



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



Giselle Cristina de Sá

**Estudo de substituição parcial do cimento Portland por
resíduos de PET em argamassas**

Ouro Preto
2026

Giselle Cristina de Sá

Estudo de substituição parcial do cimento Portland por
resíduos de PET em argamassas

Trabalho Final de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do Grau de
Engenheira Civil na Universidade Federal de Ouro
Preto

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge B.i Silva

Coorientador: Dr. José Agenor Carvalho Júnior

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S111e Sa, Giselle Cristina de.

Estudo de substituição parcial do cimento Portland por resíduos de PET em argamassas. [manuscrito] / Giselle Cristina de Sa. - 2026.
61 f.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.

Coorientador: Dr. José Agenor Carvalho Júnior.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Argamassa. 2. Politereftalato de etileno (PET). 3. Cimento Portland. 4. Sustentabilidade. 5. materiais cimentícios suplementares (SCMs). I. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. II. Carvalho Júnior, José Agenor. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Giselle Cristina de Sá

Estudo da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de PET em argamassas

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil

Aprovada em 28 de julho de 2026

Membros da banca

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. José Agenor Carvalho Júnior - Co-orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Ma. Gizelle Aguiar Dias - Universidade Federal de Ouro Preto
Me. Christopher Antonio Martins de Moura - Universidade Federal do Mato Grosso

Guilherme Jorge Brigolini Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/setembro/2026



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Jorge Brigolini Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/09/2026, às 19:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1193643** e o código CRC **4734FF8B**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Grupo Ative pelo acolhimento e pela oportunidade de realizar os ensaios experimentais. Agradeço, de forma especial, ao meu orientador Guilherme Jorge Brigolini Silva e ao coorientador José Agenor Carvalho, pela orientação, disponibilidade e contribuições acadêmicas ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Agradeço também aos meus amigos e familiares, pelo apoio constante, incentivo e compreensão, que foram indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A construção civil é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono, gerando diversos impactos ambientais; nesse contexto, procura-se desenvolver materiais cimentícios alternativos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de politereftalato de etileno (PET) em argamassas, analisando seus efeitos sobre propriedades físicas e mecânicas do material. A metodologia consistiu na produção de argamassas com teores de substituição de cimento em massa por 0%, 5% e 10% de PET. Foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido, incluindo análise de trabalhabilidade, resistência à compressão aos 7 e 28 dias, absorção de água por capilaridade e por imersão, além da caracterização do material por granulometria, massa específica e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicaram que a incorporação de PET promoveu redução da resistência à compressão, associada à natureza inerte do polímero e à menor aderência com a matriz cimentícia. Observou-se também influência na trabalhabilidade e no comportamento de absorção de água, relacionada à morfologia irregular e à baixa massa específica do material. A análise microestrutural evidenciou partículas heterogêneas e com potencial para aumento da porosidade do compósito. Apesar das limitações mecânicas, os resultados demonstram que, para baixos teores de substituição, o uso do PET pode ser viável em aplicações não estruturais, contribuindo para a redução do consumo de matérias-primas e para a destinação adequada de resíduos plásticos. Dessa forma, o estudo reforça o potencial do uso de PET em argamassas de revestimento como alternativa sustentável na construção civil.

Palavras-chave: Argamassa; PET; Substituição de cimento; Sustentabilidade; Materiais cimentícios.

ABSTRACT

The construction industry is one of the main sources of carbon dioxide emissions, causing various environmental impacts; in this context, efforts are being made to develop alternative cementitious materials. This study aimed to evaluate the feasibility of partially replacing Portland cement with polyethylene terephthalate (PET) waste in mortars, analyzing its effects on the material's physical and mechanical properties. The methodology consisted of producing mortars with cement mass replacement levels of 0%, 5%, and 10% PET. Tests were carried out in the fresh and hardened states, including workability analysis, compressive strength at 7 and 28 days, water absorption by capillarity and by immersion, as well as material characterization by particle size distribution, specific gravity, and scanning electron microscopy. The results indicated that PET incorporation led to a reduction in compressive strength, associated with the polymer's inert nature and lower adhesion to the cementitious matrix. An influence on workability and water absorption behavior was also observed, related to the material's irregular morphology and low specific gravity. Microstructural analysis revealed heterogeneous particles with potential to increase the composite's porosity. Despite the mechanical limitations, the results show that, at low replacement levels, the use of PET can be viable for non-structural applications, contributing to reduced consumption of raw materials and proper disposal of plastic waste. Thus, the study reinforces the potential use of PET in rendering mortars as a sustainable alternative in the construction industry.

Keywords: Mortar; PET; Cement replacement; Sustainability; Cementitious materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia geral dos ensaios.....	27
Figura 2 – Areia separada em frações granulométricas.....	29
Figura 3 – CP II-F.....	29
Figura 4 – Equipamento utilizado para pulverização do PET.....	30
Figura 5 – Pó de PET.....	31
Figura 6 – Moldagens.....	34
Figura 7 – Medição das dimensões do corpo de prova com paquímetro digital.....	35
Figura 8 – Rompimento do corpo de prova.....	35
Figura 9 – Corpos de prova em processo de resfriamento após secagem em estufa.....	37
Figura 10 – Corpos de prova submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade.....	37
Figura 11 – Pesagens dos corpos de provas.....	38
Figura 12 – Curva de distribuição granulométrica do PET.....	39
Figura 13 – Micrografia obtida pelo (MEV) do PET triturado.....	41
Figura 14 – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento.....	44
Figura 15 – Gráfico de Espalhamento x Traços.....	45
Figura 16 – Ensaio de espalhamento da argamassa com 10% de PET na primeira moldagem.....	46
Figura 17 – Aspecto das argamassas no ensaio de espalhamento.....	46
Figura 18- Resistência à compressão da argamassa referentes às moldagens 1 e 2 aos 7 e 28 dias.....	48
Figura 19 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo.....	50
Figura 20 – Absorção de água por imersão.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais formas de incorporação do PET em matrizes cimentícias e resultados reportados na literatura.....	22
Tabela 2 – Tolerâncias das frações granulométricas.....	28
Tabela 3 – Exemplo de registro e cálculo da resistência à compressão.....	36
Tabela 4 – Resultados viscosímetro.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PET – Polietileno tereftalato

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP II-F – Cimento Portland composto com fíler calcário

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

a/c – Relação água/cimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo geral.....	17
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1 Cimento CII-F.....	18
2.2 Argamassa de Cimento CP2-F.....	19
2.3 Aplicação do PET em Matrizes Cimentícias.....	20
2.4 Propriedades das argamassas.....	23
2.4.1 Comportamento reológico no estado fresco.....	24
2.4.2 Espalhamento.....	24
2.4.3 Resistência à compressão.....	24
2.4.4 Absorção de água.....	25
2.4.5 Microestrutura.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Materiais.....	28
3.1.1 Areia normal.....	28
3.1.2 Cimento.....	29
3.1.3 PET.....	30
3.2 Métodos.....	31
3.2.1 Ensaio de granulometria.....	31
3.2.2 Determinação da massa específica.....	31
3.2.3 Microestrutura.....	32
3.2.4 Ensaio de viscosidade.....	32
3.2.5 Ensaio de espalhamento.....	33
3.2.6 Moldagem dos corpos de prova.....	33
3.2.7 Ensaio de compressão dos corpos de prova.....	35
3.2.8 Ensaio de absorção por capilaridade.....	36
3.2.9 Ensaio de absorção por imersão.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.1 Resultado ensaio granulométrico do PET.....	38
4.2 Massa específica.....	40
4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	40
4.4 Viscosidade de pastas cimentícias com substituição parcial de PET.....	42
4.5 Resultado do ensaio de espalhamento.....	45
4.6 Resultados do ensaio de compressão.....	47
4.7 Ensaio de absorção por capilaridade.....	49
4.8 Resultados ensaio de absorção por imersão.....	51
5 CONCLUSÕES.....	52
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas sete décadas, a produção e o consumo de materiais poliméricos apresentaram crescimento contínuo em escala global. A produção mundial de plásticos atingiu aproximadamente 400,3 milhões de toneladas em 2022 (Plastics Europe, 2023). Apesar de sua ampla utilização, estima-se que cerca de 75% de todo o plástico já produzido tenha se tornado resíduo, gerando impactos ambientais significativos (Geyer; Jambeck; Law, 2017). Esse avanço está associado à versatilidade, ao baixo custo relativo de produção e às propriedades físico-químicas dos plásticos, que favorecem sua aplicação em embalagens, construção civil, indústria automotiva, setor eletroeletrônico e bens de consumo (Unctad, 2025; OECD, 2022; Plastics Europe, 2020).

Além do crescimento na produção anual, estima-se que a produção acumulada de plásticos continue crescendo em ritmo acelerado, acompanhada por um aumento na geração de resíduos, que mais do que dobrou desde o ano 2000 (OECD, 2022). Esse crescimento superou o observado para a maioria dos materiais antropogênicos, com exceção do aço e do cimento Portland, que também apresentam ampla utilização na construção civil.

Os polímeros apresentam propriedades como leveza, durabilidade e versatilidade, que favorecem sua ampla aplicação em diversos setores, especialmente em embalagens (Plastics Europe, 2020). No entanto, a maior parte dessas embalagens é projetada para ser usada uma vez e, em seguida, descartada pós-consumo. Os principais tipos de plásticos utilizados em embalagens apresentam elevada resistência à biodegradação, o que dificulta sua eliminação definitiva do meio ambiente e contribui para o acúmulo de resíduos (Barnes *et al.*, 2009; Geyer *et al.*, 2017; Oecd, 2022).

O aumento da produção de plásticos resultou, consequentemente, na intensificação da geração de resíduos pós-consumo ao longo das últimas décadas. A maioria destes resíduos entra rapidamente na cadeia de descarte, com um volume acumulado de resíduos plásticos gerado no mundo chegando a 6,3 bilhões de toneladas até 2015 (Geyer; Jambeck; Law, 2017). Desse total, cerca de 9% foram reciclados, 12% incinerados e 79% acumulados em aterros sanitários ou no ambiente natural (Geyer *et al.*, 2017). Mantidas as tendências observadas de produção e gestão de resíduos, projeta-se que aproximadamente 12 bilhões de toneladas de resíduos plásticos estarão acumulados em aterros ou no meio ambiente até 2050 (Geyer, Jambeck; Law, 2017; OECD, 2022).

Devido ao elevado poder calorífico dos plásticos, a incineração de resíduos possibilita o aproveitamento energético (Hopewell; Dvorak; Kosior, 2009). No entanto, a incineração

apresenta limitações ambientais significativas. A queima resulta na formação de cinzas tóxicas e lança compostos químicos perigosos e dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, não eliminando os impactos ambientais causados pelo plástico (Lebreton *et al.*, 2017). Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de alternativas que propiciem melhor descarte de resíduos plásticos e reduzam seu custo sociocultural, além de promoverem sua reutilização.

O Polietileno Tereftalato (PET) destaca-se como um dos polímeros mais presentes nos resíduos sólidos urbanos devido ao seu uso predominante em embalagens de bebidas e alimentos (Plastics Europe, 2020). Apesar de ser um dos polímeros mais reciclados, também apresenta alta resistência à degradação, podendo persistir na natureza por aproximadamente 100 a 400 anos (Modro, 2009; Duarte, 2014). A baixa taxa de reaproveitamento de resíduos plásticos mantém elevada a demanda por matérias-primas virgens, majoritariamente derivadas de combustíveis fósseis, além de ampliar o volume destinado à disposição final em aterros ou no ambiente natural (Hopewell; Dvorak; Kosior, 2009; OECD, 2022). Esse cenário contribui para o agravamento dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos plásticos, incluindo emissões de gases de efeito estufa, esgotamento de recursos naturais e acúmulo de resíduos (Geyer, Jambeck; Law, 2017; OECD, 2022).

Além da problemática dos resíduos plásticos, a indústria da construção civil também está entre os setores que mais geram impactos ambientais (Duarte, 2014; Grigoriadis *et al.*, 2023). O concreto é o material mais utilizado no planeta, perdendo apenas para a água em termos de consumo global (WBCSD, 2018). Estima-se que a produção global de concreto tenha atingido aproximadamente 14 bilhões de metros cúbicos em 2020, evidenciando sua ampla utilização em escala global (Global Cement And Concrete Association, 2023).

A produção de cimento Portland envolve o uso de altas temperaturas da ordem de 1450°C para a calcinação de matérias-primas em fornos rotativos, o que leva a um alto consumo de energia e emissões de CO₂ (Mansur, 2007; Santos, 2014; Neville, 2016). Estima-se que a produção de 1 kg de cimento gere aproximadamente 1 kg de dióxido de carbono na atmosfera, e a indústria cimenteira responde por 5 a 8% das emissões globais desse gás (Rafeet *et al.*, 2014). Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de estratégias para reduzir o consumo de cimento e minimizar outros impactos adversos associados à produção de cimento.

Sendo assim, a utilização de resíduos plásticos como matéria-prima alternativa em materiais cimentícios apresenta-se como uma solução atrativa para o destino final desses resíduos e para a redução do consumo de matérias-primas virgens (Gu; Ozbakkaloglu, 2016).

Ao contrário das aplicações tradicionais, como embalagens, as exigências estéticas são menos relevantes na produção de concreto e argamassas: assim, existe a possibilidade de uma maior incorporação de materiais reciclados nestes compósitos (European Commission, 2018).

Diversos estudos têm investigado a incorporação de PET reciclável em concreto e argamassa, seja como substituto parcial de agregados naturais (Albano *et al.*, 2009; Saikia; De Brito, 2014; Campanhão *et al.*, 2022) ou como substituto parcial do cimento Portland (Mendonça *et al.*, 2021; Crippa *et al.*, 2024), conforme revisado por Askar *et al.* (2023) e Frigione (2010).

O PET tem sido empregado como agregado leve, devido à sua baixa massa específica, o que pode ser vantajoso em determinadas aplicações na construção civil (Silva *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2005). Contudo, a adição de resíduos plásticos altera algumas propriedades físicas como a massa específica, a absorção de água, a porosidade e a trabalhabilidade, além de propriedades mecânicas, como as resistências à compressão, dos materiais produzidos (Ribas *et al.*, 2019; Babafemi *et al.*, 2018).

A literatura demonstra que a incorporação de PET em argamassas e concretos pode resultar em menor resistência à compressão, maior teor de ar incorporado e menor trabalhabilidade, dependendo da taxa de substituição (Marzouk, 2007). Por outro lado, há também diminuição do peso específico, módulo de elasticidade e aumento da ductilidade dos compósitos, o que indica que os efeitos da incorporação do PET não se restringem aos aspectos ambientais, influenciando diretamente o desempenho físico e mecânico dos compósitos cimentícios (Mello *et al.*, 2011).

Dentro dessa perspectiva, destaca-se o caso das argamassas, uma vez que apresentam funções fundamentais nos sistemas construtivos, ocorrendo, sobretudo, como elementos de ligação, regularização e proteção das superfícies. Conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas são definidas como uma “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento”. Essas propriedades que impactam diretamente no desempenho desse material nas diversas aplicações na construção civil (Santos, 2014).

A literatura demonstra que a substituição parcial do cimento por PET triturado pode alterar diversas propriedades das argamassas (Mendonça, 2021; Khan *et al.*, 2022; Waysal *et al.*, 2022). Entre elas, destacam-se a resistência mecânica, a absorção de água, a porosidade e o comportamento no estado endurecido (Modro *et al.*, 2009). A incorporação de plásticos, como o PET, pode influenciar a interação com a matriz cimentícia, uma vez que materiais

poliméricos apresentam características como baixa afinidade com a água e superfície lisa, o que pode afetar a aderência e a microestrutura do compósito (Abu-Saleem *et al.*, 2021). Dessa forma, a definição de teores adequados de substituição e o estudo detalhado das propriedades resultantes tornam-se essenciais para avaliar a viabilidade dessa alternativa.

Diante desse cenário, torna-se fundamental o desenvolvimento de soluções que integrem a gestão de resíduos plásticos à cadeia produtiva da construção civil. A incorporação do pó de PET em matrizes cimentícias apresenta-se como uma alternativa promissora, pois alia a destinação adequada de resíduos à redução do consumo de matérias-primas virgens, contribuindo para a sustentabilidade do setor.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe o estudo da substituição de resíduos de PET em argamassas de cimento Portland, com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica dessa incorporação. Para isso, busca-se analisar os efeitos da substituição parcial do cimento por partículas de PET sobre as propriedades físicas e mecânicas da argamassa, bem como investigar o potencial do uso do PET como alternativa sustentável, contribuindo para a diminuição do uso de matérias-primas virgens e para a valorização de resíduos poliméricos

1.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de PET em argamassas e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas do material.

1.1.1 Objetivos específicos

Caracterizar o pó de PET quanto à granulometria, massa específica e morfologia.

Avaliar a influência da substituição parcial do cimento por PET no comportamento reológico das argamassas.

Analisar os efeitos da incorporação de PET na resistência à compressão e na absorção de água.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cimento CII-F

De acordo com a NBR 16697, o CP II-F é um cimento Portland composto com a adição de material carbonático finamente moído, denominado filer, em proporção de 11 a 25% (ABNT, 2018). O CP II-F é constituído pela mistura de clínquer, gesso e material carbonático finamente moído, denominado filer calcário, conforme especificado pela NBR 16697. No Brasil, a aplicação do CP II-F é muito frequente devido ao seu bom desempenho em argamassas, concretos convencionais e componentes de alvenaria não estrutural, além de apresentar boa trabalhabilidade e baixo custo (Mendes; Piovesan, 2020, Mehta; Monteiro, 2014).

Dada a sua ampla utilização no Brasil, especialmente fora do setor habitacional, o cimento CP II-F destaca-se por sua versatilidade e por apresentar menor consumo de clínquer em comparação ao cimento Portland comum, contribuindo para a redução da pegada de carbono (Mansur, 2007; Scrivener *et al.*, 2018; SNIC, 2024). Tendo em vista que a fabricação de uma tonelada de cimento libera aproximadamente uma tonelada de CO₂ na atmosfera (GRIGORIADIS *et al.*, 2023), sendo o clínquer o componente de maior intensidade energética e emissiva, justifica-se o uso de materiais substitutos como o filer calcário (Scrivener *et al.*, 2018). Dessa forma, não apenas o consumo energético do processo produtivo é reduzido, como também ocorre a diminuição das emissões de CO₂.

Conforme a NBR 16697, o filer deve se destacar pela elevada finura e por ser quimicamente estável, características que promovem o empacotamento de partículas e aperfeiçoam a trabalhabilidade da mistura. Assim, o material apresenta um bom comportamento em argamassa de assentamento e revestimento bem como em concreto de baixa e média resistência (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2011).

Pesquisas relacionadas ao desenvolvimento dos compósitos cimentícios com polímeros, fibras e resíduos industriais, ainda utilizam esse tipo de cimento, devido à sua estabilidade e disponibilidade no mercado, conforme relatado na literatura sobre compósitos cimentícios com resíduos poliméricos conforme apontado por Wang *et al.* (2024) e Crippa *et al.* (2024).

Em conclusão, o CP II-F é uma solução amplamente utilizada na construção civil, combinando alto desempenho técnico e aspectos tecnológicos, ao mesmo tempo que reduz o

impacto no meio ambiente, sendo adequado para pesquisas sobre a modificação de argamassas com aditivos minerais e poliméricos.

2.2 Argamassa de Cimento CP2-F

A argamassa produzida com cimento CP II-F é um compósito de cimento Portland composto com filer calcário, agregado miúdo, água e, ocasionalmente, aditivos e adições minerais. De acordo com a NBR 13281, a argamassa é uma mistura homogênea cuja principal função é garantir aderência, preenchimento e regularização, tendo adequado comportamento reológico no estado fresco e apreciável resistência mecânica após endurecimento. A presença do filer calcário no CP II-F possui implicação direta nas reações de hidratação e na microestrutura do compósito (Kumar *et al.*, 2017). Segundo Mehta e Monteiro (2014), os finos têm um papel importante como agentes nucleadores na formação de produtos hidratados e como material de preenchimento na matriz, logo reduzindo a porosidade capilar e melhorando a compacidade.

Os mecanismos de hidratação do CP II-F são semelhantes aos do cimento Portland, em geral, resultando na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2011). A presença do filer calcário pode acelerar as reações iniciais devido à maior área superficial, favorecendo a formação de produtos hidratados em estágios mais avançados (Lothenbach *et al.*, 2008). Segundo Neville (2011) as partículas de calcário atuam como sítios nucleadores do C-S-H, favorecendo as reações de hidratação do cimento e contribuindo para o desenvolvimento inicial da microestrutura da pasta. Além disso, a interação do filer com os aluminatos pode levar à formação de carboaluminatos, os quais podem contribuir para a estabilidade dimensional do sistema.

A granulometria do material de enchimento exerce influência significativa no desempenho da argamassa, afetando propriedades como trabalhabilidade, permeabilidade e resistência mecânica (Mehta; Monteiro, 2014; Kumar *et al.*, 2017). De acordo com a ABNT NBR 7211:2009, uma distribuição granulométrica adequada contribui para a redução da porosidade e para a formação de uma microestrutura mais densa.

Segundo Santos (2014), uma distribuição apropriada do tamanho das partículas do material de enchimento melhora a coesão da argamassa, favorecendo a formação de matrizes mais impermeáveis, com maior resistência à compressão e menor absorção de água. Além disso, a relação água/cimento exerce forte influência nas propriedades da argamassa, sendo

que valores elevados aumentam a porosidade devido à presença de água não reagida na matriz cimentícia (Neville, 2011). Dessa forma, argamassas produzidas com cimento CP II-F podem apresentar melhor desempenho mecânico, em determinadas condições, devido ao efeito físico do material de enchimento.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a capacidade intrínseca do agregado fino e do próprio *filler* do cimento de preencher os vazios entre as partículas, melhorando o empacotamento e diminuindo a quantidade de pasta necessária para envolver os grãos, denominada de efeito *filler*, ajuda a diminuir a porosidade, a aumentar a durabilidade e a auxiliar a resistência mecânica de argamassas e concretos.

No contexto da modificação de compósitos cimentícios, a literatura aborda a utilização de polímeros como modificadores da ductilidade, da aderência e da absorção de água (Mello, 2011; Mansur, 2007; Hannawi *et al.*, 2010) . De acordo com Mendonça *et al.* (2021), a incorporação de polímeros na matriz cimentícia promove modificações reológicas no estado fresco e, no estado endurecido, forma uma rede polimérica que interage com a microestrutura da argamassa. Nesta pesquisa, o PET moído citado nos tópicos anteriores, conforme estudo de Mendonça *et al.*(2021), será utilizado como *filler* polimérico, atuando predominantemente como material inerte, sem contribuição reativa significativa, promovendo efeito físico de preenchimento e contribuindo para a redução da demanda de cimento.

Finalmente, alternativas sustentáveis para *filler* e ligante têm tido importância central, uma vez que têm sido propostas para mitigar os impactos no meio ambiente resultantes das atividades da indústria de cimentos (Scrivener; John; Gartner, 2018; Yang; Zhang; Yan, 2016) . Além disso, pesquisadores têm investigado materiais suplementares como cinzas volantes, metacaulim e resíduos poliméricos, como o PET, uma vez que têm demonstrado potencial tanto para reduzir as emissões de CO₂ quanto para reintroduzir resíduos no ciclo produtivo (Albatayneh; Akhtar, 2024). Sendo assim, a argamassa com CP II-F surge como um sistema flexível e adaptável cujo desempenho pode ser significativamente modificado em função de ajustes granulométricos, razão água/cimento (a/c), adição de *filler* mineral e polimérico, e estratégias para a substituição parcial do ligante, realçando a sua importância em um contexto onde é necessário integrá-lo em práticas construtivas mais sustentáveis.

2.3 Aplicação do PET em Matrizes Cimentícias

A crescente geração de resíduos plásticos e o descarte inadequado de embalagens pós-consumo, especialmente as de politereftalato de etileno (PET), têm motivado pesquisas voltadas à reciclagem e à valorização desse polímero em materiais de construção (Geyer *et al.*, 2017; Frigione, 2010; Gu; Ozbakkaloglu, 2016). As embalagens representam aproximadamente 40% do consumo global de plásticos, sendo o PET um dos principais polímeros empregados nesse segmento, o que contribui para sua elevada participação na composição dos resíduos sólidos urbanos (OECD, 2022). Nesse contexto, a incorporação de resíduos de PET em matrizes cimentícias apresenta-se como uma alternativa capaz de reduzir a destinação de resíduos aos aterros sanitários, diminuir a demanda por agregados naturais e, em determinadas aplicações, reduzir o consumo de cimento Portland, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis (Albatayneh; Akhtar, 2024).

A literatura demonstra que o PET pode ser incorporado às matrizes cimentícias de diferentes formas, atuando como substituto parcial de agregados miúdos (Choi *et al.*, 2005; Marzouk *et al.*, 2007), como fibras de reforço (Silva *et al.*, 2005; Revathi *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024) ou como material de preenchimento (filler), quando empregado na forma de partículas finamente moídas (Mendonça *et al.*, 2021; Khan *et al.*, 2022; Gonzaga, 2023). Além disso, alguns estudos relatam sua utilização como componente modificador da matriz cimentícia, promovendo alterações na microestrutura e no comportamento físico-mecânico do compósito (Frigione, 2010; Górak *et al.*, 2020; Uche *et al.*, 2023). Essas diferentes formas de incorporação influenciam diretamente as propriedades das argamassas e concretos, sendo seus efeitos dependentes do teor de substituição, da granulometria e da geometria das partículas.

Com o objetivo de sintetizar as principais estratégias de incorporação do PET em matrizes cimentícias e os resultados reportados na literatura, a Tabela 1 apresenta um panorama dos principais estudos encontrados, destacando a forma de utilização do polímero, os autores de referência e os efeitos observados sobre as propriedades dos compósitos cimentícios.

Tabela 1 – Incorporação do PET em matrizes cimentícias

Forma de Incorporação	Autores	Principais Resultados
Substituição de agregado miúdo	Choi et al. (2005/2009); Marzouk et al. (2007); Frigione (2010); Mello (2011); Ribas (2019); Albano et al. (2009); Uche et al. (2023)	Redução da densidade e produção de concretos leves; baixos teores mantêm desempenho satisfatório, enquanto teores elevados reduzem a resistência devido à baixa aderência do PET.
Fibras de PET	Silva et al. (2005); Revathi et al. (2023)	Aumento da ductilidade e da resistência à flexão; desempenho potencializado com sílica ativa.
Filler (substituição do cimento)	Mendonça et al. (2021); Khan et al. (2022)	Atua como material de preenchimento, porém tende a reduzir a resistência mecânica, dependendo do tratamento das partículas.
Agregados e modificações especiais	Górak et al. (2020); Duarte (2014); Chen et al. (2024); Gonzaga (2023)	O tratamento térmico melhora a resistência ao impacto balístico e a ondas de choque. esíduos de pirólise de PET podem melhorar propriedades reológicas e térmicas de pastas cimentícias.
Dosagem e reologia	Santos (2014); Paulino et al. (2025)	Desenvolvimento de modelos para otimização de traços e melhoria da trabalhabilidade.

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Entre as aplicações mais investigadas destaca-se a substituição parcial da areia por partículas de PET. Estudos realizados por Choi *et al.* (2005) e Marzouk *et al.* (2007) verificaram que essa substituição tende a reduzir a massa específica e a trabalhabilidade das misturas, aumentar o teor de ar incorporado e proporcionar maior capacidade de deformação dos compósitos. De forma semelhante, Albano *et al.* (2009) e Saikia e de Brito (2014) observaram que o tamanho e a forma das partículas plásticas exercem influência significativa sobre as propriedades mecânicas e reológicas do material, enquanto Hannawi *et al.* (2010) destacaram ganhos de tenacidade e absorção de energia em misturas contendo baixos teores de PET. Umasabor e Daniel (2020) verificaram que substituições de aproximadamente 5% podem promover melhorias na resistência à compressão em idades iniciais, enquanto teores mais elevados tendem a reduzir o desempenho mecânico devido à menor rigidez das partículas poliméricas quando comparadas aos agregados minerais.

Outra estratégia amplamente investigada consiste na utilização do PET finamente triturado como filler. Nessa condição, as partículas apresentam dimensões reduzidas e atuam principalmente como material de preenchimento, contribuindo para o melhor empacotamento da matriz cimentícia e alterando a distribuição dos poros (Mendonça *et al.*, 2021; Khan *et al.*, 2022; Gonzaga, 2023; Mello, 2011). Entretanto, por se tratar de um material essencialmente inerte em relação às reações de hidratação do cimento, sua incorporação em substituição parcial ao ligante pode ocasionar redução da resistência à compressão devido à diminuição da fração cimentante disponível (Frigione, 2010; Mendonça *et al.*, 2021; Crippa *et al.*, 2024; Modro *et al.*, 2009). Por outro lado, alguns estudos indicam que partículas finas de PET podem contribuir para a redução da retração hidráulica, da absorção de água e para maior

estabilidade volumétrica, desde que empregados teores adequados e granulometria compatível com o empacotamento da matriz (Umasabor; Daniel, 2020).

As propriedades mecânicas das matrizes cimentícias contendo PET dependem diretamente da forma de incorporação do polímero e da interação entre suas partículas e a pasta de cimento. Revisões realizadas por Uche *et al.* (2023) e Askar *et al.* (2023) demonstram que pequenas incorporações de PET promovem variações discretas nas resistências à compressão e à tração, enquanto Frigione (2010) observou aumento da ductilidade dos compósitos. Esses resultados podem estar relacionados às modificações na interface entre o PET e a matriz cimentícia, influenciadas pela degradação superficial do polímero em meio alcalino e pela aderência interfacial (SILVA *et al.*, 2005). Além disso, quando empregado na forma de fibras em conjunto com adições minerais, o PET pode contribuir para o aumento das resistências à tração, ao cisalhamento e à flexão, favorecendo o comportamento pós-fissuração dos compósitos (Revathi *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024).

Além dos efeitos sobre as propriedades mecânicas, a incorporação de PET pode influenciar aspectos relacionados à durabilidade. Frigione (2010) verificou que materiais cimentícios modificados com PET reciclado apresentaram redução da permeabilidade e aumento da resistência à abrasão. De forma semelhante, Saikia e de Brito (2012; 2014) destacam que o desempenho mecânico e a durabilidade dependem do teor incorporado e das características geométricas das partículas, sendo que substituições moderadas, geralmente inferiores a 10%, tendem a apresentar resultados mais satisfatórios, sobretudo para aplicações não estruturais.

2.4 Propriedades das argamassas

As propriedades das argamassas são fundamentais para a compreensão de seu comportamento nos estados fresco e endurecido, permitindo a previsão de desempenho, durabilidade e aplicabilidade. Essas propriedades são influenciadas por diversos fatores, como a composição do cimento, a granulometria dos agregados, a relação água/cimento, o uso de aditivos e a incorporação de materiais alternativos, a exemplo dos resíduos poliméricos (Maciel *et al.*, 2020; Neville, 2011; OECD, 2022). De acordo com a NBR 13281, o desempenho das argamassas deve ser avaliado considerando parâmetros como consistência, retenção de água, resistência mecânica e absorção, os quais refletem diretamente sua capacidade de aderência, durabilidade e estabilidade dimensional.

2.4.1 Comportamento reológico no estado fresco

Outro parâmetro associado ao estado fresco da argamassa é a viscosidade, que se refere à resistência ao escoamento do material, estando diretamente relacionada à coesão e à trabalhabilidade (Mello, 2011; Gonzaga, 2023; Nóbrega, 2025). As argamassas com maior viscosidade tendem a apresentar maior coesão, porém menor fluidez e facilidade de aplicação (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2011; Paulino, 2025). Esse comportamento pode ser influenciado pela granulometria dos agregados, pelo tipo de cimento e pelo teor de materiais finos presentes na mistura.

A incorporação de partículas poliméricas em matrizes cimentícias, como o PET, pode alterar significativamente o comportamento reológico da argamassa, afetando sua viscosidade e fluidez. Isso ocorre, entre outros fatores, devido à baixa absorção de água do PET, que modifica a distribuição de água livre na mistura (Islam *et al.*, 2016). Além disso, estudos indicam que a presença de resíduos plásticos pode influenciar a coesão e a consistência da argamassa, alterando seu comportamento no estado fresco (Saikia; De Brito, 2012; Marzouk *et al.*, 2007).

2.4.2 Espalhamento

O espalhamento é importante para definir parâmetros que avaliam a trabalhabilidade do material cimentício. Sendo assim, o espalhamento observado em misturas com PET tende a ser menor, devido à redução da consistência e à baixa retenção de água observada nas amostras (Mello, 2011; Mendonça *et al.*, 2021), conforme verificado por Umasabor e Daniel (2020), que destacaram o decréscimo da trabalhabilidade proporcional ao incremento do teor de polímero. Esse comportamento reológico é influenciado pela morfologia das partículas e pela natureza não absorvente do PET (Albano *et al.*, 2009).

2.4.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das principais propriedades mecânicas das argamassas e concretos, representando a capacidade do material de suportar esforços compressivos até a ruptura e estando relacionada à hidratação do cimento e à microestrutura da matriz cimentícia (Neville, 2011). O ensaio é realizado pela aplicação de carga crescente no corpo de prova até a ruptura, sendo a resistência calculada pela razão entre a carga máxima aplicada e a área da seção transversal, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 13279, sendo dada pela expressão:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que f_c corresponde à resistência à compressão, F é a carga máxima aplicada no ensaio e A representa a área da seção transversal do corpo de prova.

Os corpos de prova utilizados neste ensaio podem apresentar diferentes geometrias, sendo comuns corpos prismáticos, cilíndricos ou cúbicos, dependendo da norma e do tipo de material avaliado (Callister *et al.*, 2018). Para argamassas, é frequente o uso de prismas ou cubos moldados em laboratório, conforme especificações normativas (Mehta; Monteiro, 2014).

A avaliação da resistência à compressão é fundamental, pois essa propriedade está diretamente associada à qualidade da matriz cimentícia, à porosidade do material e à aderência entre seus constituintes, sendo um dos principais parâmetros utilizados para verificar o desempenho mecânico e a viabilidade de materiais cimentícios modificados (Neville, 2011; Mehta; Monteiro, 2014).

No caso de argamassas contendo polietileno tereftalato (PET), diversos estudos indicam que a resistência à compressão tende a diminuir quando ocorre substituição significativa do cimento ou dos agregados por partículas poliméricas. Esse comportamento é atribuído principalmente à menor rigidez do material polimérico e à limitada aderência entre a superfície do PET e a matriz cimentícia (Marzouk *et al.*, 2007; Saikia; De Brito, 2012).

2.4.4 Absorção de água

O ensaio de absorção de água está diretamente relacionado à porosidade e à permeabilidade da argamassa no estado endurecido, sendo um importante indicador de sua durabilidade (Mello, 2011; Mendonça *et al.*, 2021). A absorção de água está associada à capacidade do material de incorporar fluidos através de sua rede de poros, o que pode facilitar a entrada de agentes agressivos, como íons cloreto e sulfatos, comprometendo o desempenho e a vida útil do material cimentício (Neville, 2011). A permeabilidade, por sua vez, refere-se à facilidade com que fluidos atravessam o material sob um gradiente de pressão, estando diretamente relacionada à conectividade dos poros (Mehta; Monteiro, 2014).

A absorção de água pode ser determinada por diferentes métodos, sendo os mais comuns baseados na imersão do material seco em água por um determinado período, com posterior medição do ganho de massa, permitindo avaliar o volume de poros acessíveis (ABNT 9778, 2005).

Como o PET é um material hidrofóbico, sua incorporação pode interferir nesse comportamento de diferentes formas. Um dos mecanismos associados é o efeito de preenchimento, no qual as partículas poliméricas podem ocupar vazios na matriz, reduzindo a conectividade dos poros e, conseqüentemente, a absorção de água. Frigione (2010) destaca que a incorporação de polímeros em matrizes cimentícias pode influenciar significativamente a permeabilidade e a absorção de água.

Contudo, teores elevados de PET podem comprometer a compactação da mistura, aumentar a porosidade global do compósito e favorecer a formação de vazios interfaciais, resultando em incremento da absorção de água, conforme observado em estudos sobre o uso de resíduos plásticos em materiais cimentícios (Saikia; De Brito, 2012; Marzouk *et al.*, 2007). Dessa forma, o efeito da incorporação de PET depende do equilíbrio entre a redução da conectividade dos poros e o aumento da porosidade total do sistema.

2.4.5 Microestrutura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica utilizada para a caracterização microestrutural de materiais, permitindo a observação da morfologia superficial (Dedavid; Gomes; Machado, 2007; Mansur, 2007; Mello, 2011). Essa técnica possibilita a análise de diferentes características da amostra, como a topografia da superfície e aspectos estruturais dos materiais, sendo amplamente empregada em estudos de caracterização microestrutural (Maliska, s.d.; Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

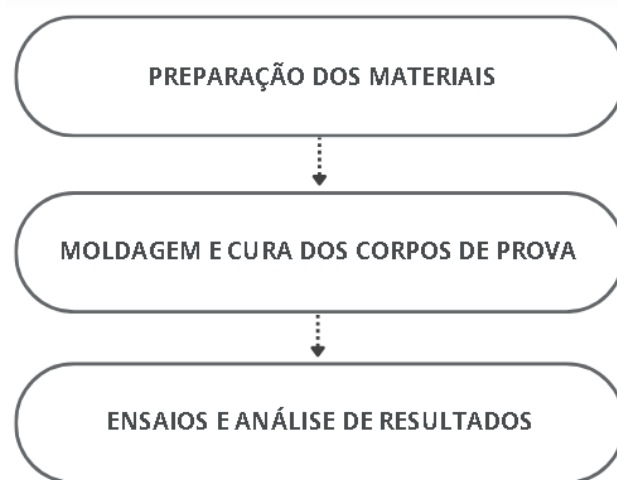
O funcionamento do microscópio eletrônico de varredura baseia-se na interação de um feixe de elétrons com a superfície da amostra, que é varrida ponto a ponto durante a análise (Dedavid; Gomes; Machado, 2007). A partir dessa interação são gerados diferentes sinais, entre os quais se destacam os elétrons secundários e os elétrons retroespalhados, responsáveis pela formação das imagens obtidas no equipamento (Maliska, s.d.; Mello, 2011).

Os elétrons secundários são responsáveis principalmente pela obtenção de imagens relacionadas à topografia da superfície, permitindo a visualização de detalhes morfológicos do material (Maliska, s.d.). Enquanto os elétrons retroespalhados estão associados às diferenças de composição e densidade dos elementos presentes na amostra, contribuindo para a identificação de contrastes entre diferentes regiões do material analisado (Maliska, s.d.; Mansur, 2007; Mello, 2011). Dessa forma, o MEV constitui uma ferramenta importante para estudos de caracterização microestrutural de diferentes materiais (Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração deste estudo, foram necessárias diversas etapas, incluindo a preparação dos materiais, a moldagem dos corpos de prova e a realização dos ensaios. Essas etapas estão apresentadas de forma esquemática no fluxograma a seguir (Figura 1).

Figura 1 – Metodologia geral dos ensaios



Fonte: Elaborada pela autora (2025)

Inicialmente, foram analisados e separados os materiais que compõem a argamassa, como areia, cimento e resíduo de PET. Em seguida, foram realizadas as moldagens dos corpos de prova com substituição parcial do cimento pelos teores de 5% e 10% de PET, além de um traço de referência sem substituição.

No estado fresco da argamassa, foram realizados os ensaios de espalhamento e análise de viscosidade, para avaliar a trabalhabilidade e o comportamento reológico das misturas. Por fim, no estado endurecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e absorção por imersão, permitindo avaliar o desempenho mecânico e físico das argamassas produzidas.

3.1 Materiais

3.1.1 Areia normal

Neste trabalho foi utilizada areia normalizada conforme a NBR 7214, garantindo maior reprodutibilidade dos resultados devido à sua granulometria controlada e propriedades uniformes. A Tabela 2 apresenta a distribuição granulométrica do material, conforme a norma.

Tabela 2 – Tolerâncias das frações granulométricas

Denominação	Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Porcentagem em massa (%)
16 b	2,4 mm e 2,0 mm	≤ 10
	2,0 mm e 1,2 mm	≥ 90
30	1,2 mm e 0,6 mm	≥ 95
50	0,6 mm e 0,3 mm	≥ 95
100	0,3 mm e 0,15 mm	≥ 95

Fonte: Tabela da NBR 7214:2015

A areia utilizada foi obtida no comércio local e, posteriormente, submetida a um processo de lavagem para remoção de materiais pulverulentos e impurezas. Em seguida, o material foi seco em estufa até massa constante, garantindo a eliminação da umidade. Após a secagem, a areia foi peneirada, permitindo a separação das frações granulométricas conforme a distribuição apresentada na Tabela 2 e ilustrada da Figura 2.

Figura 2 – Areia separada em frações granulométricas



Fonte: Arquivo da autora (2025)

3.1.2 Cimento

Foi utilizado cimento Portland do tipo CP II-F (Figura 3), conforme especificado pela norma NBR 16697. Esse tipo de cimento é caracterizado pela adição de *filler* calcário, apresentando como principal requisito uma resistência mínima de 32 MPa aos 28 dias. Sua composição inclui entre 11% e 25% de material carbonático. O material utilizado é de fabricação da Votorantim Cimentos, lote 2102001313.

Figura 3 – CP II-F



Fonte: Arquivo da autora (2025)

3.1.3 PET

A pulverização do PET apresentou certo grau de dificuldade durante o desenvolvimento experimental. Assim, diferentes métodos foram testados na tentativa de obter o material em forma de pó, incluindo a utilização de produtos químicos, moagem em moinho de bolas e trituração em liquidificador. Entretanto, o procedimento que apresentou melhor desempenho em termos de produção do material pulverizado foi a utilização de uma lixa (marca Norton, grão 50) acoplada a uma serra de bancada, sem utilização de água, com velocidade constante aproximada de 60 m/s. Como ilustrado na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Equipamento utilizado para pulverização do PET



Fonte: Arquivo da autora (2025)

Após o processo de lixamento do material, realizado de forma lenta para evitar o aquecimento e o consequente derretimento do polímero, foi possível proceder ao peneiramento do material obtido, visando à obtenção do pó de PET (Figura 5).

Figura 5 – Pó de PET



Fonte: Arquivo da autora (2025)

3.2 Métodos

3.2.1 Ensaio de granulometria

A caracterização granulométrica do resíduo de politereftalato de etileno (PET) foi realizada por meio da técnica de difração a laser, a qual permite determinar a distribuição do tamanho das partículas com base no padrão de espalhamento da luz incidente.

Inicialmente, a amostra foi analisada utilizando o modelo de Difração de Fraunhofer, empregando-se a totalidade do material fornecido. A adoção desse modelo se justifica pelo fato de o PET apresentar baixa absorção e caráter parcialmente translúcido, características compatíveis com as premissas do método.

Posteriormente, o material ensaiado foi submetido a peneiramento na malha #200 (abertura de aproximadamente 75 μm) para remover partículas mais grosseiras e possibilitar uma análise mais refinada da fração fina.

Após essa etapa, foi realizada nova análise granulométrica por difração a laser, utilizando o modelo de Teoria de Mie, mais adequado para partículas de menor dimensão e com propriedades ópticas específicas. Para essa análise, foram adotados valores de índice de refração igual a 1,57 e índice de absorção de 0,00001.

3.2.2 Determinação da massa específica

A determinação da massa específica do PET em pó foi realizada conforme a norma NBR 16605, utilizando o frasco de Le Chatelier. Inicialmente, registrou-se o volume inicial do líquido (V_1). Em seguida, uma massa conhecida do material foi adicionada ao frasco, evitando a formação de bolhas, e anotou-se o volume final (V_2).

O volume do material foi obtido pela diferença entre as leituras ($V = V_2 - V_1$), e a massa específica foi calculada pela razão entre a massa e o volume deslocado. Esse método permite determinar a massa específica real de materiais em pó, desconsiderando os vazios entre as partículas.

3.2.3 Microestrutura

A caracterização morfológica das partículas de PET pulverizado foi realizada por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando um microscópio TESCAN VEGA 3, operando em alto vácuo e tensão de aceleração de 20 kV. Para a obtenção das imagens no modo de elétrons secundários (SE), as amostras foram dispersas sobre fita de carbono fixada em stubs metálicos e, posteriormente, submetidas à metalização com ouro utilizando um equipamento Quorum Q150. As micrografias foram obtidas com aumento de 500 $\times$, permitindo a avaliação da morfologia e da geometria das partículas de PET após o processo de moagem.

3.2.4 Ensaio de viscosidade

A viscosidade das pastas cimentícias foi determinada por meio de um viscosímetro gravitacional de baixo custo desenvolvido na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). O ensaio consistiu na medição do tempo de deslocamento de um corpo de prova metálico entre dois sensores posicionados a uma distância de 60 cm, sendo o tempo registrado automaticamente pelo sistema de aquisição de dados.

A mistura foi adicionada ao recipiente do equipamento. Em seguida, foram aplicadas cargas variando de 25 a 500 g, em incrementos de 25 g, registrando-se o tempo necessário para o deslocamento do corpo de prova ao longo do percurso estabelecido. Cada condição experimental foi repetida uma vez.

A tensão de cisalhamento pode ser determinada a partir da razão entre a força aplicada e a área submetida ao cisalhamento, conforme apresentado na Equação 2.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Equação (2)}$$

Os termos τ , F e A , referem-se, respectivamente, à tensão de cisalhamento, força e área que à qual a força é aplicada. A força aplicada à pasta era igual a força peso, e área a área da broca (10 mm de diâmetro) utilizada no viscosímetro.

A taxa de cisalhamento foi determinada a partir da velocidade de deslocamento do corpo de prova, obtida com base no tempo medido pelo equipamento. Em seguida, foram construídos gráficos de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para cada pasta analisada.

Para determinar a viscosidade plástica, os dados experimentais foram ajustados linearmente, considerando que as pastas cimentícias apresentam comportamento reológico compatível com o modelo de Bingham, descrito pela Equação (3).

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad \text{Equação (3)}$$

Os termos τ , τ_0 , μ e γ representam, respectivamente, tensão de cisalhamento, limite de escoamento, viscosidade plástica e taxa de cisalhamento.

3.2.5 Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento de argamassa é utilizado para determinar o índice de consistência do material no estado fresco, fornecendo uma indicação de sua capacidade de escoamento e deformação sob a ação de uma energia padronizada. O procedimento consiste no preenchimento de um molde tronco-cônico posicionado sobre uma mesa de espalhamento, sendo a argamassa inserida e adensada por meio de 15 golpes com o soquete. Após o nivelamento da superfície, o molde é removido verticalmente, permitindo que a mistura se deforme livremente. Em seguida, são aplicados 30 golpes padronizados na mesa, promovendo o espalhamento da argamassa. Ao final do ensaio, mede-se o diâmetro médio em duas direções perpendiculares, sendo esse valor utilizado como índice de consistência da mistura. De modo geral, maiores diâmetros de espalhamento indicam maior fluidez da argamassa, enquanto menores valores refletem maior resistência ao escoamento. Entretanto, esse parâmetro não deve ser interpretado isoladamente como medida da trabalhabilidade, uma vez

que esta também depende de propriedades como coesão, retenção de água e resistência à segregação, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 13276 (ABNT, 2016).

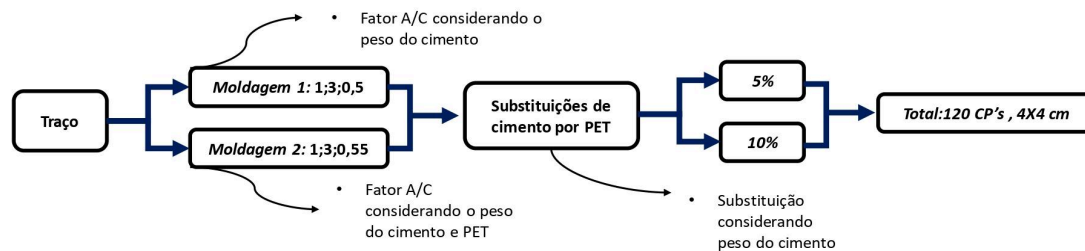
3.2.6 Moldagem dos corpos de prova

A metodologia contemplou a moldagem de corpos de prova de argamassa com dimensões de $4 \times 4 \times 4$ cm, utilizando o traço 1:3:0,5 (cimento:areia:água) com adição de pó de PET. Foram produzidas amostras de referência e amostras com 5% e 10% de substituição parcial do cimento por PET. Inicialmente, o fator água/cimento foi definido considerando apenas a massa de cimento. Entretanto, essa abordagem resultou em misturas com baixa trabalhabilidade e dificuldade de adensamento. Dessa forma, adotou-se uma segunda metodologia, baseada na relação água/(cimento + PET), visando melhorar a fluidez e a homogeneidade das misturas.

As moldagens foram realizadas seguindo o mesmo protocolo experimental, diferindo apenas na quantidade de água utilizada, conforme apresentado na Figura 6. Inicialmente, os materiais secos (cimento, areia e pó de PET) foram homogeneizados manualmente por 1 minuto, seguidos de mistura mecânica em baixa rotação por mais 1 minuto. Em seguida, realizou-se a adição gradual da água de amassamento, mantendo-se a mistura em baixa velocidade durante 1 minuto, seguida de nova homogeneização manual por 1 minuto. Posteriormente, a argamassa foi submetida à mistura em alta velocidade por 2 minutos, visando garantir adequada dispersão das partículas e uniformidade da composição. Após essa etapa, foi realizado o ensaio de abatimento.

A moldagem dos corpos de prova foi conduzida em moldes cúbicos, com preenchimento até a metade seguido de adensamento mecânico em mesa vibratória a 60 Hz durante 1 minuto. Em seguida, completou-se o preenchimento dos moldes e realizou-se novo adensamento nas mesmas condições, a fim de minimizar a incorporação de vazios. Posteriormente, os corpos de prova foram protegidos com papel filme e mantidos em ambiente com temperatura controlada de aproximadamente 20 °C. A desmoldagem ocorreu após 48 horas, seguida de cura úmida em recipientes fechados contendo água, de forma a minimizar a perda de umidade e garantir condições adequadas para a hidratação do cimento até as idades de ensaio de 7 e 28 dias

Figura 6 – Moldagens



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

3.2.7 Ensaio de compressão dos corpos de prova

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas idades de 7 e 28 dias. Ao atingir cada idade de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara climática e tiveram suas dimensões verificadas (Figura 7), considerando a área sobre a qual a carga foi aplicada.

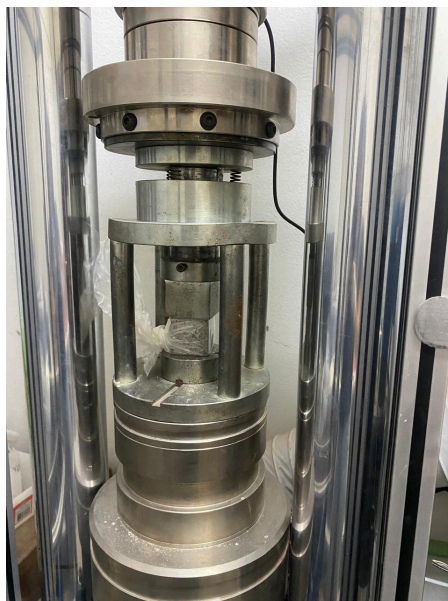
Figura 7 – Medição das dimensões do corpo de prova com paquímetro digital.



Fonte: Arquivo da autora (2025)

Os ensaios foram conduzidos em uma prensa hidráulica da marca Intermetric (Figura 8) adotando-se a taxa de aplicação de carga de 500 N/s, conforme estabelecido pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Durante o ensaio, foi registrada a carga máxima suportada por cada corpo de prova até a ruptura.

Figura 8 – Rompimento do corpo de prova



Fonte: Arquivo da autora (2025)

A resistência à compressão foi calculada pela razão entre a carga máxima aplicada e a área da seção transversal do corpo de prova, conforme a Equação 1.

Por fim, para cada idade e composição, a resistência à compressão foi determinada por meio da média aritmética dos resultados obtidos nos corpos de prova ensaiados. A Tabela 3 apresenta um exemplo da forma como os dados foram registrados e calculados durante os ensaios, incluindo os valores de força máxima aplicada, dimensões dos corpos de prova, área calculada e tensão de ruptura. Todos os corpos de prova de cada composição foram moldados simultaneamente, de modo a garantir condições uniformes de preparo e cura. Caso fosse observado algum resultado significativamente discrepante em relação aos demais, este seria analisado criticamente quanto à possível ocorrência de falhas de moldagem, cura ou ensaio antes de sua consideração nas análises estatísticas.

Tabela 3 – Exemplo de registro e cálculo da resistência à compressão

Cps 10%							
Compressão	CDP 1	CDP 2	CDP 3	CDP 4	CDP 5	CDP 6	CDP 7
Força (kN)	20,70	19,50	19,10	20,40	20,40	19,50	20,10
Força (N)	20700	19500	19100	20400	20400	19500	20100

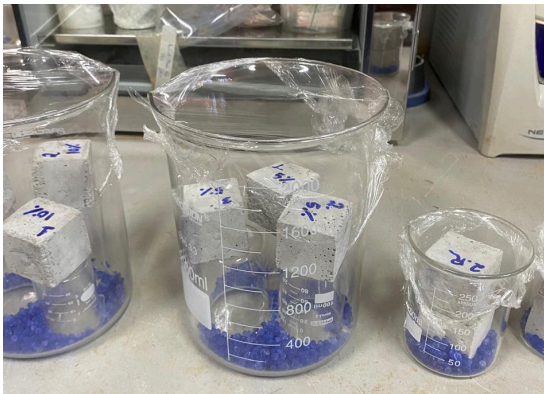
Dimensão 1 (mm)	40,12	40,55	40,26	40,01	40,10	40,23	40,10
Dimensão 2 (mm)	40,21	40,35	40,15	40,16	39,99	40,05	40,25
Área (mm²)	1613,225	1636,19	1616,439	1606,80	1603,59	1611,211	1614,025
Área (m²)	0,001613	0,001636	0,001616	0,0016	0,001603	0,001611	0,001614
Tensão (MPa)	12,83	11,92	11,82	12,70	12,72	12,10	12,45

Fonte: Elaborada pela autora (2025)

3.2.8 Ensaio de absorção por capilaridade

Após o período de cura, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a 100 °C até atingirem massa constante. Em seguida, foram resfriados em recipiente isolado contendo sílica, a fim de evitar a absorção de umidade do ambiente, conforme Figura 9.

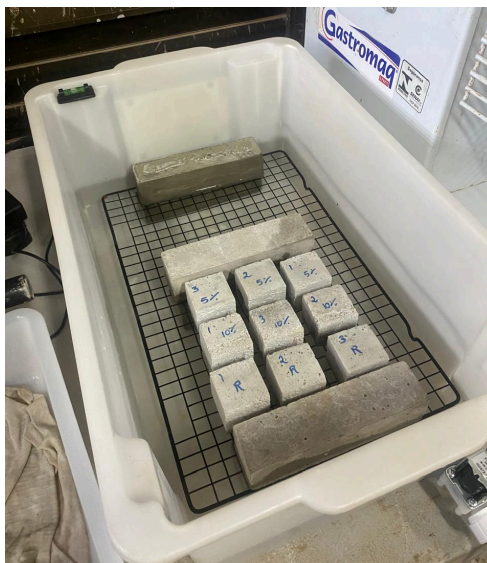
Figura 9 – Corpos de prova em processo de resfriamento após secagem em estufa.



Fonte: Arquivo da autora (2025)

Posteriormente, os corpos de prova foram posicionados em um recipiente contendo uma lâmina de água de aproximadamente 5 mm de altura, conforme recomendado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) na NBR 9779, garantindo o contato da água apenas com a base das amostras (Figura 10).

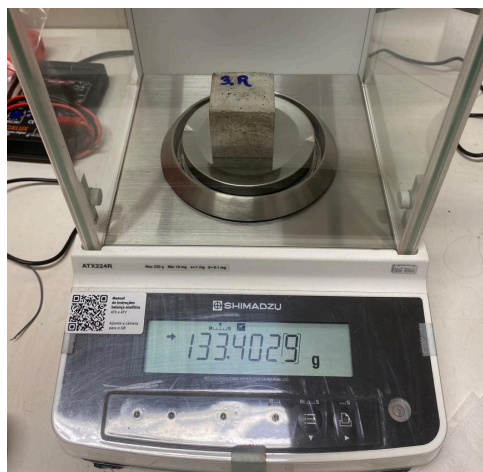
Figura 10 – Corpos de prova submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: Arquivo da autora (2025)

A variação de massa foi monitorada ao longo do tempo, sendo realizadas pesagens nos intervalos de 5, 10, 15, 30, 60, 90 e 180 minutos (Figura 11). Esse procedimento permitiu avaliar a absorção de água por capilaridade em função do tempo.

Figura 11 – Pesagens dos corpos de provas



Fonte: Arquivo da autora (2025)

O coeficiente de absorção por capilaridade foi determinado conforme a NBR 9779:2012, sendo calculado a partir da relação entre o ganho de massa dos corpos de prova e a área da seção em contato com a água. Para isso, foi construído um gráfico da absorção em função da

raiz quadrada do tempo, sendo o coeficiente obtido pelo coeficiente angular da reta na fase inicial de absorção.

3.2.9 Ensaio de absorção por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado com o objetivo de avaliar a porosidade acessível das amostras. Inicialmente, os corpos de prova foram secos em estufa até massa constante, sendo posteriormente resfriados e pesados para determinação da massa seca. Em seguida, as amostras foram imersas em água por 24 horas, sendo então pesadas em condição saturada e também com auxílio de balança hidrostática, para obtenção da massa imersa.

A absorção de água foi determinada a partir da variação entre as massas seca e saturada, conforme procedimentos estabelecidos pela NBR 9778 (ABNT, 2005).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

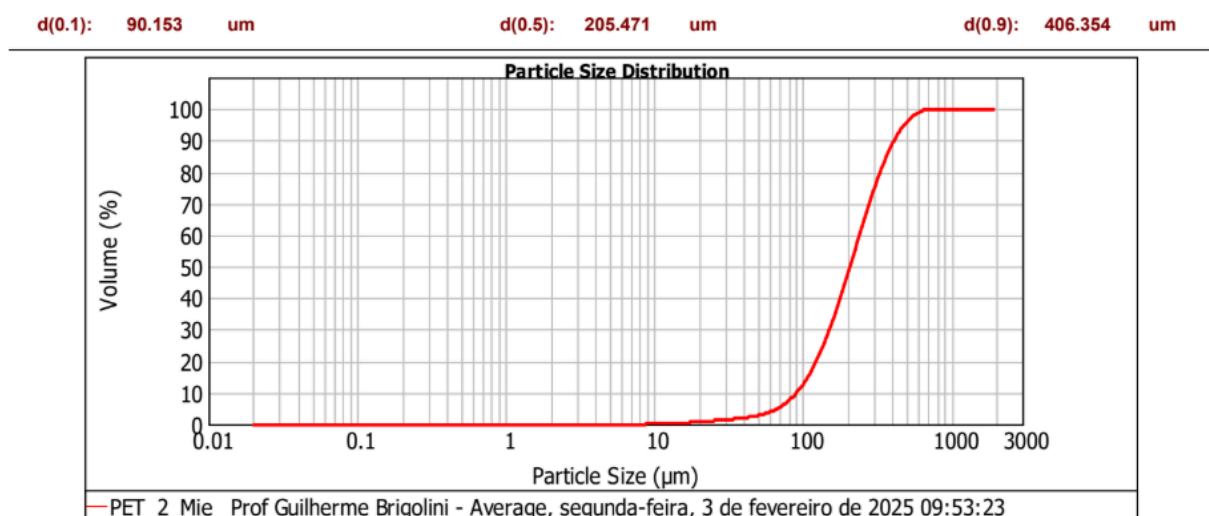
4.1 Resultado ensaio granulométrico do PET

A análise granulométrica do PET triturado demonstra que o material apresenta distribuição relativamente ampla de tamanhos de partículas, variando desde poucos micrômetros até frações próximas de 1 mm. Os valores característicos obtidos foram: $d(10) = 90,153 \mu\text{m}$, $d(50) = 205,471 \mu\text{m}$ e $d(90) = 406,354 \mu\text{m}$.

Isso indica que 10% do volume das partículas de PET possui tamanho inferior a aproximadamente $90 \mu\text{m}$, enquanto 50% se encontra abaixo de $205 \mu\text{m}$ e 90% é menor que cerca de $406 \mu\text{m}$. Isso significa que a maior parte do PET triturado situa-se na faixa granulométrica típica de partículas finas a médias, sem características de pó ultrafino. Dessa forma, o material tende a apresentar contribuição limitada ao efeito de preenchimento e menor potencial de atuação como sítio de nucleação para os produtos de hidratação do cimento, quando comparado a materiais cimentícios ultrafinos (Scrivener; John; Gartner, 2018)

O gráfico de distribuição evidencia um perfil em formato de S, com uma região inicial praticamente plana, indicando ausência de partículas muito finas ($<10 \mu\text{m}$), seguida de uma ascensão acentuada entre cerca de $100 \mu\text{m}$ e $500 \mu\text{m}$, faixa onde ocorre a maior concentração volumétrica do material. Esse padrão revela que a trituração gerou partículas pouco homogêneas, porém com predominância de tamanhos intermediários, o que é comum em resíduos poliméricos processados mecanicamente (Silva *et al.*, 2004).

Figura 12 – Curva de distribuição granulométrica do PET.



Do ponto de vista do desempenho em argamassas, essa granulometria sugere que o PET atua predominantemente como *filler* grosso ou microagregado leve, não como substituto ultrafino do cimento (Mendonça *et al.*, 2021; Mello, 2011). As partículas maiores tendem a aumentar a porosidade e alterar a microestrutura da matriz cimentícia, influenciando negativamente propriedades como trabalhabilidade e resistência mecânica, enquanto partículas menores apresentam comportamento mais favorável devido à melhor distribuição granulométrica (Marzouk; Dheilil; Queneudec, 2007).

O tamanho médio relativamente elevado ($d_{50} \approx 205 \mu\text{m}$) indica que o PET apresenta comportamento mais compatível com substituição parcial de agregado miúdo do que com atuação como material pozolânico. Esse comportamento é observado na literatura, na qual o PET é frequentemente empregado como substituto parcial da areia em compósitos cimentícios. Além disso, diversos estudos relatam reduções das propriedades mecânicas com o aumento do teor de PET incorporado à matriz cimentícia, especialmente em elevadas taxas de substituição (Marzouk; Dheilil; Queneudec, 2007).

Portanto, a granulometria observada demonstra que o material possui potencial para uso como *filler* plástico inerte, contribuindo principalmente para redução da massa específica da argamassa e para modificações no comportamento mecânico e reológico, mas sem expectativa de reatividade química com o cimento.

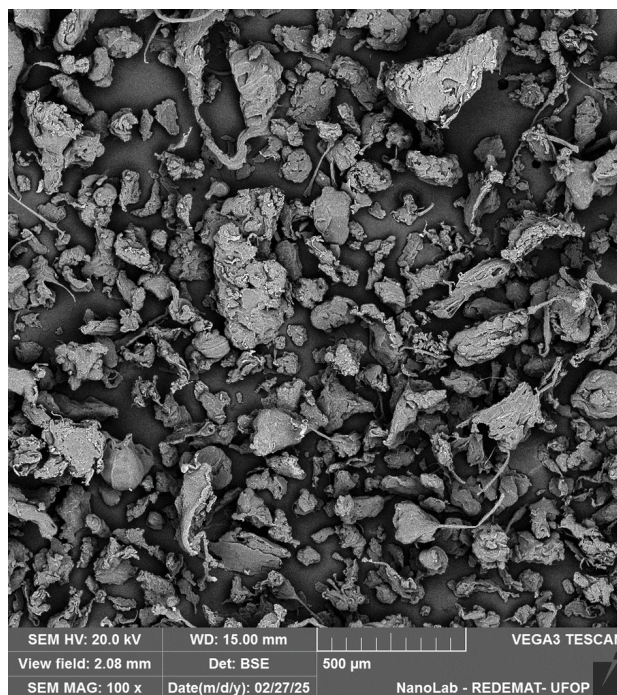
4.2 Massa específica

A massa específica determinada para o PET pulverizado foi de $0,4853 \text{ g/cm}^3$, valor significativamente inferior à faixa de 1,30 a $1,40 \text{ g/cm}^3$ normalmente reportada para o polímero PET em sua forma compacta (Frigione, 2010; Gu; Ozbakkaloglu, 2016). Esse resultado está relacionado ao menor grau de empacotamento das partículas após a moagem, o que favorece a formação de vazios e a retenção de ar entre os grãos (Mello, 2011). Assim, o valor obtido reflete a massa unitária (ou densidade aparente) do material no estado pulverizado, e não a massa específica real do polímero.

4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

A morfologia das partículas de PET foi avaliada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), técnica que permite observar a forma e as características superficiais das partículas. A micrografia obtida é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Micrografia obtida pelo (MEV) do PET triturado



Fonte: Arquivo da autora (2025)

Observa-se que o PET pulverizado apresenta partículas com tamanhos e formatos bastante irregulares, variando entre fragmentos lamelares, partículas angulares e aglomerados de diferentes dimensões. Essa heterogeneidade morfológica está diretamente relacionada ao processo mecânico empregado para a redução de tamanho. Durante a trituração e o corte, o atrito gerado pela lixa ou serra promove elevação de temperatura localizada, podendo ocasionar o amolecimento superficial ou até mesmo o derretimento parcial do polímero. Como consequência, algumas partículas apresentam bordas arredondadas, superfícies parcialmente fundidas e indícios de coalescência entre fragmentos.

Esse comportamento é compatível com o descrito na literatura, que aponta que processos mecânicos de moagem de polímeros termoplásticos podem induzir alterações morfológicas devido ao aquecimento por fricção, resultando em partículas com superfícies irregulares e parcialmente fundidas (BHAGIA *et al.*, 2021). Além disso, o PET, por ser um polímero termoplástico, apresenta sensibilidade térmica, podendo sofrer deformações quando submetido a temperaturas elevadas durante o processamento mecânico (BHAGIA *et al.*, 2021).

A morfologia observada pode ter influenciado o comportamento do material nas misturas cimentícias. Os formatos irregulares e angulares das partículas de PET podem ter

contribuído para o aumento do atrito interno entre os constituintes da mistura, como cimento, areia e água, o que pode resultar em menor fluidez da pasta e redução do espalhamento da argamassa (ALBANO *et al.*, 2009; ABU-SALEEM *et al.* 2021). Além disso, embora a morfologia angular possa favorecer a ancoragem mecânica na matriz cimentícia, a natureza polimérica e quimicamente inerte do PET limita a formação de ligações químicas com os produtos de hidratação do cimento. Dessa forma, a interação entre o PET e a matriz ocorre predominantemente por mecanismos físicos. Adicionalmente, a heterogeneidade granulométrica das partículas pode contribuir para a formação de zonas interfaciais mais porosas, favorecendo a presença de vazios e influenciando propriedades como a porosidade e o desempenho mecânico do material (Mello, 2011; Modro *et al.*, 2009).

Dessa forma, a análise por MEV confirmou que o processo de pulverização influenciou significativamente a morfologia do PET, aspecto que deve ser considerado na interpretação dos resultados físicos e mecânicos obtidos para os compósitos produzidos.

4.4 Viscosidade de pastas cimentícias com substituição parcial de PET

A avaliação da viscosidade e da tensão de cisalhamento permite analisar como adições minerais ou poliméricas, como o PET, influenciam as propriedades de fluxo do material. Nesse contexto, o uso de viscosímetros possibilita a determinação de parâmetros reológicos a partir da relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento. Os resultados experimentais obtidos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados viscosímetro.

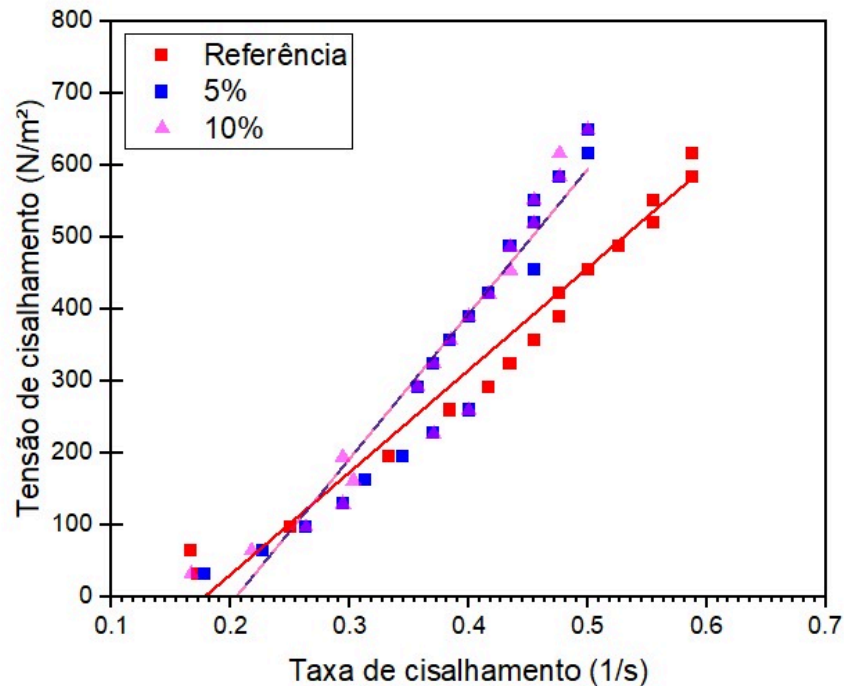
Resultado viscosímetro			
Peso (g)	CP Referência	CP 5%	CP 10%
25	5,8	5,6	6
50	6	4,4	4,6
75	4	3,8	3,8
100	3,4	3,4	3,4
125	3,2	3,2	3,3
150	3	2,9	3,4

175	2,7	2,7	2,7
200	2,6	2,5	2,5
225	2,4	2,8	2,8
250	2,3	2,7	2,7
275	2,2	2,6	2,6
300	2,1	2,5	2,5
325	2,1	2,4	2,4
350	2	2,4	2,3
375	1,9	2,3	2,3
400	1,8	2,2	2,2
425	1,8	2,2	2,2
450	1,7	2,1	2,1
475	1,7	2	2,1
500	2	2	2

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A tensão de cisalhamento foi determinada pela razão entre a força aplicada e a área submetida ao cisalhamento. Nesse procedimento, a força aplicada à pasta correspondeu ao peso utilizado durante o ensaio, enquanto a área considerada foi a área da seção transversal da broca de 10 mm de diâmetro empregada no viscosímetro. A partir dos valores de força e do tempo necessário para que cada peso atingisse o fundo do recipiente, foi elaborado o gráfico de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento, apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento.



Fonte: Elaborada pela autora (2025)

O resultado do viscosímetro mostra que a adição de PET na pasta de cimento modificou a viscosidade. Observou-se que as pastas com PET apresentaram maior coeficiente angular em relação à mistura de referência, indicando aumento da viscosidade. Para calcular o valor da viscosidade efetuou-se um ajuste linear, visto que as pastas cimentícias apresentam comportamento reológico compatível com o modelo de Bingham. A partir do resultado do ajuste, aplicou-se o modelo reológico de Bingham, o qual é definido como:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad \text{Equação (3)}$$

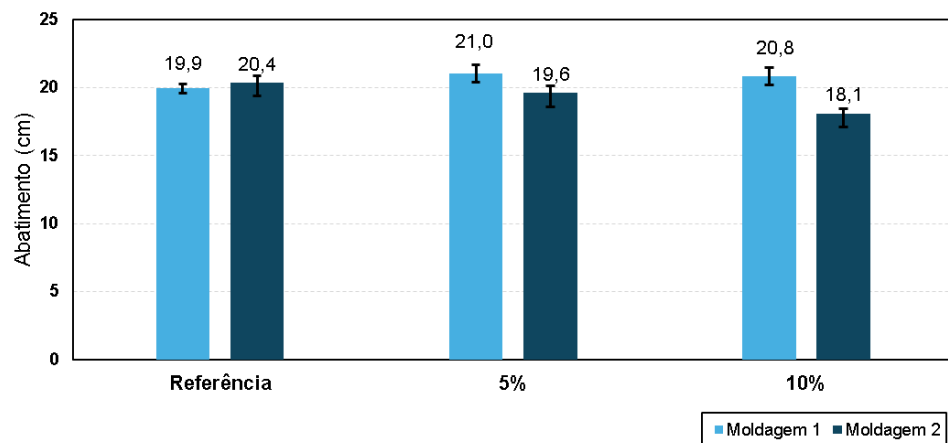
Os termos τ , τ_0 , μ e γ representam, respectivamente, tensão de cisalhamento, limite de escoamento, viscosidade plástica e taxa de cisalhamento (ROUSSEL *et al.*, 2010).

Com base nos resultados dos ajustes e na equação acima, determinou-se a viscosidade das pastas estudadas. Assim, obteve-se 1420 Pa·s, 2012 Pa·s e 2012 Pa·s, respectivamente, para as argamassas de referência, 5% e 10%. Diante desses resultados, constatou-se que a adição de PET resultou numa redução na fluidez da argamassa. Uma possível explicação para tal observação é a morfologia irregular do PET, como mostrado pelas imagens de MEV, e o aumento de moléculas na composição da pasta, visto que o peso molecular do PET é inferior ao do cimento CPF-II (Mello 2011; Modro *et al.* 2009; Mendonça *et al.* 2021).

4.5 Resultado do ensaio de espalhamento

Os resultados do ensaio de espalhamento indicam que a incorporação de PET influenciou a trabalhabilidade das argamassas de forma dependente do critério de dosagem da água, como mostrado na Figura 15.

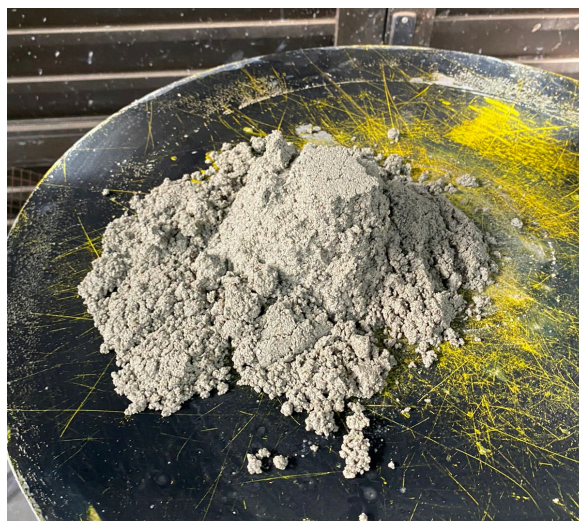
Figura 15 – Gráfico de Espalhamento x Traços



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Na Moldagem 1, observou-se aumento do espalhamento para o teor de 5% de PET (21,01 cm) em relação à referência (19,93 cm). Entretanto, o valor obtido para o traço com 10% de substituição (20,8 cm) não foi considerado representativo, uma vez que a mistura apresentou consistência excessivamente seca, comprometendo a confiabilidade do ensaio. Em função dessa limitação, realizou-se uma segunda moldagem com ajuste no teor de água ($a/c=0,55$), buscando melhorar a trabalhabilidade das misturas.

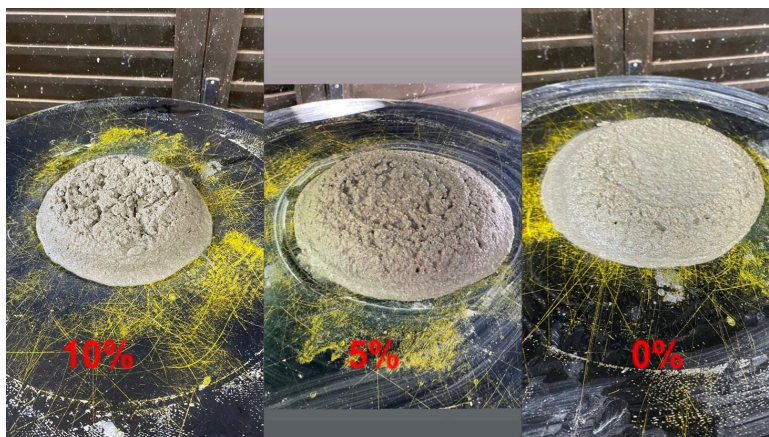
Figura 16 – Ensaio de espalhamento da argamassa com 10% de PET na primeira moldagem



Fonte: Arquivo da autora (2025)

Na Moldagem 2, verificou-se redução progressiva do espalhamento com o aumento do teor de PET, passando de 20,4 cm (referência) para 19,6 cm (5%) e 18,1 cm (10%), evidenciando diminuição da fluidez da argamassa. Na Figura 17 podemos observar a consistência das argamassas no ensaio, da esquerda para a direita: argamassa com 10% de PET, argamassa com 5% de PET e argamassa de referência. Observa-se redução da fluidez e aumento da consistência com o incremento do teor de PET.

Figura 17 – Aspecto das argamassas no ensaio de espalhamento.



Fonte: Arquivo da autora (2025)

Esse comportamento está diretamente relacionado aos resultados obtidos no ensaio reológico com o viscosímetro, no qual as pastas contendo PET apresentaram viscosidade

superior à da mistura de referência. Os valores de viscosidade obtidos foram de 1420 Pa·s para a referência e 2012 Pa·s para os traços com 5% e 10% de PET, indicando maior resistência ao escoamento nas misturas com incorporação do resíduo.

Dessa forma, os resultados de espalhamento e viscosidade mostram-se coerentes entre si, uma vez que o aumento da viscosidade promove redução da capacidade de deformação e escoamento da argamassa, resultando em menores diâmetros de espalhamento. Esse comportamento pode ser atribuído às características físicas do PET, especialmente sua morfologia irregular observada nas imagens de MEV e sua natureza hidrofóbica, fatores que aumentam o atrito interno entre as partículas e dificultam a mobilidade da água livre na mistura. Além disso, a granulometria do PET utilizada não favoreceu o preenchimento de vazios da matriz cimentícia, contribuindo para uma mistura mais heterogênea e menos fluida.

4.6 Resultados do ensaio de compressão

Após 7 e 28 dias de cura, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Ao todo, foram ensaiadas 84 amostras, sendo 42 referentes à primeira moldagem e 42 à segunda. Para cada moldagem, foram avaliados três traços (referência, 5% e 10% de substituição por PET), totalizando 14 corpos de prova por traço, sendo 7 destinados a cada idade de ensaio.

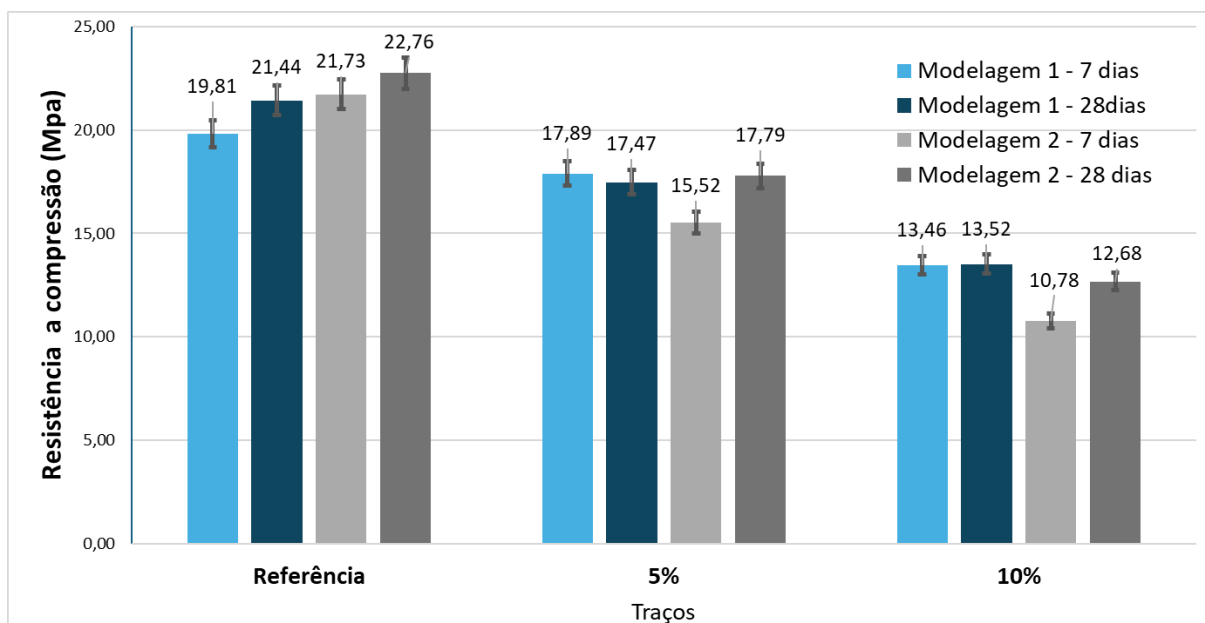
Após a realização dos ensaios, procedeu-se à análise dos resultados, com a exclusão dos valores que não representavam adequadamente o comportamento da amostra, eliminando-se aqueles com maior desvio relativo, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Dessa forma, para cada condição analisada, três resultados de compressão foram descartados, e o resultado final foi obtido a partir da média de quatro corpos de prova.

A análise dos resultados de resistência à compressão das duas moldagens evidencia a influência do fator água/cimento (a/c) e da substituição parcial do cimento por PET no desempenho mecânico das argamassas. Conforme descrito na metodologia, a Moldagem 1 adotou o fator a/c com base apenas na massa de cimento, enquanto a Moldagem 2 considerou a massa total de cimento + PET. Esse critério resultou em um aumento da quantidade de água na Moldagem 2, proporcionando maior trabalhabilidade às misturas, mas também impactando suas propriedades mecânicas.

A Figura 18 apresenta os resultados médios de resistência à compressão obtidos para os diferentes teores de substituição e idades de cura, permitindo comparar o comportamento

mecânico das duas moldagens e avaliar a influência do PET no desenvolvimento da resistência das argamassas.

Figura 18- Resistência à compressão da argamassa referentes às moldagens 1 e 2 aos 7 e 28 dias.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Cabe destacar que, para os traços de referência (sem PET), a massa de cimento foi a mesma em ambas as moldagens. Assim, a quantidade de água utilizada também não apresentou variação significativa, o que justifica a proximidade dos valores de resistência obtidos entre as duas moldagens. De fato, os resultados da argamassa de referência foram bastante semelhantes: 19,81 MPa (7 dias) e 21,44 MPa (28 dias) na Moldagem 1, e 21,73 MPa (7 dias) e 22,76 MPa (28 dias) na Moldagem 2, indicando comportamento mecânico consistente e o esperado ganho de resistência ao longo do tempo.

Por outro lado, com a incorporação de PET, as diferenças entre as moldagens tornam-se mais evidentes. Na Moldagem 1, que apresentou menor teor de água e consistência mais rígida, observou-se redução progressiva da resistência com o aumento do teor de substituição. A argamassa com 5% de PET apresentou resistências de 17,89 MPa (7 dias) e 17,47 MPa (28 dias), enquanto a substituição de 10% resultou em 13,46 MPa (7 dias) e 13,52 MPa (28 dias). Nota-se, nesse caso, pouca evolução da resistência entre 7 e 28 dias para os traços com PET.

Na Moldagem 2, com maior teor de água ($a/c = 0,55$), os valores iniciais de resistência foram inferiores para os traços com PET, porém houve ganho mais expressivo ao longo do tempo. A argamassa com 5% de PET evoluiu de 15,52 MPa (7 dias) para 17,79 MPa (28 dias), enquanto a de 10% passou de 10,78 MPa para 12,69 MPa no mesmo período. Esse comportamento contrasta com a Moldagem 1 e indica que o maior teor de água pode ter retardado o desenvolvimento inicial da resistência, mas favorecido sua evolução posterior.

Comparando ambas as moldagens, observa-se que a Moldagem 1 apresentou maior resistência inicial e menor variação ao longo do tempo para os traços com PET, enquanto a Moldagem 2, embora mais trabalhável, apresentou resistências iniciais menores e maior ganho entre 7 e 28 dias. Após 28 dias de cura, os valores entre as moldagens tornam-se mais próximos.

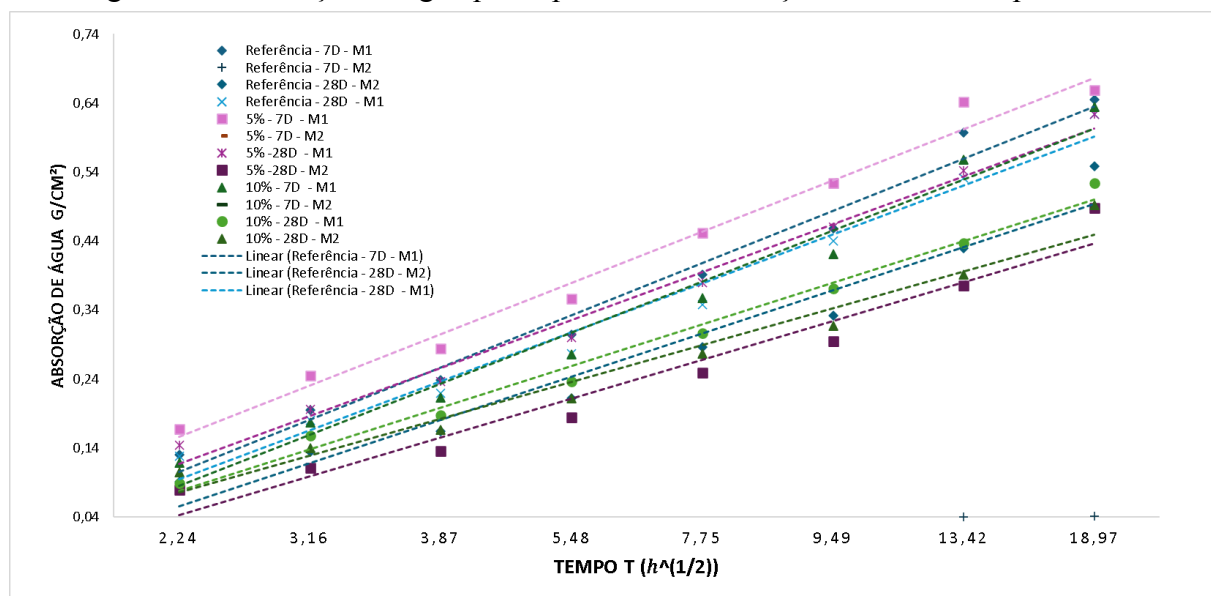
A redução da resistência com o aumento do teor de PET está associada ao seu caráter inerte, à baixa aderência com a matriz cimentícia e à sua granulometria, que pode prejudicar o empacotamento das partículas e aumentar o volume de vazios. Além disso, o PET, por ser hidrofóbico, tende a interferir na distribuição da água na mistura, potencializando os efeitos do aumento do fator a/c .

Dessa forma, os resultados confirmam a relação inversa entre o fator água/cimento e a resistência mecânica, bem como demonstram que a incorporação de PET reduz a resistência à compressão das argamassas, sendo esse efeito mais pronunciado com o aumento do teor de substituição. Ao mesmo tempo, evidenciam que o controle do teor de água é fundamental quando se utiliza PET, pois a necessidade de maior trabalhabilidade pode comprometer o desempenho mecânico e alterar a cinética de ganho de resistência.

4.7 Ensaio de absorção por capilaridade

A Figura 19 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade, determinados para os tempos de 5, 10, 15, 30, 60, 90, 180 e 360 minutos. Os resultados contemplam o traço de referência e os compósitos com teores de substituição de 5% e 10% de PET, permitindo a avaliação da influência da incorporação desse resíduo no comportamento de absorção ao longo do tempo. A representação dos dados em função da raiz quadrada do tempo, conforme recomendado pela NBR 9779.

Figura 19 – Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A análise do gráfico permite comparar o comportamento de absorção capilar entre os diferentes traços a partir da inclinação das curvas obtidas. Em materiais cimentícios, quanto maior a inclinação da reta em função da raiz quadrada do tempo, maior é a taxa de absorção de água por capilaridade, indicando maior facilidade de penetração de água na matriz porosa. Assim, curvas posicionadas em níveis superiores e com maior crescimento ao longo do tempo sugerem maior absorção de água por capilaridade, podendo estar associadas a uma matriz com maior permeabilidade.

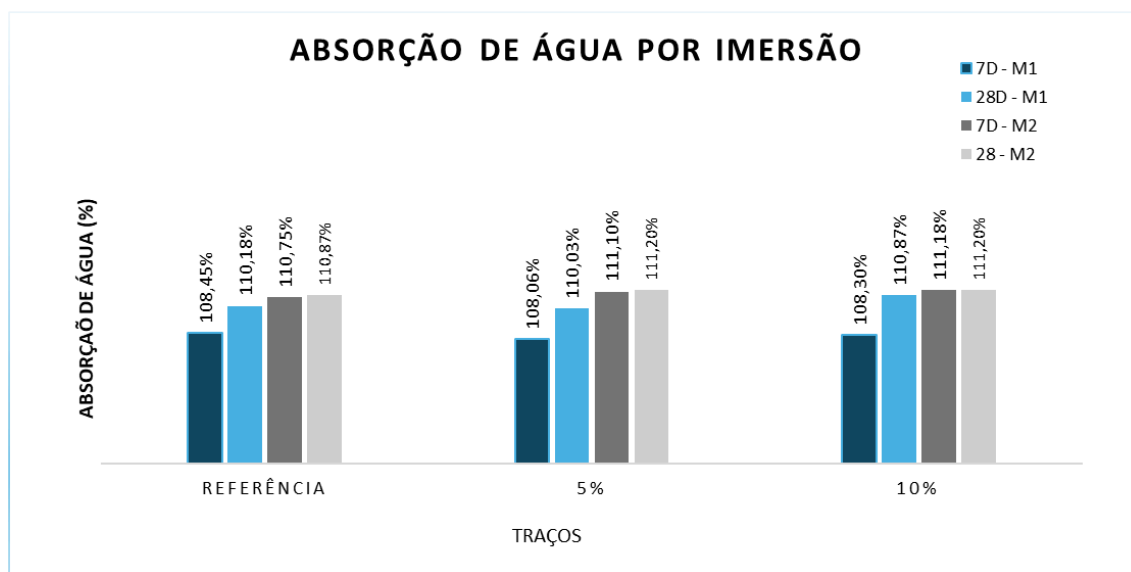
Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade evidenciam comportamento linear em função da raiz do tempo, conforme esperado para materiais cimentícios. Observa-se que a incorporação de PET promove aumento da absorção de água, especialmente para o teor de 5%, o que pode estar associado ao aumento da porosidade do material. O traço com 10% de substituição apresenta comportamento intermediário, porém ainda superior à referência.

Esse resultado está associado à granulometria do PET utilizado, que, por não apresentar características de material fino, não contribui para o efeito de preenchimento dos vazios, o que pode favorecer a formação de uma matriz com maior permeabilidade. Além disso, verifica-se redução da absorção aos 28 dias em relação aos 7 dias, atribuída ao avanço das reações de hidratação e consequente densificação da matriz cimentícia.

4.8 Resultados ensaio de absorção por imersão

A Figura 20 apresenta os resultados de absorção de água por imersão, em porcentagem, considerando a massa seca como 100%. O estudo contemplou as duas moldagens: M1, com fator a/c considerando apenas o peso do cimento, e M2, com fator a/c considerando o peso do cimento acrescido do PET.

Figura 20 – Absorção de água por imersão



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os resultados indicam que os valores de absorção aos 28 dias foram ligeiramente superiores aos de 7 dias, porém sem variações significativas. Ao comparar as composições (referência, 5% e 10% de PET), observa-se que a incorporação do polímero não alterou de forma relevante a absorção de água, tanto na M1 quanto na M2.

Além disso, verifica-se que a adição de PET não melhorou a impermeabilidade da matriz cimentícia, uma vez que os percentuais de absorção permaneceram próximos aos da amostra de referência, após 28 dias de cura. Logo, pode-se inferir que, nos teores analisados,

o PET não promoveu refinamento significativo da estrutura porosa nem atuou de forma expressiva na redução da porosidade acessível.

Dessa forma, conclui-se que a incorporação de PET até 10% não comprometeu, mas também não melhorou, o desempenho da argamassa quanto à absorção de água.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de PET em argamassas, analisando seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas do material. A partir dos resultados experimentais obtidos, foi possível observar que a incorporação do PET promove alterações significativas no comportamento das misturas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

De maneira geral, verificou-se que a substituição parcial do cimento por PET resultou na redução da resistência à compressão das argamassas, comportamento diretamente associado à natureza inerte do polímero, à sua baixa rigidez e à limitada aderência com a matriz cimentícia. Além disso, a granulometria do PET obtido, caracterizada por partículas predominantemente na faixa de microagregado, limitou sua atuação como filer efetivo, reduzindo o potencial de empacotamento e contribuindo para o aumento da porosidade do compósito.

No estado fresco, observou-se que a presença do PET influenciou negativamente a trabalhabilidade das misturas, exigindo ajustes no fator água/cimento para viabilizar a moldagem adequada dos corpos de prova. A adoção da relação água/(cimento + PET) permitiu melhorar a fluidez das argamassas, porém impactou diretamente as propriedades mecânicas, evidenciando a sensibilidade do sistema à variação desse parâmetro.

Os ensaios de absorção de água indicaram que a incorporação do PET pode alterar o comportamento de absorção das argamassas, em função da interação entre o efeito de preenchimento das partículas e o aumento da porosidade associado à sua morfologia irregular. A análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura confirmou a presença de partículas heterogêneas, com formatos angulares e regiões parcialmente fundidas, características que podem ter influenciado a interação física com a matriz cimentícia.

Apesar da redução nas propriedades mecânicas, os resultados indicam que a utilização de PET em baixos teores de substituição pode apresentar potencial para aplicações não estruturais, nas quais os requisitos de resistência são menos rigorosos. Nesse contexto, destaca-se o benefício ambiental associado à redução do consumo de cimento e à destinação adequada de resíduos plásticos, contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil.

Como limitações do estudo, destacam-se a granulometria não controlada do PET e o método de pulverização utilizado, que podem ter influenciado os resultados obtidos. Além

disso, a substituição do cimento por um material inerte restringe o desempenho mecânico das misturas, indicando a necessidade de estratégias complementares para otimização do material.

Por fim, sugere-se que trabalhos futuros investiguem o uso de PET com granulometria mais fina, tratamentos superficiais para melhoria da aderência com a matriz cimentícia e a combinação com outros materiais suplementares, visando potencializar o desempenho mecânico e ampliar as possibilidades de aplicação. Dessa forma, reforça-se o potencial do uso de resíduos poliméricos como alternativa sustentável, desde que adequadamente dosados e aplicados em contextos compatíveis com suas limitações técnicas.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: cimento Portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: cimento Portland — determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: areia normal para ensaio de cimento — especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: argamassa e concreto endurecidos — determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: agregados para concreto — especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: cimento Portland — requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos — determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABU-SALEEM, M. *et al.* Evaluation of concrete performance with different types of recycled plastic waste for kerb application. *Construction and Building Materials*, v. 293, 2021.

ALBANO, C. *et al.* Influence of content and particle size of waste PET bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, v. 29, n. 10, p. 2707–2716, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>

ALBATAYNEH, O.; AKHTAR, M. N. Evaluating recycled PET as an alternative material for the construction sector towards sustainability. *Civil Engineering Journal*, v. 10, n. 4, p. 1336–1354, 2024.

ARHANT, M. *et al.* Impact of hydrolytic degradation on mechanical properties of PET. *Polymer Degradation and Stability*, v. 161, p. 175–182, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.01.021>

ASKAR, M. K.; AL-KAMAKI, Y. S. S.; HASSAN, A. Utilizing polyethylene terephthalate PET in concrete: a review. *Polymers*, Basel, v. 15, n. 15, p. 3320, 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15153320>

BABAFEMI, A. J. *et al.* Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: a review. *Sustainability*, Basel, v. 10, n. 11, p. 3875, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10113875>

BARNES, D. K. A. *et al.* Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 364, p. 1985–1998, 2009.

BHAGIA, S. *et al.* Fine grinding of thermoplastics. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021. <https://doi.org/10.1002/app.50797>

CAMPANHÃO, A. F. *et al.* Recycled PET sand for cementitious mortar. *Materials*, Basel, v. 15, n. 1, p. 273, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15010273>

CHOI, Y. W.; MOON, D. J.; KIM, Y. J.; LACHEMI, M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>

CHEN, S.-J. *et al.* PET particles modify strain hardening cementitious composites: an approach to introduce defects to enhance deformation capacity. *Construction and Building Materials*, v. 447, p. 138064, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138064>

CRIPPA, M. T. *et al.* Avaliação da resistência à compressão simples de misturas de solo-cimento com substituição parcial do cimento por micro PET. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2024, Balneário Camboriú. Anais [...]. Balneário Camboriú: COBRAMSEG, 2024. <https://doi.org/10.47094/COBRAMSEG2024/799>

FRIGIONE, M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, v. 30, n. 6, p. 1101–1106, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, v. 3, n. 7, 2017. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

GÓRAK, P. *et al.* Lightweight PET based composite aggregates in Portland cement materials. *Journal of Building Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101882>

GRIGORIADIS, K. *et al.* Use of irradiated PET plastic waste for partially replacing cement in concrete. *Waste Management*, v. 170, p. 193–203, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.012>

GU, L.; OZBAKKALOGLU, T. Use of recycled plastics in concrete. *Waste Management*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 364, n. 1526, p. 2115–2126, 2009. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>

IRMAWATY, R. *et al.* Mechanical properties of concrete using plastic waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 875, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/875/1/012019>

ISLAM, M. J. *et al.* Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 946–951, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.128>

JAMBECK, J. R. *et al.* Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, v. 347, n. 6223, p. 768–771, 2015.

KHAN, M. I. *et al.* Effective use of recycled waste PET in cementitious grouts for developing sustainable semi-flexible pavement surfacing using artificial neural network (ANN). *Journal of Cleaner Production*, v. 340, p. 130840, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130840>

KUMAR, A.; OEY, T.; FALZONE, G. *et al.* The filler effect: the influence of filler content and type on the hydration rate of tricalcium silicate. *Journal of the American Ceramic Society, Hoboken*, v. 100, n. 7, p. 3316–3328, 2017. <https://doi.org/10.1111/jace.14859>

LANDIM, A. P. M. *et al.* Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. *Polímeros, São Carlos*, v. 26, n. esp., p. 82–92, 2016. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1897>

LEBRETON, L. C. M. *et al.* River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, v. 8, art. 15611, 2017. <https://doi.org/10.1038/ncomms15611>

LOTTHENBACH, B. *et al.* Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 6, p. 848–860, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>

MACIEL, L. D.; COELHO, A. R.; PEREIRA, H. R. S. Estudo das propriedades do concreto convencional com aditivo ou adição de água para correção de consistência. *Revista Matéria*, v. 25, n. 4, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1165>

MAEDA, T.; ENDO, F.; HOTTA, A. Highly functionalized polyethylene terephthalate for food packaging. In: VISAKH, P. M.; LIANG, M. (ed.). *Poly(Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites*. Oxford: Elsevier, 2015. p. 213–234. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31306-3.00011-7>

MARZOUK, O. Y.; DHEILLY, R. M.; QUENEUDEC, M. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*, v. 27, n. 2, p. 310–318, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>

MENDONÇA, A. M. G. D. *et al.* Argamassas manufaturadas com substituição parcial do cimento por PET triturado. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 5, p. 48489–48506, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-327>

MODRO, N. L. R. *et al.* Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. *Revista Matéria*, v. 14, n. 1, p. 725–736, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762009000100009>

PANG, J. *et al.* Synthesis of ethylene glycol and terephthalic acid from biomass for producing PET. *Green Chemistry*, v. 18, p. 342–359, 2016. <https://doi.org/10.1039/C5GC02247K>

PAULINO, R. S.; COSTA, M. do R. de M. M. da. Análise do comportamento reológico de argamassas de revestimento pelo método de squeeze-flow sobre diferentes substratos. *Ambiente Construído, Porto Alegre*, v. 25, e137061, 2025. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212025000100801>

REVATHI, S.; SATHIS KUMAR, P.; SURESH, D.; THOWFICK ANWAR, S. Behaviour of concrete with PET bottles as fibers and silica fume as partial replacement of cement. *Materials Today: Proceedings*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.580>

ROMÃO, W. *et al.* PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v. 19, n. 2, p. 121–132, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000200009>

ROSTAMI, R. *et al.* A review on performance of polyester fibers in alkaline environments. *Construction and Building Materials*, v. 241, p. 117998, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117998>

SAIKIA, N.; DE BRITO, J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review. *Construction and Building Materials*, v. 34, p. 385–401, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>

SAIKIA, N.; DE BRITO, J. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste. *Construction and Building Materials*, v. 52, p. 236–244, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

SILVA, D. A. *et al.* Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 9, p. 1741–1746, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.040>

SILVA, R.; DE BRITO, J.; SAIKIA, N. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 35, n. 1, p. 23–31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório anual do setor de cimento. Rio de Janeiro: SNIC, 2024.

UCHE, C. K. A. *et al.* Polyethylene terephthalate aggregates in structural lightweight concrete: a meta-analysis and review. *Discover Materials*, v. 3, art. 28, 2023. <https://doi.org/10.1007/s43939-023-00045-9>

UMASABOR, R. I.; DANIEL, S. C. Effect of PET as additive on flexural and compressive strength of concrete. *Heliyon*, v. 6, n. 7, e04510, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04510>

UNCTAD. Global Trade Update (August 2025): Mobilising Trade to Curb Plastic Pollution. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development, 2025. Disponível em: <https://unctad.org/publication/global-trade-update-august-2025-mobilising-trade-curb-plastic-pollution>. Acesso em: 14 abr. 2026.

WANG, Z.; PHUA, Z. H.; CHAN, W. P.; LISAK, G. Evaluating fresh and hardened properties of mortar composite with different types of modified polyethylene terephthalate (PET) materials as additives: modification effects, surface properties, shape factors. *Chemosphere*, v. 367, p. 143567, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143567>

WAYSAL, S. M.; PATIL, Y. D.; DHOLKIYA, B. Z. Use of PET resin and metakaolin in sustainable production of cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, v. 65, p. 1298–1306, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.193>

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD); INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Technology roadmap: low-carbon transition in the cement industry. Paris: IEA, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>. Acesso em: 14 abr. 2026.

YANG, L.; ZHANG, Y.; YAN, Y. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar. *Journal of Cleaner Production*, v. 127, p. 204–213, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.054>

ROUSSEL, N.; LEMAÎTRE, A.; FLATT, R. J.; COUSSOT, P. Steady state flow of cement suspensions: a micromechanical state of the art. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 1, p. 77–84, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.028>