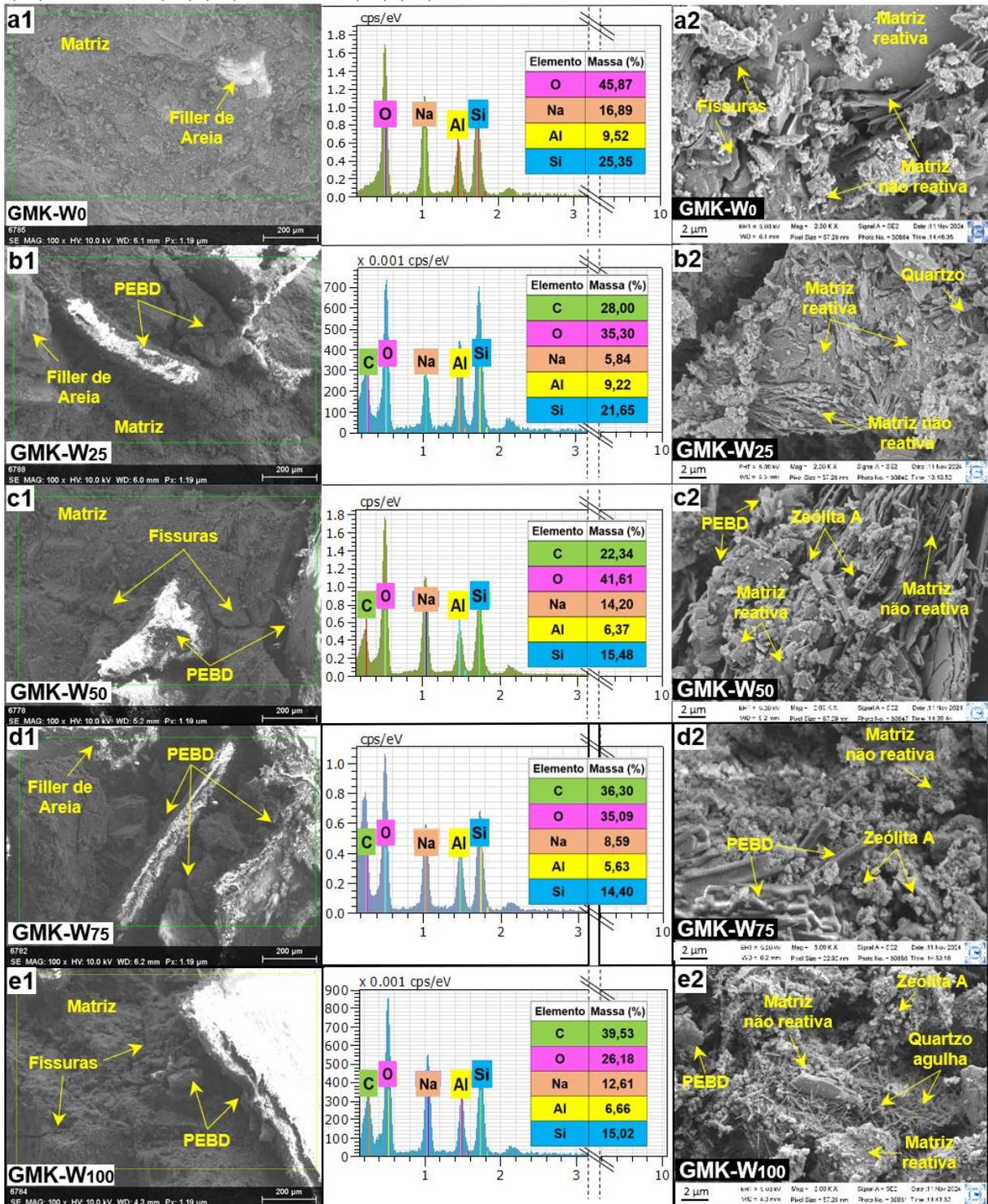
A análise por DRX (Figura 26) associada a análise por FTIR mostraram a redução da cristalinidade à medida do aumento do teor de resíduo plástico nas argamassas, o que corrobora o aumento da banda difusa no FTIR entre 900-1080 cm⁻¹ e sugere a redução da resistência mecânica nessas argamassas.

Observou-se também que em relação aos materiais (particularmente os precursores) dos geopolímeros, os deslocamentos das bandas para números de onda menores, são esperados para que se confirme a geopolimerização, como sugerem (Azevedo; Strecker; Lombardi, 2018; Li, Yefan *et al.*, 2024).

4.2.6 Análise morfológica por MEV-FEG/EDS

A Figura 28 mostra as micrografias das argamassas com feixe eletrônico por emissão de campo (FEG) nas escalas 200 μm e 2 μm, e estão acompanhadas da análise composicional dos perfis com 200 μm, realizada com a espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

Figura 28 – Análise por MEV-FEG/EDS das argamassas: (a1) (a2) GMK-W₀; (b1) (b2) GMK-W₂₅; (c1) (c2) GMK-W₅₀; (d1) (d2) GMK-W₇₅; (e1) (e2) GMK-W₁₀₀.



Fonte: Autoria própria (2025)

onde:

C – Carbono

O – Oxigênio

Na – Sódio

Al – Alumínio (alumina)

Si – Silício (sílica)

A morfologia analisada por espectroscopia de EDS, destacada na Figura 28 (a1), evidencia a alta reatividade da matriz da argamassa GMK-W₀. O perfil observado revela uma matriz compacta, e isso favoreceu a densificação e a redução da porosidade, contribuindo para o aumento da resistência à compressão (Figura 24).

Nas micrografias, observou-se que as matrizes reativas resultaram em argamassas mais densas, enquanto as matrizes menos reativas apresentaram maior porosidade, além de formas esféricas e prismáticas, sugerindo dissolução incompleta dessas fases durante o processo de hidratação, conforme relatado por Kang, Li e Ma (2024). Esse comportamento pode estar relacionado às diferentes proporções de resíduo plástico e às condições específicas de formação das argamassas, incluindo a redução da razão Si/Al, que podem ter influenciado a reatividade das matrizes, principalmente nas argamassas GMK-W₅₀, W₇₅ e W₁₀₀.

Nas micrografias da série (a2), (b2), (c2), (d2) e (e2) da Figuras 28, observou-se que frações difusas das matrizes permaneceram não reativas ou apresentaram ativações incompletas, conseqüentemente, a formação do gel NASH durante a reação de geopolimerização também não ocorreu de forma homogênea e uniforme, sendo essa incompletude mais pronunciada à medida que a areia foi substituída pelo resíduo de PEBD nas argamassas. As fissuras observadas nos perfis da Figuras 28 (a2), (c1), e (e1) são resultantes das fraturas para a coleta e análise dos corpos de prova.

O comportamento da reatividade das matrizes pode estar associado à concentração e à proporção dos ativadores alcalinos (NaOH e Na₂SiO₃), que influenciam diretamente a formação da matriz geopolimérica. Essa hipótese é sustentada pelos resultados da espectroscopia de EDS, que indicam a redução progressiva na razão Si/Al com o aumento do teor de resíduo, evidência também confirmada pelas análises por FRX (Tabela 5) e FTIR (Figura 27). Como os ativadores alcalinos desempenham um papel fundamental no mecanismo da reação de geopolimerização, essa redução na razão Si/Al impactou de forma adversa o desempenho mecânico e outras propriedades físicas das argamassas, conforme relatado por (Guan *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2024).

Outra particularidade observada foi a formação de Zeólitas A nas argamassas GMK-W₅₀ (c2), GMK-W₇₅ (d2) e GMK-W₁₀₀ (e2), com estruturas similares às características descritas por Rožek, Król e Mozgawa (2019). Esse fenômeno também foi identificado no DRX (Figura 26) e durante à formação dos produtos de hidratação,

e poderiam ter contribuído com benefícios ambientais, na eficiência energética e na melhoria do desempenho mecânico das argamassas, conforme a literatura citada.

No entanto, a análise por DRX revelou que as Zeólitas A ficaram distribuídas de forma concentrada, possivelmente criando pontos de fragilidade nas matrizes. Além disso, o aumento crescente do teor de resíduo plástico nas argamassas GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀ associado a estrutura porosa da Zeólita A, pode ter ampliado a porosidade total dessas argamassas, enfraquecendo as ligações internas e comprometendo a coesão estrutural. Como resultado, os efeitos negativos no desempenho mecânico, no aumento da absorção de água e porosidade, superaram os possíveis benefícios da formação de Zeólitas A nessas argamassas.

Outro fator que poderia ter contribuído para esses resultados é a razão líquido/sólido, que influencia na formação de poros durante a geopolimerização de materiais à base de metacaulinita. Neste estudo, foi estabelecida a razão água/metacaulinita de 0,6, valor considerado alto pela literatura, conforme Shilar *et al.* (2022). No entanto, o alto desempenho da argamassa de referência GMK-W₀, que alcançou 72,91 MPa de resistência à compressão, sugere que a determinação dessa razão foi adequada.

Nas argamassas contendo resíduo de PEBD, foi observada uma dificuldade crescente na trabalhabilidade de acordo com o aumento do teor do resíduo de PEBD na mistura. Essa dificuldade foi atribuída principalmente à natureza hidrofóbica desse polímero, que dificulta sua dispersão homogênea no meio alcalino, reduzindo a coesão da mistura geopolimérica, e conseqüentemente reduzindo a resistência mecânica e eleva a porosidade, segundo (Poh *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2022).

Outros fatores associados ao PEBD também podem ser considerados, entre eles, que possivelmente a substituição parcial do *filler* de areia por PEBD alterou o empacotamento granular, resultando em menor fluidez e maior resistência ao adensamento. A baixa fluidez, pode ter favorecido a segregação do material (flutuação ou concentração em camadas específicas) e resultado em distribuição heterogênea dos componentes. Outro fator é que a superfície lisa do resíduo plástico promove uma baixa aderência interfacial entre o material e matriz geopolimérica, além disso o PEBD apresenta baixa afinidade com o meio alcalino, favorecendo o fenômeno da aeração. Os teores de PEBD também podem ter alterado a retenção de umidade e o

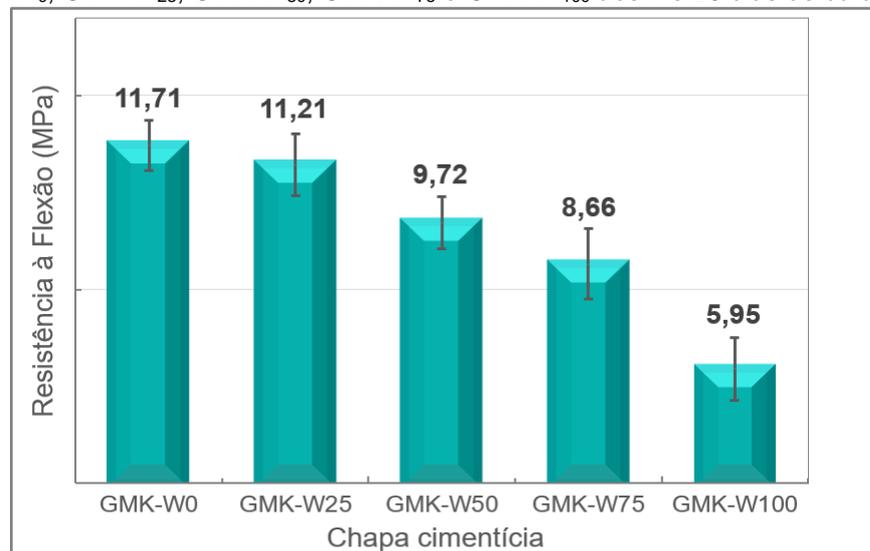
comportamento térmico da cura, afetando a reação de geopolimerização em algumas zonas dos corpos de prova (Poh *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2022; Tanani *et al.*, 2023).

4.3 Caracterização das chapas cimentícias

4.3.1 Resistência à tração na flexão

A Figura 29 representa os resultados das resistências à tração na flexão das chapas aos 28 dias de cura.

Figura 29 - Resistência à tração na flexão das chapas cimentícias GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀ aos 7 e 28 dias de cura



Fonte: Autoria própria (2024)

A resistências à tração na flexão mostradas na Figura 29 diminuiu gradualmente com o aumento do teor de resíduo de PEBD nas chapas. A maior resistência ocorreu com 11,71 MPa na chapa GMK-W₀ seguida por 11,21 MPa na GMK-W₂₅. A diferença de 0,5 MPa entre essas duas chapas aponta que a substituição de 25% de areia pelo resíduo não comprometeu significativamente a resistência à flexão. Entretanto, a partir de 50% de substituição, observou-se uma redução mais acentuada, chegando a 5,95 MPa na GMK-W₁₀₀.

Esses resultados guardam relação com os resultados da resistência à compressão (Figura 24), uma vez que as argamassas GMK-W₀ e GMK-W₂₅ também apresentaram melhores desempenhos aos 7 e 28 dias. Isso evidencia que a resistência à tração na flexão está intimamente relacionada à resistência à

compressão em matrizes cimentícias, como afirmam (Zhang *et al.*, 2024).

Nas chapas com 50, 75 e 100% de resíduo, o ganho de resistência ao longo do tempo foi menos expressivo. As interações entre o resíduo plástico e as matrizes são limitadas e estudos indicam que elas podem impactar na resistência à tração na flexão, conforme Soares (2022) que analisa o efeito do resíduo de PEBD na estruturação das matrizes geopoliméricas e Soares (2024) e descreve esse efeito na resistência à tração na flexão de chapas cimentícias. Nesse contexto, foi evidenciado por meio das análises por FRX, DRX, FTIR e MEV-FEG/EDS, que teores mais elevados do resíduo, podem reduzir as resistências à tração na flexão e à compressão.

Além desses fatores, outro aspecto relevante é que a deficiência na interação interfacial entre o resíduo plástico e a matriz geopolimérica pode ter sido mais determinante para a resistência à flexão do que para a compressão, uma vez que a flexão submete a interface a tensões de tração, tornando a interação resíduo-matriz ainda mais crítica, de acordo com (Li, Yingjie *et al.*, 2024; Tang *et al.*, 2022).

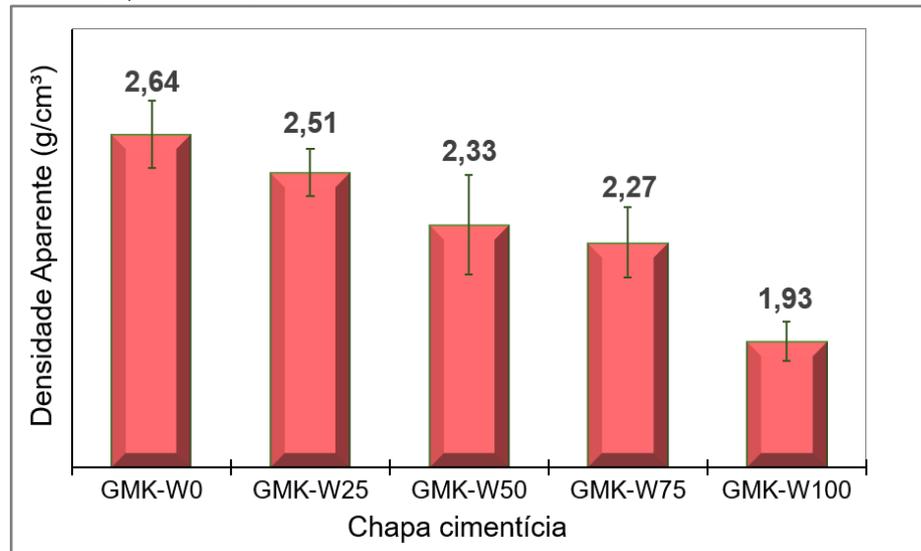
Além do teor de resíduo incorporado às argamassas, as características dos ativadores alcalinos (NaOH e Na₂SiO₃) são determinantes no desempenho mecânico das argamassas geopoliméricas, como descrito por (Gopalakrishna; Dinakar, 2024). Pode-se inferir que o equilíbrio entre o teor de resíduo plástico e a dosagem de ativadores é fundamental para maximizar as propriedades mecânicas das argamassas geopoliméricas.

Embora a perda progressiva de resistência, quanto à resistência à flexão todas as chapas atenderam aos requisitos estabelecidos pela NBR 15498:2021, sendo classificadas na Categoria C. As chapas GMK-W₀ e GMK-W₂₅ com melhor desempenho mecânico foram enquadradas na Classe 3, enquanto as chapas GMK-W₅₀ e GMK-W₇₅ com desempenho intermediário ficaram na Classe 2, e a chapa GMK-W₁₀₀, que apresentou a menor resistência, foi classificada na Classe 1. Esse resultado reforça que a incorporação do resíduo de PEBD influencia diretamente a resistência da matriz, sendo essencial equilibrar a dosagem desse resíduo na argamassa para garantir o desempenho estrutural desejável da chapa, conforme a demanda.

4.3.2 Densidade aparente

A Figura 30 ilustra as densidades aparentes das chapas cimentícias.

Figura 30 – Densidades aparentes das chapas GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀.



Fonte: Autoria própria (2024)

As densidades das argamassas apresentadas na Figura 30 variam de 2,64 g/cm³ para a mistura sem resíduo a 1,93 g/cm³ para 100% de PEBD. Pode-se afirmar que, à medida que a quantidade de resíduo incorporado aumenta, a densidade das argamassas diminui. Esse aspecto também foi notado nas análises por MEV-FEG/EDS (Figura 28).

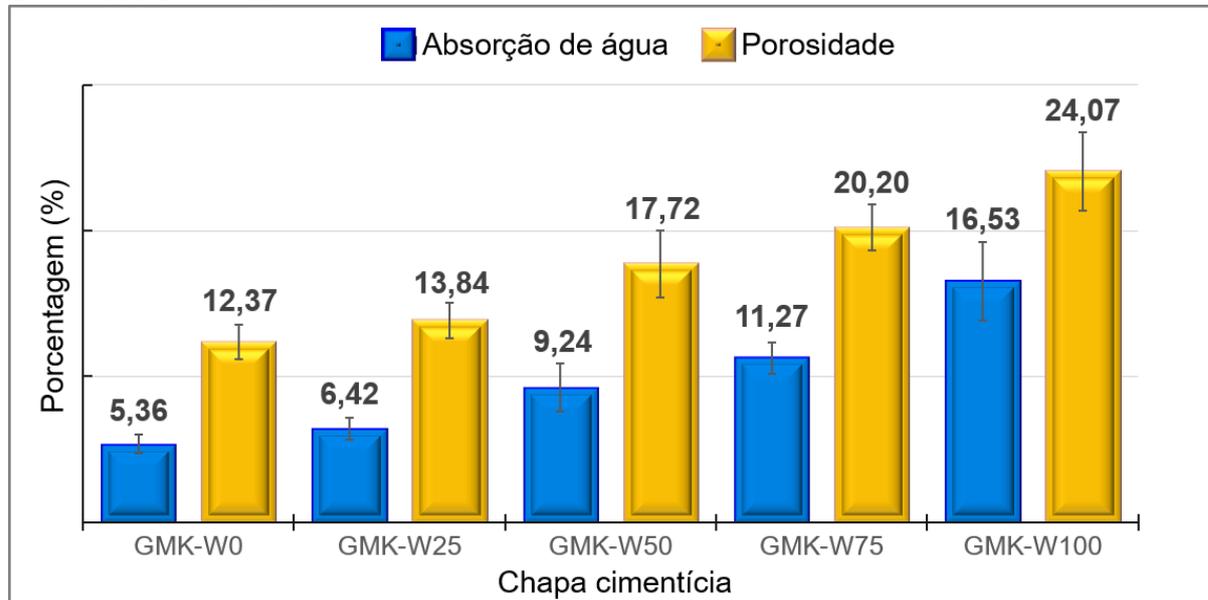
Além do aumento do resíduo, outros fatores, como as combinações específicas dos materiais nas dosagens e as concentrações dos ativadores alcalinos, também podem ter influenciado na variação das densidades, como sugerido por Rashad (2024). No entanto, a redução da densidade das argamassas pode estar associada a fatores associados às características intrínsecas do material do PEBD, como sua menor densidade em relação à areia, o tamanho e formato das partículas e hidrofobicidade, fatores que influenciam na porosidade das argamassas e, conseqüentemente, em sua resistência mecânica, aspectos também discutidos por (El-Tanani *et al.*, 2022); Kunthawatwong *et al.*, 2023).

Entretanto, observou-se também que a incorporação de teores de resíduos de PEBD como substituto parcial do agregado miúdo natural nas matrizes geopoliméricas pode ser uma alternativa vantajosa para o desenvolvimento de materiais menos densos e portanto mais leves, visto que a principal vantagem dessa substituição reside na densidade significativamente inferior do PEBD em comparação à areia natural.

4.3.3 Absorção de água e porosidade

A Figura 31 representa a absorção de água e a porosidade das chapas.

Figura 31 – Absorção de água e porosidade das chapas cimentícias GMK-W₀, GMK-W₂₅, GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀



Fonte: Autoria própria (2024)

Nota-se na Figura 31 que a redução do teor de areia e o aumento do resíduo de PEBD elevou a absorção de água e a porosidade das chapas. A absorção de água variou de 5,36% na GMK-W₀ a 16,53% na GMK-W₁₀₀, enquanto a porosidade aumentou de 12,37 para 24,07% nessas chapas. A substituição do *filler* de areia pelo resíduo plástico aumentou o volume de poros nas argamassas, aspecto também observado em Haruna *et al.* (2024). Esses resultados estão inter-relacionados com os resultados da resistência à compressão (Figura 24), da resistência à flexão (Figura 29) e da densidade aparente (Figura 30), como indicado por Batubara *et al.* (2022). Pode-se deduzir que a absorção de água e porosidade influenciaram no desempenho mecânico das argamassas geopoliméricas e consequentemente das chapas cimentícias.

O efeito da metacaulinita na absorção de água e na porosidade não foi determinado, e segundo Rashad (2024), esse efeito depende de diversos fatores, como os materiais agregados, as formulações dos ativadores e as dosagens estabelecidos para os geopolímeros, podendo haver resultados contraditórios. Em contrapartida, a concentração e a proporção dos ativadores alcalinos podem ter

influenciado essas propriedades, de acordo com Esparham e Moradikhrou (2021). Neste estudo, o módulo de sílica adotado para o Na_2SiO_3 foi 2,17, dentro do intervalo recomendado por Davidovits *et al.* (1994) e a razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ foi 1,3. Possivelmente uma razão mais alta entre os ativadores poderia ter atuado na redução da porosidade e da absorção de água, como sugerido por (Hanafiah *et al.*, 2017; Gopalakrishna; Dinakar, 2024).

4.4 Análises estatística de variância (ANOVA) com Teste de Tukey, da resistência mecânica das argamassas e chapas cimentícias

4.4.1 ANOVA com Teste de Tukey da resistência à compressão das argamassas

A análise ANOVA foi aplicada para avaliar a significância estatística das diferenças na resistência à compressão das argamassas geopoliméricas entre os grupos analisados. Para comparações múltiplas, utilizou-se o Teste de Tukey. O nível de confiança adotado foi de 95%, enquanto o nível de significância (α) foi estabelecido em 5%. A resistência à compressão foi considerada a variável dependente, utilizada para determinar o teor ideal de substituição do *filler* de areia pelo resíduo de PEBD. A análise considerou um único fator, representado pelo percentual de resíduo, sendo os níveis definidos pelas argamassas com diferentes teores de substituição. Os detalhes relativos aos níveis, fatores e variáveis estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Níveis, valores do fator e variáveis para ANOVA da resistência à compressão

Nível	Fator (% de resíduo PEBD)	Variável (Resistência à compressão, em MPa)
GMK-W ₀	0	79,91
GMK-W ₂₅	25	44,68
GMK-W ₅₀	50	26,87
GMK-W ₇₅	75	22,55
GMK-W ₁₀₀	100	15,03

Fonte: Autoria própria (2025)

A ANOVA foi realizada com o auxílio do software Minitab® 19, que gerou os resultados para as análises. A Tabela 9 apresenta os resultados da ANOVA referentes à resistência à compressão das argamassas.

Tabela 9 – ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Teor de resíduo	4	6422,89	1605,72	198,28	0,00
Resíduo	10	80,98	8,1	--	--
Total	14	6503,87	--	--	--

Fonte: A autoria própria (2025) adaptada do Minitab® 19

onde:

GL – Grau de liberdade entre as argamassas;

Valor F – Valor estatístico calculado

SQ – Soma dos quadrados ajustada;

Valor P – Valor estatístico tabelado

QM – Quadrado médio ajustado;

Os resultados da ANOVA na Tabela 9, compararam argamassas com diferentes teores de resíduo de PEBD. Os graus de liberdade (GL) representam a quantidade de variabilidade disponível para estimar os diversos componentes estatísticos.

O valor estatístico calculado (Valor F) entre os grupos foi 198,28, enquanto o valor tabelado (Valor P) foi 0. O valor F foi superior ao valor P, o que levou à rejeição da hipótese nula (H_0), que postula que todas as médias são iguais. Assim, foi adotada a hipótese alternativa (H_1), a qual indica que pelo menos uma das médias entre os grupos de argamassas é diferente.

Para confirmar as diferenças estatísticas, aplicou-se o Teste de Tukey, e resultados foram representados na Tabela 10 e complementados pela Figura 32.

Tabela 10 – Teste de Tukey para resistência à compressão das argamassas aos 28 dias.

Comparações entre grupos	DM (MPa)	d.m.s (MPa)	Comparação entre DM e d.m.s	Diferença significativa?
GMK-W ₀ → GMK-W ₂₅	28,23	5,72	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₀ → GMK-W ₅₀	46,04	5,72	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₀ → GMK-W ₇₅	50,36	5,72	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₀ → GMK-W ₁₀₀	57,88	5,72	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₂₅ → GMK-W ₅₀	17,81	5,72	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₂₅ → GMK-W ₇₅	22,13	5,72	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₂₅ → GMK-W ₁₀₀	29,65	5,72	DM > d.m.s	Sim
GMK-W₅₀ → GMK-W₇₅	4,32	5,72	DM < d.m.s	Não
GMK-W ₅₀ → GMK-W ₁₀₀	11,84	5,72	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₇₅ → GMK-W ₁₀₀	7,52	5,72	DM > d.m.s	Sim

Fonte: A autoria própria (2025)

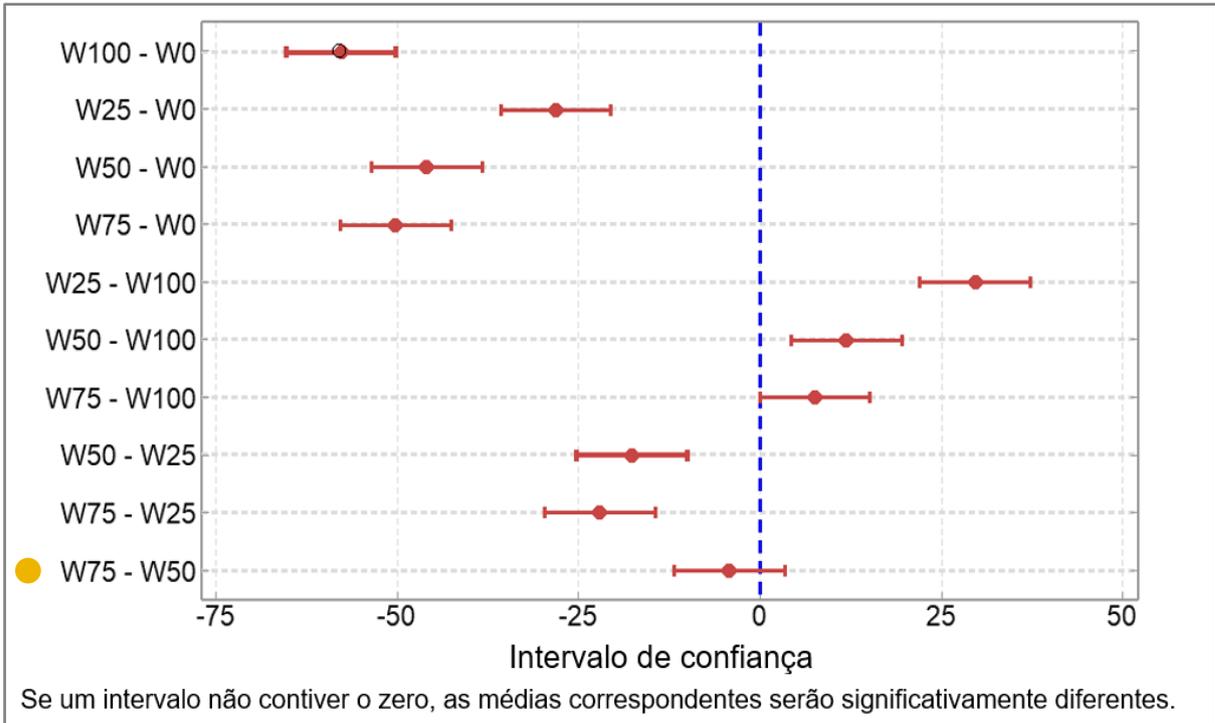
onde:

DM - Diferença entre as médias de resistência à compressão de cada argamassa, em (MPa);

d.m.s – Diferença mínima significativa, calculada pelo método estatístico de Tukey, em (MPa);

Comparação entre DM e d.m.s – Resultado do Teste de Tukey, em que é verificado se ($DM \leq d.m.s$) para validar se as diferenças observadas entre as médias são estatisticamente relevantes.

Figura 32 – Comparação de médias pelo Teste de Tukey: resistência à compressão de argamassas curadas aos 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2024)

onde:

W0, W25, W50, W75 e W100 correspondem as argamassas geopoliméricas com 0, 25, 50, 75 e 100% de resíduo de PEBD, respectivamente.

A Tabela 10 indica uma diferença estatística significativa entre todos os grupos, exceto entre $GMK-W_{50}$ e $GMK-W_{75}$, e a Figura 32 reforça essa análise ao apresentar os intervalos de confiança para as comparações dos grupos.

A comparação entre a diferença de médias (DM) e a diferença mínima significativa (d.m.s.), mostrou uma diferença não significativa entre a $GMK-W_{50}$ e a $GMK-W_{75}$, sendo a maior média de 5,72 para a d.m.s. Isso sugere que o aumento do teor de resíduo entre essas argamassas reduziu a resistência à compressão, porém sem significância estatística. Esse resultado pode ter implicações oportunas para a construção civil, incentivando novos estudos sobre eficiência energética, viabilidade econômica e benefícios ambientais no uso de argamassas com resíduos plásticos.

As possíveis implicações desse resultado abrangem a escolha do material para

aplicações específicas, a eficiência no uso de recursos, o impacto em projetos e até normas técnicas. Em determinadas aplicações, se a GMK-W₇₅ for suficiente em termos de resistência e economia, ela pode se tornar uma opção preferível, mesmo possuindo resistência à compressão relativamente inferior à GMK-W₅₀.

Do ponto de vista da eficiência de recursos, surge uma questão relevante: o aumento na resistência justifica o custo adicional e o impacto ambiental associado à produção de argamassas com desempenho superior? No contexto de projetos e normas técnicas, as diferenças estatísticas observadas podem influenciar decisões em projetos estruturais e contribuir para a atualização de normas técnicas, auxiliando na definição das melhores proporções para alcançar um intervalo de resistência compatível com as necessidades das construções.

A ANOVA associada ao Teste de Tukey, contribuíram para conclusões mais precisas sobre o comportamento dos grupos, e confirmaram que as argamassas GMK-W₅₀, GMK-W₇₅ e GMK-W₁₀₀ diferem estatisticamente das argamassas GMK-W₀ e GMK-W₂₅. Resultados semelhantes foram observados por Soares (2022), em que os teores de resíduo plástico em substituição da areia influenciaram significativamente na redução da resistência à compressão das argamassas, tornando as diferenças estatisticamente relevantes.

4.4.2 ANOVA com Teste de Tukey da resistência à tração na flexão das chapas

Para a ANOVA da resistência à tração na flexão das chapas cimentícias, aplicaram-se os mesmos procedimentos previamente descritos para a resistência à compressão, incluindo o uso do Teste de Tukey, com nível de confiança de 95% e significância (α) de 5%. Os níveis, fatores e variáveis foram descritos na Tabela 11.

Tabela 11 – Níveis, valores do fator e variáveis para ANOVA da resistência à tração na flexão

Nível	Fator (% de resíduo PEBD)	Variável (Resistência à tração na flexão, em MPa)
GMK-W ₀	0	11,71
GMK-W ₂₅	25	11,21
GMK-W ₅₀	50	9,72
GMK-W ₇₅	75	8,66
GMK-W ₁₀₀	100	5,95

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados da ANOVA referentes à resistência à tração na flexão das chapas estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – ANOVA para resistência à tração na flexão aos 28 dias

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F	Valor P
Teor de resíduo	4	84,65	21,1633	21,67	0,00
Resíduo	15	14,65	0,9767	-	-
Total	19	99,30	-	-	-

Fonte: Autoria própria, adaptada do Minitab® 19 (2025)

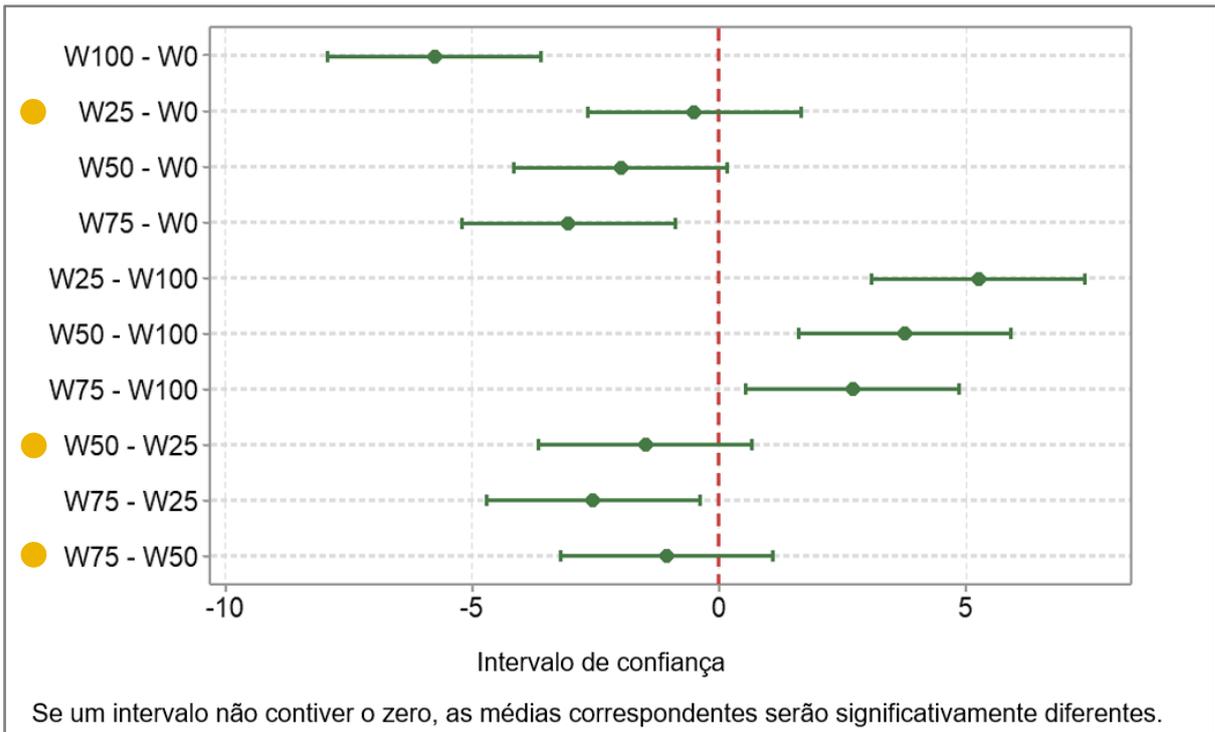
Os resultados obtidos por meio da aplicação da ANOVA, conforme mostrado na Tabela 12, permitiram comparar estatisticamente as chapas cimentícias produzidas com diferentes teores de resíduo de PEBD. Os graus de liberdade (GL) indicaram a variabilidade disponível para estimar os componentes estatísticos. O valor F calculado entre os grupos foi de 21,67, e o valor P tabelado foi igual a 0. Como o valor F foi maior que o valor P, a hipótese nula (H0) foi rejeitada e a hipótese alternativa (H1) aceita, indicando a diferença entre grupos em pelo menos uma das médias das era diferente entre os grupos. Para validar as diferenças observadas, aplicou-se o Teste de Tukey, cujos resultados são apresentados na Tabela 13 e ilustrados na Figura 33.

Tabela 13 – Teste de Tukey da resistência à tração na flexão das chapas aos 28 dias

Comparações entre grupos	DM (MPa)	d.m.s (MPa)	Comparação entre DM e d.m.s	Diferença significativa?
GMK-W₀ → GMK-W₂₅	0,5	1,51	DM < d.m.s	Não
GMK-W ₀ → GMK-W ₅₀	1,99	1,51	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₀ → GMK-W ₇₅	3,05	1,51	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₀ → GMK-W ₁₀₀	5,76	1,51	DM > d.m.s	Sim
GMK-W₂₅ → GMK-W₅₀	1,49	1,51	DM < d.m.s	Não
GMK-W ₂₅ → GMK-W ₇₅	2,55	1,51	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₂₅ → GMK-W ₁₀₀	5,26	1,51	DM > d.m.s	Sim
GMK-W₅₀ → GMK-W₇₅	1,06	1,51	DM < d.m.s	Não
GMK-W ₅₀ → GMK-W ₁₀₀	3,77	1,51	DM > d.m.s	Sim
GMK-W ₇₅ → GMK-W ₁₀₀	2,71	1,51	DM > d.m.s	Sim

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 33 – Comparação de médias pelo Teste de Tukey: resistência à tração na flexão das chapas cimentícias curadas aos 28 dias.



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise pelo Teste de Tukey, com base na Tabela 13 e na Figura 33, indica que a maioria das comparações entre os grupos apresentou diferença estatisticamente significativa, indicando que a substituição de areia por PEBD influenciou a resistência à tração das chapas cimentícias de forma considerável. Por outro lado, três comparações não mostraram diferença significativa, pois a DM foi inferior à d.m.s. nos grupos GMK- W_0 e GMK- W_{25} , GMK- W_{25} e GMK- W_{50} , GMK- W_{50} e GMK- W_{75} . Isso sugere que a incorporação de PEBD até 75% de substituição do *filler* de areia não compromete significativamente a resistência à tração das chapas. Entretanto, com 100% de substituição, a resistência apresentou uma redução acentuada.

Em termos de implicações práticas, a ausência de diferenças significativas entre os grupos GMK- W_0 e GMK- W_{25} , GMK- W_{25} e GMK- W_{50} , GMK- W_{50} e GMK- W_{75} , sugere que essas chapas podem manter um desempenho mecânico aceitável até 75% de substituição de areia por resíduo de PEBD, oferecendo potenciais benefícios ambientais e econômicos. No entanto, do ponto de vista estatístico, a redução expressiva da resistência à tração na flexão da chapa GMK- W_{100} , indica um limite crítico para a incorporação do resíduo, podendo comprometer a funcionalidade das

chapas. Esses resultados são consistentes com os de Silva (2020) que, por meio da ANOVA e do Teste de Tukey, também identificou que resíduos plásticos em chapas cimentícias comprometem as propriedades mecânicas, particularmente a resistência à tração na flexão, devido às características menos rígidas do material reciclado.

Quanto às perspectivas de otimização das chapas cimentícias com materiais residuais, como o PEBD, e à padronização do uso desses materiais, a ausência de impacto significativo em algumas dosagens como a GMK-W₂₅, GMK-W₅₀ e GMK-W₇₅, sugere oportunidades de aprimoramento. Ajustes em fatores como a concentração dos ativadores alcalinos, a proporção e a granulometria do PEBD, entre outros, podem resultar no desenvolvimento de composições mais eficientes. Essa análise pode contribuir para o uso de resíduos plásticos em argamassas, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis na construção civil.

5 CONCLUSÕES

As análises químicas por FRX confirmaram o alto teor de aluminossilicatos no caulim utilizado na produção da metacaulinita, evidenciando sua adequação para a síntese de geopolímeros. As análises térmicas por TGA/DSC mostraram que a temperatura de 650 °C foi eficiente na produção de metacaulinita, destacando a importância do controle da temperatura de calcinação do caulim para a redução do consumo de energia na produção de geopolímeros.

A análise granulométrica evidenciou que as partículas finas da metacaulinita favoreceram sua reatividade na formação dos geopolímeros, e os agregados (areia e resíduo de PEBD) influenciaram a compacidade das argamassas e chapas cimentícias.

As análises microestruturais nas argamassas por DRX, FTIR e MEV, indicaram que a substituição progressiva do *filler* de areia por resíduo de PEBD resultou em alterações estruturais e morfológicas significativas. O DRX evidenciou a redução da cristalinidade e o surgimento de fases zeolíticas nas composições com maior teor de resíduo, fenômeno que contribuiu para o aumento da porosidade nas matrizes. O FTIR apontou variações na estrutura da rede geopolimérica, devido as variações das razões Si/Al nas argamassas com teores de PEEB. A análise por MEV reforçou a redução da densidade das matrizes e a presença de zonas não reativas nas dosagens com maior teor do resíduo plástico, resultado da natureza hidrofóbica desse polímero e a interação interfacial irregular com a matriz. Tais efeitos interferiram nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas, no entanto, os estudos mostraram que ajustes nos parâmetros das dosagens podem resultar em matrizes mais densas e resistentes.

Os ensaios nas chapas indicaram que o principal contribuinte para o aumento da absorção de água e da porosidade foi a substituição progressiva do *filler* de areia pelo PEBD, mas, a concentração e a proporção dos ativadores alcalinos também podem ter influenciado os resultados, alterando a estrutura das matrizes geopoliméricas.

Os ensaios de resistência à compressão das argamassas e de resistência à tração na flexão das chapas cimentícias, complementados pelas análises estatísticas ANOVA e Teste de Tukey, mostraram que altos teores de PEBD reduzem as propriedades mecânicas da matriz. Em todas as análises, os melhores resultados foram obtidos nas composições com 0 e 25% de PEBD. No entanto, as composições

com 50, 75 e 100% também obtiveram resultados satisfatórios para a produção de chapas cimentícias destinadas à vedação predial interna, conforme a NBR 15498:2021, indicando que todas as composições podem ser viáveis, de acordo com as características e funcionalidade das construções e as demandas do mercado. Dessa forma, todas as chapas atenderam aos requisitos de resistência à flexão e foram classificadas nas classe 1, 2 e 3 da categoria C segundo a NBR 15498:2021 e de acordo com os desempenho alcançado de cada dosagem.

A substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduos de PEBD em matrizes geopoliméricas representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento de produtos cimentícios com novas funcionalidade como a leveza, maior resistência aos agentes químicos e a contribuição efetiva para a sustentabilidade e economia circular, por meio da valorização de resíduos plásticos e da redução do consumo de recursos naturais.

Apesar dos desafios associados à incorporação de resíduos plásticos em geopolímeros, como a baixa compatibilidade entre o polímero e a matriz, o estudo indica que o ajuste na relação dos ativadores alcalinos, a aplicação de tratamentos superficiais no PEBD e o uso de aditivos plastificantes podem contribuir para o aprimoramento das propriedades físicas e mecânicas das argamassas e das chapas cimentícias.

Assim, embora o uso de PEBD como agregado alternativo reduza a resistência mecânica dos geopolímeros, sua baixa densidade pode ser explorada como uma vantagem em aplicações específicas onde o peso reduzido seja um fator desejável.

Para pesquisas futuras, recomenda-se:

- Investigar o efeito dos ativadores alcalinos na interação com resíduos plásticos na produção de geopolímeros;
- Avaliar a evolução da resistência mecânica das argamassas geopoliméricas em idades superiores a 28 dias;
- Explorar combinações de dosagens e tratamentos superficiais que possam melhorar a compatibilidade entre o PEBD e a matriz e as propriedades mecânicas;
- Analisar a contribuição do uso de resíduos plásticos, especialmente PEBD, para a eficiência das construções e a mitigação de impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, V. M.; SAVOIKAR, P. P. *Sustainable use of normal and ultra-fine fly ash in mortar as partial replacement to ordinary Portland cement in ternary combinations. **Materials Today: Proceedings**. [S. l.], v. 51, p. 1593–1597, 2022, doi 10.1016/j.matpr.2021.10.409.*
- AHMED, S. S.; MARTINEZ, A. *Triaxial compression behavior of 3D printed and natural sands. **Granular Matter**, [S. l.], v. 23, n. 82, 2021. DOI 10.1007/s10035-021-01143-0.*
- ALOTAIBI, S.; MARTINEZ-VAZQUEZ, P.; BANIOPOULOS, C. *Waste Generation Factors and Waste Minimisation in Construction. In: UNGUREANU, V. et al. (org.). **International Conference “Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience” & Midterm Conference of CircularB “Implementation of Circular Economy in the Built Environment”**. Lecture Notes in Civil Engineering - 4th [S. l.: s. n.]v. 489 LNCE, p. 552–559, 2024, doi 10.1007/978-3-031-57800-7.*
- AKINTAYO, B. D.; OLANREWAJU, O. A.; OLANREWAJU, O. I. *Life Cycle Assessment of Ordinary Portland Cement Production in South Africa: Mid-Point and End-Point Approaches. **Sustainability**. [S. l.], v. 16, n. 7, p. 1–26, 2024, doi 10.3390/su16073001.*
- AMER, A. A. M. *et al. Behavior of the use of fine recycled concrete aggregates on rheological parameters and hardened mortar properties. **Studies in Engineering and Exact Sciences**. [S. l.], v. 5, n. 2, 2024, doi 10.54021/seesv5n2-044.*
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C109/C109M** - Resistência à compressão de argamassas de cimento hidráulico (usando corpos de prova cúbicos de 50 mm [2 in.]). Pensilvânia (EUA), 2023.
- ANDRADE, B. D. **Estudo da obtenção de geopolímero a partir de aluminossilicato sintetizado via sol-gel**. 2019. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502** Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9935** Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15498** Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916** Agregado miúdo – Determinação da densidade e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ATIENZA, E. M. *et al.* Development of Foam Fly Ash Geopolymer with Recycled High-Density Polyethylene (HDPE) Plastics. **Polymers**. [S. l], v. 15, n. 2413, 2023, doi 10.3390/polym15112413.

AUPOIL, J. *et al.* Interplay between silicate and hydroxide ions during geopolymerization. **Cement and Concrete Research**. [S. l], v. 115, p. 426-432, 2019, doi 10.1016/j.cemconres.2018.09.012.

AYENI, O.; ONWUALU, A. P.; BOAKYE, E. Characterization and mechanical performance of metakaolin-based geopolymer for sustainable building applications. **Construction and Building Materials**. [S. l], v. 272, n. 121938, 2021, doi 10.1016/j.conbuildmat.2020.121938.

AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**. [S. l], v. 64, p. 388-396, 2018, doi 10.1590/0366-69132018643712420.

BARBOSA, E. P. **Estudo da produção e caracterização de metacaulinita para utilização como material cimentício suplementar**. 2019, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

BAUER, F. *et al.* Plastics and climate change breaking carbon lock-ins through three mitigation pathways. **One Earth**. [S. l], v. 5, n. 4, p. 361-376, 2022, doi 10.1016/j.oneear.2022.03.007.

BATUBARA, B. N. *et al.* Karakteristik Beton Geopolimer Pada Aktivator Natrium Hidroksida (NaOH) Dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3). **Jurnal Sipil KOKOH**. [S. l], v. 20, n. 2, p.85-92, 2022, doi 10.17509/k.v20i2.52363.

BENALIA, S.; ZEGHICHI, L.; BENGHAZI, Z. A Comparative Study of Metakaolin/Slag-Based Geopolymer Mortars Incorporating Natural and Recycled Sands. **Civil Engineering Journal**. [S. l], v. 8, n. 8, p. 1622–1638, 2022. DOI 10.28991/CEJ-2022-08-08-07.

BEZERRA, B. P.; LUZ, A. P. Desenvolvimento de cerâmicas refratárias à base de alumina e mulita preparadas com ligante geopolimérico “one-part”. **68º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. 2024, Santos, SP. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/384664406>. Acesso em: 07/05/2025.

BHINA, M. R. *et al.* Influence of fineness modulus and preheated sand on compressive strength of alkali activated geopolymer mortar. **Proceedings of International Structural Engineering and Construction**. [S. l.], v. 10 (1), 2023, doi 10.14455/ISEC.2023.10(1).AAC-05.

BORÇATO, A. G. *et al.* Mechanical properties of metakaolin-based geopolymers modified with different contents of quarry dust waste. **Construction and Building Materials**. [S. l], v. 400, n. 132854, 2023, doi 10.1016/j.conbuildmat.2023.132854.

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras

providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, n. 147, p. 3–7, ago 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. 2010.

PLACA CIMENTÍCIA BRICKAWALL®. **Manual de instalação sistema Brickawall de vedação**. 2025, 37p. GRUPO BRICKA. Disponível em: [http://www.bricka.com.br/manuais/Manual de Instalao da Placa Cimenticia BRICKAWALL.pdf](http://www.bricka.com.br/manuais/Manual%20de%20Instalao%20da%20Placa%20Cimenticia%20BRICKAWALL.pdf). Acesso em: 09/05/2025.

CABALLERO, L. R. *et al.* *Thermal, Mechanical and Microstructural Analysis of Metakaolin Based Geopolymers*. **Materials Research**. [S. l], v. 22, n. e20180716, 2019, doi 10.1590/1980-5373-MR-2018-0716.

CAMPOS A. P. *et al.* **Caulim**. [S. l]: p. 4-6, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/caulim_sm_2018. Acesso em: 01/02/2024.

CARASEK, H. *et al.* Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**. [S. l], v. 21, n. 11739, pp.714-732, 2016, doi 10.1590/S1517-707620160003.0068.

CAZAN, C. *Advances in Sustainable Polymeric Materials*. **Polymers**. [S. l], v. 14, n. 1472, 2022, doi 10.3390/polym14224972.

CHEN, Liang *et al.* *Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer*. **Materials**. [S. l], v. 9, n. 767, 2016, doi:10.3390/ma9090767.

COELHO, A. C. V. **Aula 2 Estrutura Cristalina dos Argilominerais**, PMT 5846-Ciência e Tecnologia de Argilas. [S.l]: 2020. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5679323/mod_resource/content/2/Un02-Estrutura2020-v5.0-moodle.pdf. Acesso em 21/04/2024. Acesso em: 21/04/2024.

CONG, P.; CHENG, Y. *Advances in geopolymer materials: A comprehensive review*. **Traffic and transportation Engineering**. [S. l], v. 8, p. 283-314, 2021, doi 10.1016/j.jtte.2021.03.004.

CORRÊA, P. M. *et al.* *Potential use of PET and PP as partial replacement of sand in structural concrete*. **Revista Matéria**. [S. l], v.26, n. 3, 2021, doi 10.1590/S1517-707620210003.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Estudos para o Plano Nacional de Mineração 2050**: Caderno 2 – Pesquisa e Produção Mineral. Brasília, 2023. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-2-pesquisa-e-producao-inal/EstudosMSWordPNM2050Caderno220221116_Vol.II.pdf. Acesso em: 05/02/2024.

DALAWAI, V. N.; SRIKANTH, L.; SRIKANTH, I.; AROCKIASAMY, M. (2021). *Effective Utilization of Fly Ash and Steel Slag for Partial Replacement of Cement and River Sand*

for Sustainable Construction. In: KUMAR SHUKLA, S. et al. (org.). **Advances in Geotechnics and Structural Engineering**. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, v. 143, p. 279–291, 2021, doi 10.1007/978-981-33-6969-6_26.

DANIEL, B. M.; FREITAS, C. K. Sistema Construtivo em *Light Steel Frame*. **Cogna Educação**. [S. l.], p. 1–16, 2023. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/53490/1/BEATRIZ+MACHADO.pdf>.

DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVICS, M.; DAVIDOVITS, N. Process for obtaining a geopolymeric alumino-silicate and products thus obtained. 9 p. **U.S. Patent n. 5,342,595**, 1994.

DAVIDOVITS J. Geopolymer Cement a review. **Geopolymer Science and Technics, Geopolymer Institute**, [S. l.], n. 21, 2013.

DENG, M. et al. Impacts of Sand Mining Activities on the Wetland Ecosystem of Poyang Lake (China). **Land**, [S. l.], v. 11, n. 1364, doi 10.3390/land11081364.

DOMANSKAYA, I. K.; LASKINA, T. S. Prospects of Replacing Natural Sand with Crushed Rock Fines in the Composition of Fine-Grained Concrete. **KnE Materials Science**. [S. l.], v. 2020, p. 499–504, 2020, doi 10.18502/KMS.V6I1.8132.

DUXSON, P. et al. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. [S. l.], v. 292, p. 8-20, 2007, doi 10.1016/j.colsurfa.2006.05.044.

ELGUBBI, H. M.; OTHMAN, S. S.; HARUN, F. W. Comparative Study on Lipase Immobilized onto Organo-Cation Exchanged Kaolin and Metakaolin: Surface Properties and Catalytic Activity. **Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis**. [S. l.], v. 16 (2), p. 214-233, 2021, doi 10.9767/bcrec.16.2.10230.214-233.

EL-SEIDY, E. et al. Lightweight alkali-activated materials and ordinary Portland cement composites using recycled polyvinyl chloride and waste glass aggregates to fully replace natural sand. **Construction and Building Materials**. [S. l.], v. 368, n. 130399, 2023, doi 10.1016/j.conbuildmat.2023.130399.

EL-TANANI M. et al. Blending Plastics Waste with Highly Available Jordanian Kaolin for Preparation of Alkali-Activated Mortars. **Sustainability**. [S. l.], v. 14, n. 15742, 2022, doi 10.3390/su142315742.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Caulim e sua utilização na proteção de algodoeiros contra artrópodes-praga**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223344/1/Caulim-utilizacao-protECAO-2020.pdf>. Acesso em: 01/02/2024.

Esparham, A; Moradikhou, A. B. *A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Metakaolin.* **Journal of Civil Engineering and Materials Application**, [S. I.], v. 5 (2), p. 57-65, 2021, doi 10.22034/jcema.2021.274959.1053.

FERREIRA, R. L. S. *et al.* *Effects of Particle Size Distribution of Standard Sands on the Physical-Mechanical Properties of Mortars.* **Materials**. [S. I.], v. 16, n. 844, 2023, doi 10.3390/ma16020844.

FOŘT, J. *et al.* *Assessment of Clayey Freshwater Sediments as Suitable Precursors for Alkaline Activation.* **Polymers**, [S. I.], v. 16, n. 175, 2024, doi 10.3390/polym16020175.

GAO, K. *et al.* *Effects SiO₂/Na₂O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO₂ metakaolin-based geopolymers.* **Construction and Building Materials**, [S. I.], v. 53, p. 503–510, 2024, doi 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.003.

GHOLAMPOUR, A. *et al.* *Development of a waste-based eco-friendly structural mortar without Portland cement and natural sand.* **Structural Concrete**, [S. I.], v. 22, pg.488–500, 2021, doi 0.1002/suco.202000096.

GNANADURAI, L. T.; RENGANATHAN, N. T.; SELVARAJ, C. G. *Synthesis and Characterization of Synthetic Sand by Geopolymerization of Industrial Wastes (Fly ash & GGBS) Replacing the Natural River Sand.* **Environmental Science and Pollution Research**. [S. I.], v. 28, p. 56294–56304, 2021, doi 10.21203/rs.3.rs-250207/v1.

GOPALAKRISHNA, B. DINAKAR, P. *Life cycle assessment (LCA) and the influence of alkaline activator content on mechanical and microstructural properties of geopolymer mortar.* **Journal of Engineering Research**. [S. I.], 2024, doi 10.1016/j.jer.2024.01.010.

GOUNDEN, K. *et al.* *The use of recycled high-density polyethylene waste to manufacture eco-friendly plastic sand bricks.* **SPE Polymers**. [S. I.], v. 5, p. 20-34, 2023, doi 10.1002/pls2.10106.

GUAN, X. *et al.* *Interactions between Amorphous Silica and Sodium Alumino-Silicate Hydrate Gels: Insight from Reactive Molecular Dynamics Simulation.* **The Journal of Physical Chemistry C**. [S. I.], v. 127, n. 27, p. 13302–13316, 2023, doi 10.1021/acs.jpcc.3c02462.

HACKEM, R. *et al.* *A comparative analysis of the microstructural and physicochemical properties of alluvial and dune sands from northeast Algerian Sahara.* **The Journal of Engineering and Exact Sciences**. [S. I.], v. 9, n. 6, 2023, doi 10.18540/jcecvl9iss6pp16222-01e.

HANAFIAH, S. *et al.* *Effect of Na₂SiO₃/NaOH on mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar using fly ash and rice husk ash as precursor.* **AIP Conference Proceedings**, [S. I.], v. 1903, n. 050013, 2017, doi 10.1063/1.5011552.

HAQ, E. U. *et al.* *Microwave synthesis of thermal insulating foams from coal derived*

bottom ash. **Fuel Processing Technology**. [S. l.], v. 130, p. 263-267, 2015, doi 10.1016/j.fuproc.2014.10.017.

HAQUE, SK. M. *et al.* *Application and Suitability of Polymeric Materials as Insulators in Electrical Equipment: Review*. **Energies**. [S. l.], v. 14, n. 2758, 2021, doi 10.3390/en14102758.

HARIADI, D. *et al.* *Utilization of LDPE plastic waste on the quality of pyrolysis oil as an asphalt solvent alternative*. **Thermal Science and Engineering Progress**. [S. l.], v. 23, n. 100872, 2021, doi 10.1016/j.tsep.2021.100872.

HASSAN, F., BALKIS, A. P. *Utilization of Crushed Waste Glass as a Partial Replacement for Sand in Cement Mortar for a Sustainable Environment*. **The eurasia proceedings of science, technology, engineering & mathematics**. [S. l.], v. 28, pp 259-276, 2024, doi 10.55549/epstem.1521842.

HOLANDA, D. K. S. L. *et al.* *Light Steel Frame: Uma Revisão Da Literatura*. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**. [S. l.], v. 9, n. 7, p. 149–156, 2023, doi 10.51891/rease.v9i7.10557.

HONG, S-H. *et al.* *Evaluation of Flexural Strength of High-Strength Lightweight Cement Composites containing Carbon Nanotubes*. **Korean Society of Hazard Mitigation**. [S. l.], v. 23, n. 4, p. 1-9, 2023, doi 10.9798/kosham.2023.23.4.1.

IGIBAH, C. E.; AMU, O. O.; ADERINOLA, O. S. *Geopolymer Stabilization as Novel Technique of Reducing Carbon Dioxide Emissions*. **Scientific Review**. [S. l.], v. 8, n. 83, p. 42–50, 2022, doi 10.1016/j.job.2021.103698.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Technical Report. ISO/TR 21960:2020. Plastics — Environmental aspects - State of knowledge and methodologies*. Geneva: ISO, 2020.

KANG, X.; LI, S. lin; MA, X. ying. *Molecular insights into the microstructure, dynamics, wettability and mechanical properties of sodium aluminum silicate hydrate with saturated nanopores*. **Computational Materials Science**, [S. l.], v. 233, n. 112733, 2024, doi 10.1016/j.commat.2023.112733.

KHEMAISSIA, S. *et al.* *Synthesis of zeolite type A from metakaolin obtained by thermal treatment of kaolin: Textural and BB41 dye adsorption experimental design studies*. **Separation Science and Technology**. [S. l.], v. 60(2), p. 197–219, 2024, doi 10.1080/01496395.2024.2426021

KIM, G. *et al.* *Impact of interatomic structural characteristics of aluminosilicate hydrate on the mechanical properties of metakaolin-based geopolymer*. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 411, n. 134529, 2024, doi 10.1016/j.conbuildmat.2023.134529.

KIVENTERÄ, J. *et al.* *Mine tailings as a raw material in alkali activation: A review*. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Material**. [S. l.], v. 27, n. 8, 2020, doi 10.1007/s12613-020-2129-6.

KOHOUT J. *et al.* *Effect of Aluminosilicates' Particle Size Distribution on the Microstructural and Mechanical Properties of Metakaolinite-Based Geopolymers.* **Materials.** [S. l.], v. 16, n. 5008, 2023, doi 10.3390/ma16145008.

KUNTHAWATWONG, R. *et al.* *Performance of Geopolymer Mortar Containing PVC Plastic Waste from Bottle Labels at Normal and Elevated Temperatures.* **Buildings.** [S. l.], v. 13, n. 1031, 2023, doi 10.3390/buildings13041031.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. Agregados para a Construção Civil. **Sumário Mineral do Brasil.** Departamento Nacional de Produção Mineral. [S. l.], n. 11, p. 602–635, 2013.

LEAL FILHO, W. *et al.* *The Unsustainable Use of Sand: Reporting on a Global Problem.* **Sustainability.** [S. l.], v. 13, n3356, 2021, doi 10.3390/su13063356.

LI Yingjie *et al.* *Towards improved flexural behavior of plastic-based mortars: An experimental and modeling study on waste material incorporation.* **Materials Today Communications.** [S. l.], v. 40, n. 109391, 2024, doi 10.1016/j.mtcomm.2024.109391.

LI Yefan *et al.* *The Influence of Particle Size and Calcium Content on Performance Characteristics of Metakaolin- and Fly-Ash-Based Geopolymer Gels.* **Gels,** [S. l.], v. 10, n.639, 2024, doi 10.3390/gels10100639.

LIEW, Y. M. *Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review.* **Progress in Materials Science.** [S. l.], v. 83, p. 595–629, 2016, doi 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002

LINHARES JUNIOR, J. A. *et al.* *Influence of processing parameters variation on the development of geopolymeric ceramic blocks with calcined kaolinite clay.* **Case Studies in Construction Materials.** [S. l.]: v. 16, n. e00897, 2022, doi 10.1016/j.cscm.2022.e00897.

LONGHI, M. A. *et al.* *Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation.* **Composites B.** [S. l.], v.182, n.107671, 2020, doi 10.1016/j.compositesb.2019.107671.

LONGHI, M. A. *et al.* *Kaolin mining waste to produce geopolymers: Physicomechanical properties and susceptibility to efflorescence formation.* **Case Studies in Construction Materials.** [S. l.], v. 16, n. e00846, 2022, doi 10.1016/j.cscm.2021.e00846.

LOPES, L. F. **Materiais de Construção Civil.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017, 192 p. ISBN 978-85-522-0191-5.

LUZ, A. *et al.* **11. Caulim.** Rochas e Minerais Industriais – CETEM, v. 2, p. 231-262, 2005. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1047/1/11.Argila-CAULIM%20ok.pdf>. Acesso em: 03/02/2024.

MAHAJAN, T.; RUPALI, S.; MOHANTY, A. *Environmental concern, leachability and leaching modelling of fly ash and microbes: State-of-the-art review.* **Innovative Infrastructure Solutions,** [s. l.], v. 7, n. 19, 2022, doi 10.1007/s41062-021-00619-5.

MARIANO, T. E. *et al.* Polietileno de baixa densidade (PEBD): análise das propriedades mecânicas do concreto com substituição parcial do agregado miúdo. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**. [S. l.], v. 3, n. 3, 2022, doi 10.47820/recima21.v3i3.1271.

MARUOKA, L. M. A. *et al.* Effect of thermal annealing on kaolin from the Amazon region, aiming at the production of geopolymer. **Journal of Materials Research and Technology-Jmr&T**. [S. l.]: v. 25, p. 2471-2485, 2023, doi 10.1016/j.jmrt.2023.06.105.

MEHSAS B. *et al.* Development of supplementary cementitious materials from Algerian kaolin: elaboration of metakaolin and assessment of pozzolanicity. **Innovative Infrastructure Solutions**. [S. l.], v. 6, n. 50, 2021, doi 10.1007/s41062-020-00444-2.

MENG, T. *et al.* Analysis of Influencing Factors on Solid Waste Generation of Public Buildings in Tropical Monsoon Climate Region. **Buildings**. [S. l.], v. 14, n. 513, 2024, doi 10.3390/buildings14020513.

METINAL, Y. B.; AYALP, G. G. Underlying and ranking factors contributing to construction waste generation in the construction industry. **Proceedings of International Structural Engineering and Construction**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 1–6, 2024, doi 10.14455/ISEC.2024.11(2).AAE-11.

MOYA, J. S. *et al.* Significance of the formation of pentahedral aluminum in the reactivity of calcined kaolin/metakaolin and its applications. **Ceramics International**. [S. l.], v. 50, pt. B, p. 1329-1340, 2024, doi 10.1016/j.ceramint.2023.10.304.

NANA, A. *et al.* Mechanical Properties and Microstructure of a Metakaolin-Based Inorganic Polymer Mortar Reinforced with Quartz Sand. **Silicon**. [S. l.]: v. 14, p. 263–274, 2020, doi 10.1007/S12633-020-00816-4.

NEUPANE, K. *Evaluation of environmental sustainability of one-part geopolymer binder concrete*. **Cleaner Materials**. [S. l.]: v. 6, n. 2, n. 100138, 2022, doi 10.1016/j.clema.2022.100138.

NEVES, K. P. L.; MELO FILHO, J. A. **Produção de metacaulinita a partir de caulim da região de Presidente Figueiredo, AM**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC'2018). Maceió, 2018.

NICOLINI, L. B. **Avaliação da durabilidade e aplicabilidade de argamassa geopolimérica à base de metacaulim em reparos de elementos de concreto armado**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

NUNES, K. R. A; MAHLER, C. F. *Construction & Demolition Waste and Circular Economy: The Case Study of a Brazilian City*. **Recent Progress in Materials**. [S. l.]: v. 6(4), n. 029, 2024, doi 10.21926/rpm.2404029.

OHEMENG, E. A.; OKOLU, S. O. *Strength prediction model for cement mortar made with waste LDPE plastic as fine aggregate*. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**. [S. l.], v.8, p. 228-243, 2019, doi 10.1080/21650373.2019.1625826.

OLIVEIRA, L. B. *et al.* Durability of geopolymers with industrial waste. **Case Studies in Construction Materials**. [S. l], v. 16, n. e00839, 2022, doi 10.1016/j.cscm.2021.e00839.

OLIVEIRA, L.; RESENDE, M. Chapas cimentícias para uso em *Light Steel Framing*. **3º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos**. [S. l], n. E0190XXX-1, p. 1–6, 2021.

PAVLÍKOVÁ, M. *et al.* Ternary Blended Binder for Production of a Novel Type of Lightweight Repair Mortar. **Materials**. [S. l], v. 12, n. 996, 2019, doi 10.3390/ma12060996.

PHAM, N. T-H. Characterization of Low-Density Polyethylene and LDPE-Based/Ethylene-Vinyl Acetate with Medium Content of Vinyl Acetate. **Polymers**, [S. l], v.13, n. 2352, 2021, doi 10.3390/polym13142352.

PRASANPHAN S. *et al.* ^{29}Si and ^{27}Al NMR study of the structural transformation of calcined kaolin residue-based geopolymer using low alkali activator content for sustainable construction materials. **Journal of Building Engineering**. [S. l], v. 70, n. 106332, 2023, doi 10.1016/j.jobe.2023.106332.

PERKINS, L. *et al.* The Use of Recycled and Secondary Aggregates to Achieve a Circular Economy within Geotechnical Engineering. **Geotechnics**. [S. l], v. 1, p. 416–438, 2021, doi 10.3390/geotechnics1020020.

PIKOŃ, K. *et al.* Raw and Pre-Treated Styrene Butadiene Rubber (SBR) Dust as a Partial Replacement for Natural Sand in Mortars. **Materials**. [S. l], v. 17, n. 441, 2024, doi 10.3390/ma17020441.

POH, L. *et al.* Characterization of industrial low-density polyethylene: a thermal, dynamic mechanical, and rheological investigation. **Rheologica Acta**, [S. l], v. 61, p. 701-720, 2022, doi 10.1007/s00397-022-01360-1.

PONOMAR, V. *et al.* Revisiting alkali-activated and sodium silicate-based materials in the early works of Glukhovsky. **Construction and Building Materials**. [S. l], v. 398, n. 132474, 2023, doi 10.1016/j.conbuildmat.2023.132474.

PILZ, T. L. *et al.* Cement bonded for use in popular housing: a systematic review of the literature. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**. [S. l], v. 6, n. 1, 2020, doi 10.18540/jcecvl6iss1pp0056-0062.

RASHAD, A. M. Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer – An overview. **Construction and Building Materials**. [S. l], v. 41, p. 751–765, 2013, doi 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.030.

REIS, E. P. C. **Estudo da ativação alcalina do resíduo de concreto reciclado**. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia das Construções), Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.

RENTIER, E.; CAMMERAAT, L. *The environmental impacts of river sand mining*.

Science of The Total Environment. [S. l.], v. 838, n. 155877, 2022, doi 10.1016/j.scitotenv.2022.155877.

REVISTA EXAME. **Resíduos reciclados se transformam em revestimentos na construção civil**. 2022. Disponível em: <https://exame.com/negocios/residuos-recicladoss-construcao-civil/>. Acesso em: 05/03/2024.

ROŽEK, P.; KRÓL, M.; MOZGAWA, W. *Geopolymer-zeolite composites: A review*. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 230, p. 557–579, 2019, doi 10.1016/j.jclepro.2019.05.152.

RUKAVINA, M. J. *et al*. *Development of Lightweight Steel Framed Construction Systems for Nearly-Zero Energy Buildings*. *Buildings*. [S. l.], v. 12, n. 929, 2022, doi 10.3390/buildings12070929.

SAMBUCCI, M.; SIBAI, A.; VALENTE, M. *Recent Advances in Geopolymer Technology. A Potential Eco-Friendly Solution in the Construction Materials Industry: A Review*. *Composites Science*. [S. l.], v. 5, n. 109, 2021, doi 10.3390/jcs5040109.

SANTOS, T. A.; CILLA, M. S.; RIBEIRO, D. V. *Use of asbestos cement tile waste (ACW) as mineralizer in the production of Portland cement with low CO₂ emission and lower energy consumption*. *Journal of Cleaner Production*. [S. l.], v. 335. N. 130061, 2022, doi 10.1016/j.jclepro.2021.130061.

SHILAR, F. A. *et al*. *Molarity activity effect on mechanical and microstructure properties of geopolymer concrete: A review*. *Case Studies in Construction Materials*. [S. l.], v. 16, n. e01014, 2022, doi 10.1016/j.cscm.2022.e01014.

SIKORA, S. *et al*. *Formation of geopolymeric materials properties depending on the molar modules of SiO₂/Al₂O₃ and SiO₂/Na₂O*. *Cement Wapno Beton*, [S. l.], v. 27 (2), p. 115-125, 2022, doi 10.32047/CWB.2022.27.2.3.

SILVA, B. R. *et al*. *Desenvolvimento de argamassas de reboco com a incorporação de caulim*. *Perspectiva Ciência e Tecnologia*. [S. l.], v.13, p. 74-83, 2021, doi 10.22407/1984-5693.

SILVA, M. W. M. **Placas cimentícias produzidas com a incorporação de pérolas de poliestireno expandido (EPS)**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

SILVA NETO, J. A. **Influência da concentração alcalina (NaOH) e razão dos reagentes alcalinos (NA₂SIO₃/NaOH) em concreto Álcali-ativado de base metacaulim**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

SOARES, I. *et al*. *Study of Metakaolinite Geopolymeric Mortar with PlasticWaste Replacing the Sand: Effects on the Mechanical Properties, Microstructure, and Efflorescence*. *Materials*. [S. l.], v.15, n. 8626, 2022, doi 10.3390/ma15238626.

SOARES, I. H. L. **Estudo da argamassa de geopolímero para fabricação de placas cimentícias: características físicas, mecânicas, químicas e desempenho ambiental**. 2022. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Materiais), Faculdade de Ciências - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2022.

SOARES, I. H. L. Estudo das propriedades mecânicas e ciclo da vida em placas cimentícias de geopolímero com resíduos plásticos substituindo a areia. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**. [S. l.], v. 22, n. 9, p. 1–18, 2024, doi 10.55905/oelv22n9-196.

SOARES, P. M.; SOUSA, L. V. M. *Energy transition and public policies in renewable energy in Brazil*. **International Symposium on Energy: Energy Transition, Green Hydrogen and Sustainable Industry**, [S. l.]: v. 1, n. 1, 2023, doi 10.55592/ISE.2023.9478205.

SOUSA, B. B. *et al.* *Synthesis and characterization of sodalite-type zeolite obtained from kaolin waste*. **Cerâmica**. [S. l.], v. 66, p. 404-412, 2020, doi 10.1590/0366-69132020663802758.

SOUSA, R. M. L. *et al.* *Quality study of the small aggregate used in civil construction*. **Research, Society and Development**. [S. l.], v. 10, n. 14, 2021, doi 10.33448/rsd-v10i14.22295.

SPECK, J. A. **Análise do desempenho de placas cimentícias através da adição de fibras e telas, visando a redução de deformações térmicas e patologias**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

TANG, S. *et al.* *Thermal Catalytic-Cracking Low-Density Polyethylene Waste by Metakaolin-Based Geopolymer NaA Microsphere*. **Molecules**. [S. l.], v. 27, n. 2557, 2022, doi 10.3390/molecules27082557.

TARAZONA, N. A. *et al.* *Opportunities and challenges for integrating the development of sustainable polymer materials within an international circular (bio)economy concept*. **MRS Energy & Sustainability**. [S. l.]: v. 9, p. 28-34, 2022, doi 10.1557/s43581-021-00015-7.

THOMAS, T.; PRAVEEN, A. *Regulating natural resource consumption in the construction sector using emergy model*. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S. l.], v. 1114, n. 1, p. 012033, 2021, doi 10.1088/1757-899X/1114/1/012033.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Not just another brick in the wall – The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast*. **Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025**. Paris, n. 1, p. 1-94, 2025, doi 10.59117/20.500.11822/47214.

VERDOLOTTI, L. *et al.* *Recycling and Recovery of PE-PP-PET-based Fiber Polymeric Wastes as Aggregate Replacement in Lightweight Mortar: Evaluation of Environmental*

Friendly Application. Environmental Progress & Sustainable Energy. [S. l.], v. 33, n. 4, 2014, doi 10.1002/ep.11921.

VERGARA, L. A.; COLORADO, H. A. *Additive manufacturing of Portland cement pastes with additions of kaolin, superplastificant and calcium carbonate. Construction and Bulding Materials. [S. l.], v. 248, n. 118669, 2020, doi 10.1016/j.conbuildmat.2020.118669*

VERMA, S. *et al. Exploring brine sludge and fly ash waste for making nontoxic radiation shielding materials. In: Advanced Materials from Recycled Waste. [S. l.]: p. 27–44, 2023, doi 10.1016/B978-0-323-85604-1.00017-2*

VIJERATHNE, D.; WAHALA, S.; ILLANKOON, C. *Impact of Crushed Natural Aggregate on Environmental Footprint of the Construction Industry: Enhancing Sustainability in Aggregate Production. Buildings. [S. l.], v. 14, n. 2770, 2024, doi 10.3390/buildings14092770.*

WORLD POPULATION REVIEW. *Plastic Pollution by Country 2024. 2024. Disponível em: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/plastic-pollution-by-country>. Acesso em: 21/02/2024.*

WHITE, C. E. *et al. Density Functional Modeling of the Local Structure of Kaolinite Subjected to Thermal Dehydroxylation. Journal of Physical Chemistry A. [S. l.], v. 114, n. 14, 2010, doi 10.1021/jp911108d.*

YANG, M. *et al. Advancing environmental sustainability in construction through innovative low-carbon, high-performance cement-based composites: A review. Materials Today Sustainability. [S. l.], v. 26, n. 100712, 2024. doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100712.*

ZHANG, P. *et al. Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders - A review. Journal of Cleaner Production. [S. l.], v. 258, n. 120896, 2020, doi 10.1016/j.jclepro.2020.120896.*

ZHAO, Y. *Research on the Influencing Factors of CO₂ Emission Intensity in Cement Industry. Academic Journal of Management and Social Sciences. [S. l.], v. 6, n. 1, p. 92-96, 2024, doi 10.54097/yvp3kc89.*

ZHENG, S. *et al. Experimental investigation on the effect of nano silica fume on physical properties and microstructural characteristics of lightweight cement slurry. Construction and Building Materials. [S. l.], v. 329, n. 127172, 2022, doi 10.1016/j.conbuildmat.2022.127172.*

ZHONG, X. *et al. Increasing material efficiencies of buildings to address the global sand crisis. Nature Sustainability. [S. l.], v. 5, p. 389–392, 2022, doi 10.1038/s41893-022-00857-0.*