XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8882

# Desempenho mecânico de argamassas de revestimento com substituição parcial do agregado miúdo por PET reciclado

## Mechanical performance of rendering mortars with partial replacement of fine aggregate with recycled PET

**Igor Vieira Fernandes**
UFPE | Recife | Brasil | igor.vfernandes@ufpe.br
**Marcos David dos Santos**
UFPE | Recife | Brasil | marcos.david@ufpe.br
**Carlos Fernando Gomes do Nascimento**
UFPE | Recife | Brasil | carlos.fgnascimento@ufpe.br
**Danilo José da Costa Barbosa**
UFPE | Recife | Brasil | danilo,jbarbosa@ufpe.br
**Antônio Acácio de Melo Neto**
UFPE | Recife | Brasil | antonio.meloneto@ufpe.br

### Resumo

A construção civil demanda soluções sustentáveis para reduzir o consumo de recursos naturais e promover o reaproveitamento de resíduos. Nesse contexto, este trabalho avaliou o desempenho mecânico de argamassas de revestimento com substituição volumétrica de 0%, 5%, 10% e 15% da areia por PET. Foram avaliadas as resistências à compressão e à tração na flexão aos 7, 14, 28 e 56 dias e a aderência à tração aos 28 dias. Aos 56 dias, a argamassa com 15% de PET apresentou resistências à compressão e à tração na flexão aproximadamente 34% e 18% superiores às da referência, enquanto a aderência à tração reduziu cerca de 42%. Nas condições avaliadas, a incorporação de PET aumentou as resistências mecânicas aos 56 dias, embora tenha reduzido a aderência à tração.

Palavras-chave: Politereftalato de etileno. Argamassa de revestimento. Desempenho mecânico.

### Abstract

*The construction industry requires sustainable solutions to reduce the consumption of natural resources and promote the reuse of waste materials. In this context, this study evaluated the mechanical performance of rendering mortars with volumetric replacement of natural sand by 0%, 5%, 10%, and 15% PET. Compressive strength and flexural tensile strength were evaluated after 7, 14, 28, and 56 days of curing, while tensile bond strength was evaluated after 28 days. At 56 days, the mortar containing 15% PET exhibited compressive and flexural tensile strengths approximately 34% and 18% higher than those of the reference mortar, respectively, whereas tensile bond strength decreased by approximately 42%. Under the evaluated conditions, PET incorporation increased the mechanical strengths at 56 days, although it reduced tensile bond strength.*

*Keywords: Polyethylene terephthalate. Coating mortar. Mechanical performance.*

Como citar:
FERNANDES, I. V.; SANTOS, M. D.; NASCIMENTO, C. F. G.; BARBOSA, D. J. C.; MELO NETO, A. A. Desempenho mecânico de argamassas de revestimento com substituição parcial do agregado miúdo por PET reciclado. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21., 2026, Goiânia. Anais... Goiânia: ANTAC, 2026.

# INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a intensificação da urbanização têm contribuído para o aumento da geração de resíduos sólidos, entre os quais se destacam os resíduos poliméricos. Nesse grupo, o politereftalato de etileno (PET) apresenta elevada durabilidade e lenta degradação no meio ambiente [1,2], além de expressivo volume de descarte, configurando um relevante passivo ambiental [3,4].

Diante do cenário de crescente geração de resíduos sólidos, a construção civil apresenta grande potencial para a incorporação de resíduos, sendo a utilização de PET como substituto parcial do agregado miúdo uma alternativa sustentável amplamente investigada [4–7].

Entretanto, a incorporação de PET pode alterar o desempenho dos compósitos cimentícios. Estudos indicam que, embora sua presença possa favorecer o empacotamento das partículas em determinadas condições, sua natureza hidrofóbica e a limitada aderência à matriz cimentícia podem comprometer propriedades mecânicas, especialmente aquelas relacionadas aos esforços de tração [8–10].

Nas argamassas de revestimento, tanto as propriedades no estado fresco quanto no estado endurecido são fundamentais para o desempenho do material. Enquanto as propriedades físicas e o comportamento no estado fresco foram abordados por Fernandes et al. [11], o presente estudo concentra-se na avaliação das propriedades mecânicas no estado endurecido, incluindo as resistências à compressão, à tração na flexão e de aderência à tração, que influenciam diretamente o desempenho do revestimento em serviço [12].

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico no estado endurecido de argamassas de revestimento produzidas com substituição volumétrica parcial do agregado miúdo por PET reciclado, por meio dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e resistência de aderência à tração.

# METODOLOGIA

## CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERANTES

O cimento Portland CP II-Z 32 e a cal hidratada CH-I foram caracterizados quanto à massa específica, massa unitária, superfície específica e composição química. A massa específica foi determinada pelo método do frasco de Le Chatelier, conforme a NBR 16605 [13], enquanto a massa unitária foi determinada conforme a NBR 16972 [14]. A superfície específica foi determinada pelo método de Blaine, conforme a NBR 16372 [15]. A composição química foi determinada por fluorescência de raios X (FRX), utilizando espectrômetro de energia dispersiva EDX-720 (Shimadzu). Adicionalmente, a finura do cimento Portland foi determinada por peneiramento, conforme a NBR 11579 [16].

### Caracterização dos Agregados

O agregado miúdo natural e o agregado polimérico (PET) foram caracterizados quanto à massa específica, massa unitária e distribuição granulométrica. A massa específica foi determinada por picnometria, conforme a NBR 16916 [17], a massa unitária conforme a NBR 16972 [14], e a distribuição granulométrica por peneiramento, conforme a NBR 17054 [18]. Adicionalmente, para complementar a caracterização do agregado polimérico (PET), material alternativo objeto deste estudo, foi realizada análise por difração de raios X (DRX), utilizando difratômetro Shimadzu XRD-6000, com radiação CuKα, tensão de 40 kV e corrente de 30 mA, em modo de varredura contínua, com passo de 0,02° e intervalo angular de 10° a 60° (2θ).

### Preparo das Argamassas e Moldagem dos Corpos de Prova e Painéis

A dosagem das argamassas foi definida pelo traço volumétrico 1:1:6 (cimento:cal:agregado miúdo), com substituição de 0%, 5%, 10% e 15% da areia por PET reciclado triturado. Para a produção das argamassas em laboratório, os traços foram convertidos em massa com base nas massas unitárias dos materiais, conforme apresentado na Tabela 1.

A consistência das argamassas foi ajustada conforme a NBR 13276 [19], adotando-se índice de consistência de (255 ± 10) mm. O preparo das argamassas foi realizado em misturador mecânico, seguindo a sequência e os tempos de mistura estabelecidos pela NBR 7215 [20]. A água empregada na produção das argamassas foi proveniente do sistema público de abastecimento.

**Tabela 1: Traço em massa e relação a/agl. para moldagem dos corpos de prova.**

| Argamassa | Cimento (g) | Cal (g) | Areia (g) | PET (g) | Relação a/agl. |
|---|---|---|---|---|---|
| REF | 1575 | 567 | 11498 | 0 | 1,55 |
| 5% PET | 1575 | 567 | 10923 | 575 | 1,2 |
| 10% PET | 1575 | 567 | 10348 | 1150 | 1,27 |
| 15% PET | 1575 | 567 | 9773 | 1725 | 1,3 |

Fonte: os autores (2026).

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 × 100 mm e prismáticos de 40 × 40 × 160 mm, conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 7215 [20] e na ABNT NBR 13279 [19], respectivamente. Os painéis de revestimento para o ensaio de resistência de aderência à tração foram executados com as mesmas composições sobre substrato de alvenaria de blocos cerâmicos, previamente preparado com chapisco, mediante aplicação manual das argamassas, apresentando aproximadamente 97 cm de altura, 85 cm de largura e 20 mm de espessura.

### Propriedades Mecânicas

Após 24 h da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e submetidos à cura úmida em tanques cobertos com areia úmida. A determinação da

resistência à compressão foi realizada em corpos de prova cilíndricos, conforme a ABNT NBR 7215 [20], utilizando prensa hidráulica Shimadzu Servopulser, modelo EHF-EM100K1-020-0A, com capacidade máxima de 100 kN. A determinação da resistência à tração na flexão foi realizada em corpos de prova prismáticos, conforme a ABNT NBR 13279 [19]. Ambas as propriedades foram determinadas aos 7, 14, 28 e 56 dias.
A resistência de aderência à tração foi determinada aos 28 dias, em painéis de revestimento, conforme a ABNT NBR 13528 [21], utilizando dinamômetro manual digital da marca Solotest.

## MATERIAIS

### CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland utilizado foi do tipo CP II-Z 32. O material apresentou massa específica de 2,91 g/cm³, massa unitária de 1,15 g/cm³, superfície específica Blaine de 260 m²/kg e finura por peneiramento de 2,84%. A composição química foi predominantemente constituída por CaO (74,85%) e $SiO_2$ (16,59%), seguida por $SO_3$ (3,60%) e $Fe_2O_3$ (3,43%), sendo os demais óxidos encontrados em teores inferiores a 1%.

### CAL HIDRATADA

A cal hidratada utilizada foi do tipo CH-I, de natureza calcítica. O material apresentou massa específica de 2,63 g/cm³, massa unitária de 0,42 g/cm³ e superfície específica Blaine de 1445 m²/kg. A composição química foi predominantemente constituída por CaO (92,35%), com baixos teores de MgO (0,89%) e $SiO_2$ (0,62%), sendo os demais óxidos encontrados em concentrações inferiores a 0,4%

### AGREGADO MIÚDO NATURAL

O agregado miúdo natural utilizado foi proveniente do leito do Rio Paraíba. O material apresentou massa específica de 2,56 g/cm³, massa unitária de 1,40 g/cm³, módulo de finura de 2,25 e diâmetro máximo característico de 2,40 mm. A distribuição granulométrica apresentou maior concentração de partículas nas peneiras de 0,60 e 0,30 mm, caracterizando a areia como de granulometria fina a média.

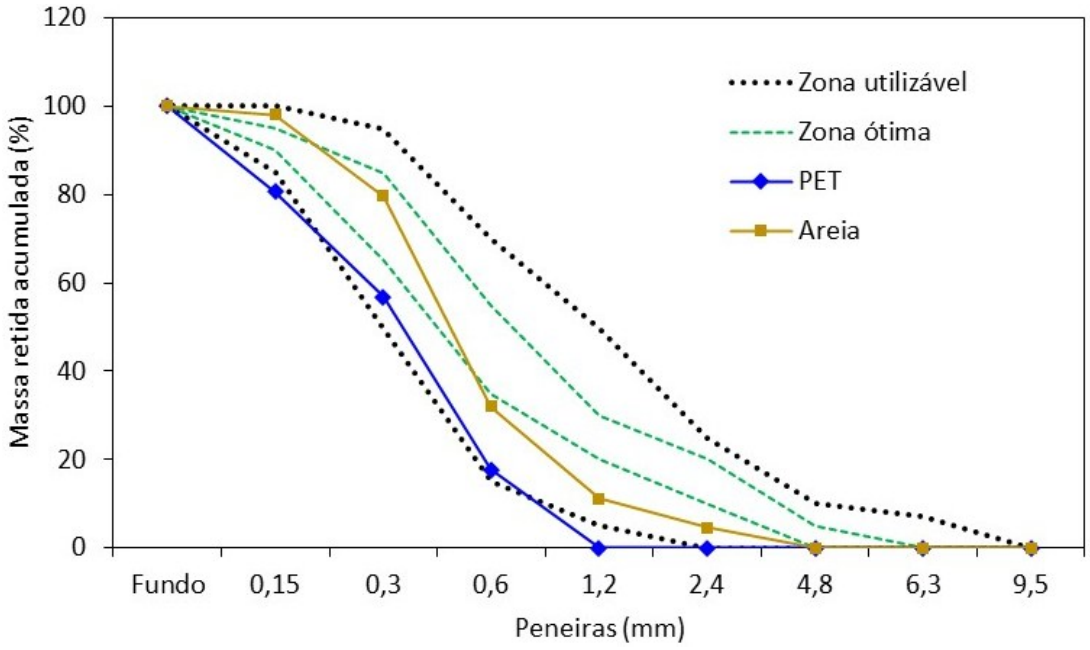
### AGREGADO MIÚDO POLIMÉRICO (PET)

O agregado alternativo consistiu em partículas obtidas a partir da trituração de garrafas PET pós-consumo, com dimensão inferior a 1 mm. Em razão de sua natureza polimérica, o material apresenta comportamento hidrofóbico e baixa rugosidade superficial, características que influenciam sua interação com a matriz cimentícia [8–10].

O agregado polimérico (PET) triturado apresentou massa unitária de 0,54 g/cm³ e massa específica de 1,45 g/cm³, valores significativamente inferiores aos do agregado miúdo natural. Do ponto de vista granulométrico, o material apresentou módulo de finura de 1,55 e diâmetro máximo de 0,6 mm, sendo classificado como agregado

miúdo muito fino, conforme a ABNT NBR 7211 [22]. A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica do PET em comparação com a areia natural, evidenciando a maior concentração de partículas do PET nas peneiras de menor abertura. Observa-se que o PET apresenta distribuição granulométrica mais fina que a areia, com maior concentração de partículas em peneiras de menor abertura.

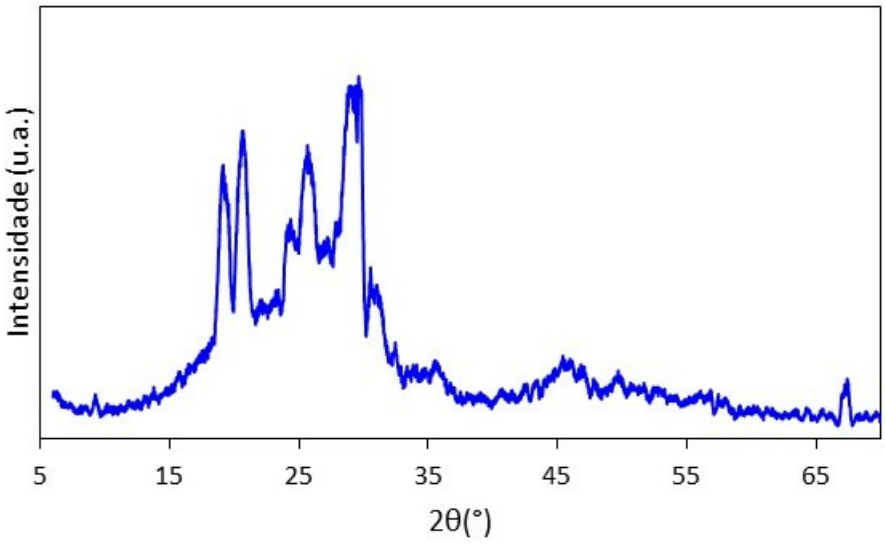
**Figura 1: Distribuição granulométrica do Politereftalato de Etileno triturado**




Fonte: os autores (2026).

A Figura 2 apresenta o difratograma do agregado polimérico reciclado. A análise por DRX indicou que o PET possui estrutura parcialmente cristalina, com picos característicos em 2θ de 16,25°, 17,62°, 21,48°, 22,71° e 26,67°, em conformidade com a ficha 00-060-0989 do banco de dados International Centre for Diffraction Data (ICDD).

**Figura 2: Difratograma do Politereftalato de Etileno triturado**



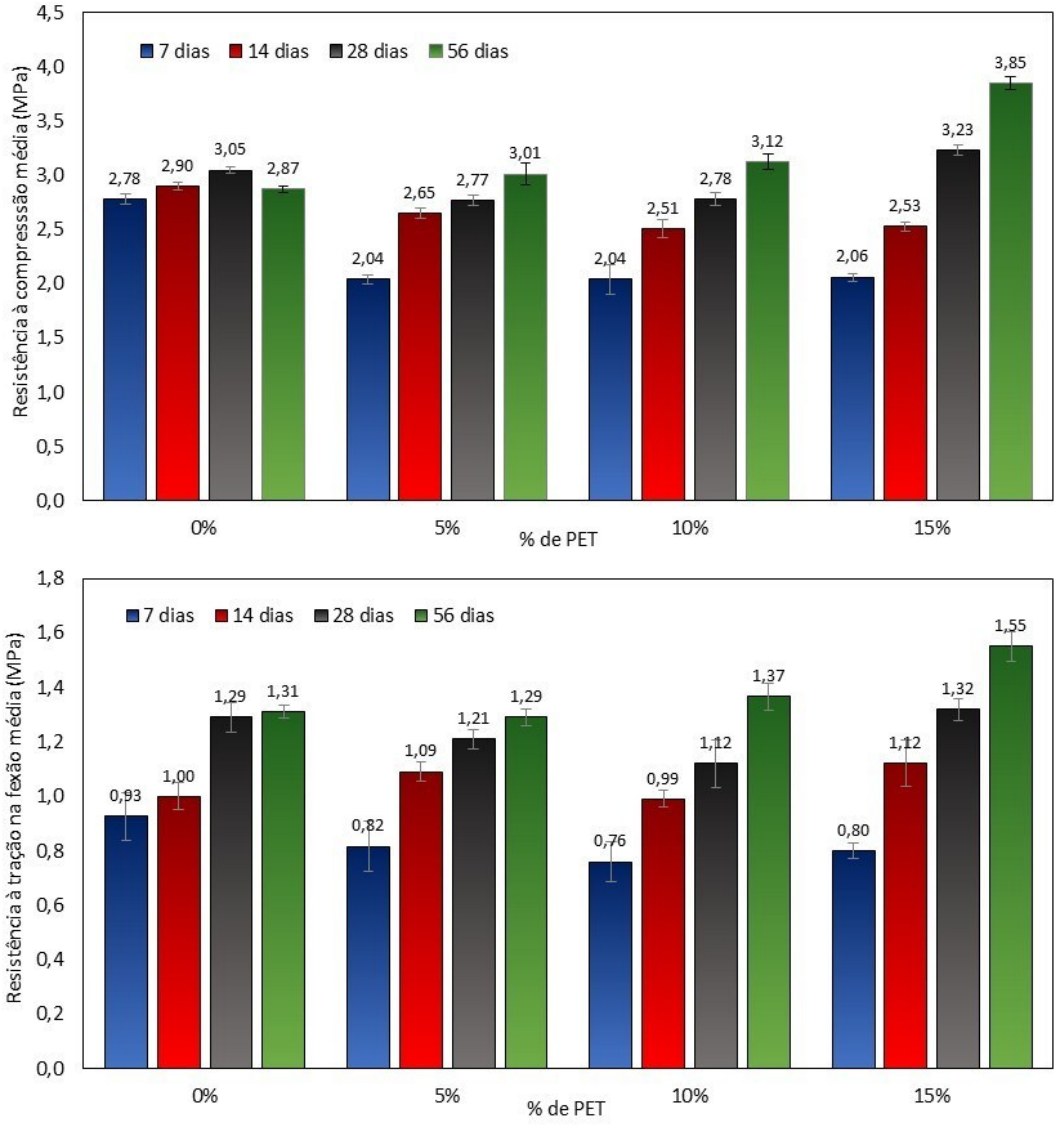

Fonte: os autores (2026).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### RESISTÊNCIA MECÂNICA: COMPRESSÃO E TRAÇÃO NA FLEXÃO

A Figura 4 apresenta os resultados de resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por PET, nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias.

**Figura 4: Resistência à compressão (acima) e resistência à tração na flexão (abaixo) das argamassas com diferentes teores de PET.**




Fonte: os autores (2026).

Para a resistência à compressão, os valores médios obtidos aos 7 dias foram inferiores ao traço de referência para todas as argamassas contendo PET. Aos 14 e 28 dias, o comportamento variou entre os diferentes teores de substituição, sem evidenciar uma tendência de aumento ou redução em função do teor de PET. Entretanto, aos 56 dias, todas as composições contendo PET apresentaram médias superiores à referência,

destacando-se a argamassa com 15% de substituição, que atingiu 3,85 MPa, aproximadamente 34% acima do traço de referência.

Na resistência à tração na flexão, também se observa, aos 7 dias, um comportamento inicial inferior para as argamassas contendo PET em relação à referência. Em idades posteriores, os resultados indicam aumento progressivo das resistências médias para todas as composições, sendo os maiores resultados obtidos para o teor de 15% de PET aos 28 e 56 dias. Aos 56 dias, essa composição atingiu 1,55 MPa, valor cerca de 18% superior ao da argamassa de referência.

A influência da incorporação do PET sobre as resistências tornou-se mais evidente nas idades avançadas. Esse comportamento pode estar relacionado à menor relação água/aglomerante necessária para atingir a consistência especificada, fator diretamente associado ao desenvolvimento da resistência mecânica [23]. A granulometria mais fina do PET também pode favorecer o empacotamento das partículas e a redução de vazios, conforme discutido na literatura [24]. Essa interpretação é corroborada por resultados anteriormente obtidos pelo grupo de pesquisa para as mesmas composições, nos quais a incorporação do PET reduziu a demanda de água e a absorção por capilaridade das argamassas, indicando uma microestrutura potencialmente mais compacta . Além disso, a superfície lisa e a natureza hidrofóbica do polímero favorecem o deslizamento entre as partículas e a disponibilidade de água livre, contribuindo para a trabalhabilidade [25].

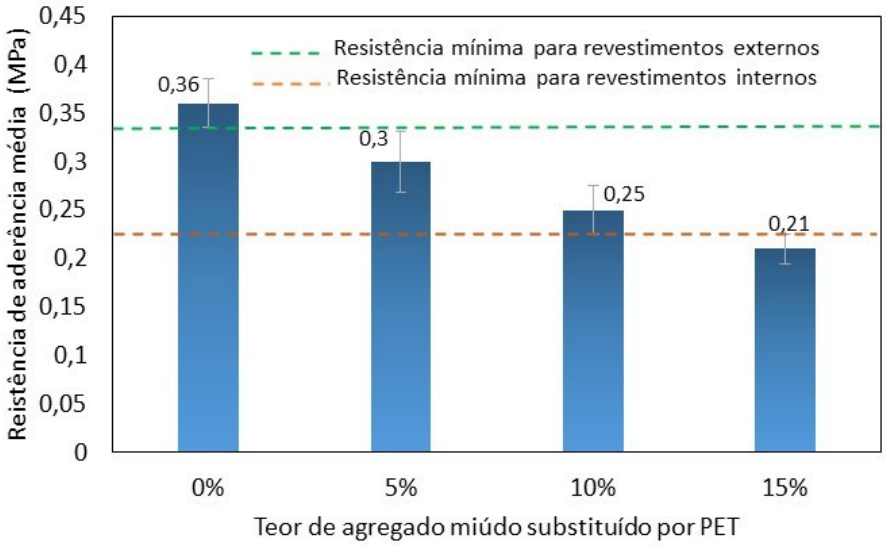
Entretanto, o comportamento mecânico não é governado apenas pela relação água/aglomerante e pela distribuição granulométrica. Embora a superfície lisa e a hidrofobicidade do PET possam favorecer a mobilidade da mistura no estado fresco, essas mesmas características, associadas à menor aderência entre o polímero e a pasta cimentícia, podem reduzir a eficiência da zona de transição, limitando o desenvolvimento das resistências, especialmente nas primeiras idades, conforme também observado por Bahij et al. [8]. Os resultados sugerem, portanto, que o comportamento mecânico decorre do equilíbrio entre os efeitos favoráveis da menor demanda de água e da distribuição das partículas e os efeitos desfavoráveis da limitada aderência interfacial.

De modo geral, a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão apresentaram comportamento semelhante, com desempenho inferior ao da argamassa de referência aos 7 dias e crescimento mais pronunciado até os 56 dias. Entre os teores avaliados, a mistura com 15% de PET apresentou os maiores valores de resistência aos 28 e 56 dias, alcançando, na última idade, resultados aproximadamente 34% e 18% superiores aos da referência para compressão e tração na flexão, respectivamente.

### RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

A Figura 4 apresenta os resultados médios de resistência de aderência à tração aos 28 dias. Observa-se redução gradual da resistência com o aumento do teor de substituição da areia por PET, passando de 0,36 MPa na argamassa de referência para 0,21 MPa na composição com 15% de PET. Essa redução pode estar relacionada à natureza hidrofóbica do PET e à sua superfície lisa, características que tendem a reduzir a aderência entre o agregado polimérico e a pasta cimentícia, conforme discutido por Wang et al. [25]

**Figura 4: Resistência média de aderência à tração para as argamassas investigadas.**




Fonte: os autores (2026).

Quanto à forma de ruptura, predominou a ruptura na camada de argamassa em todas as composições avaliadas. Na composição de referência, 8 dos 9 corpos de prova apresentaram esse tipo de ruptura, enquanto apenas 1 apresentou ruptura no substrato. Para a composição com 5% de PET, todos os 10 corpos de prova apresentaram ruptura na argamassa. Já nas composições com 10% e 15% de PET, esse tipo de ruptura foi observado em 6 dos 9 e 8 dos 9 corpos de prova, respectivamente, sendo as demais ocorrências registradas no substrato. Esses resultados são compatíveis com a predominância de falhas na própria argamassa, sugerindo que o comportamento do revestimento exerceu influência mais significativa na resistência de aderência do que a interface entre o revestimento e o substrato.

Sob o ponto de vista normativo, apenas a argamassa de referência atingiu o requisito mínimo para revestimentos externos (≥0,30 MPa). As demais composições atenderam apenas ao limite mínimo estabelecido para revestimentos internos (≥0,20 MPa).

## CONCLUSÃO

A incorporação de PET em substituição parcial ao agregado miúdo influenciou de forma distinta as propriedades mecânicas das argamassas avaliadas. Para as resistências à compressão e à tração na flexão, observou-se desempenho inferior nas primeiras idades, seguido de aumento mais pronunciado aos 56 dias, destacando-se a composição com 15% de PET, que apresentou os maiores valores de resistência entre os teores investigados.

Em contrapartida, a resistência de aderência à tração apresentou redução gradual com o aumento do teor de PET, embora todas as composições contendo PET tenham atendido ao requisito mínimo estabelecido para revestimentos internos.

Considerando conjuntamente os resultados obtidos, conclui-se que a substituição parcial da areia por PET reciclado constitui uma alternativa tecnicamente viável para argamassas de revestimento destinadas a aplicações internas, sendo o teor de 15% o que apresentou o melhor desempenho global entre as propriedades mecânicas avaliadas.

## DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

## REFERÊNCIAS

[1] FREITAS, G. R. F.; SANTOS, I. Z.; BRANDALISE, A. P.; BERTOLINI, L. T. Os sacos plásticos na perspectiva da sustentabilidade: uma revisão sistemática. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 10, p. 182–203, 2020. Disponível em: https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/2098.

[2] ESMAEILIAN, B.; WANG, B.; LEWIS, K.; DUARTE, F.; RATTI, C.; BEHDAD, S. The future of waste management in smart and sustainable cities: a review and concept paper. **Waste Management**, v. 81, p. 177–195, 2018. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.09.047.

[3] WEBB, H. K.; ARNOTT, J.; CRAWFORD, R. J.; IVANOVA, E. P. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). **Polymers**, v. 5, p. 1–18, 2012. https://doi.org/10.3390/POLYM5010001.

[4] MURINGAYIL JOSEPH, T.; AZAT, S.; AHMADI, Z.; et al. Polyethylene terephthalate (PET) recycling: a review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9, 100673, 2024. https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2024.100673.

[5] BENOSMAN, A. S.; TAÏBI, H.; SENHADJI, Y.; MOULI, M.; BELBACHIR, M.; BAHLOULI, M. I. Plastic waste particles in mortar composites: sulfate resistance and thermal coefficients. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology**, v. 33, p. 171–201, 2017. https://doi.org/10.1177/147776061703300304I.

[6] KOCOT, A.; ĆWIRZEŃ, A.; PONIKIEWSKI, T.; KATZER, J. Strength characteristics of alkali-activated slag mortars with the addition of PET flakes. **Materials**, v. 14,

6274, 2021. https://doi.org/10.3390/MA14216274.

[7] ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. Poli(tereftalato de etileno) (PET): uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, v. 19, p. 121–132, 2009. https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000200009.

[8] BAHIJ, S.; OMARY, S.; FEUGEAS, F.; FAQIRI, A. Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste: a review. **Waste Management**, v. 113, p. 157–175, 2020. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.05.048.

[9] ZAPAŁA-SŁAWETA, J.; MAZUREK, G.; WOŚ, J. Analysis of the influence of PET and glass packaging waste materials on the physical and mechanical properties of cementitious composites. **Applied Sciences**, v. 13, 12409, 2023. https://doi.org/10.3390/APP132212409.

[10] JUCÁ, P. H. de O. **Estudo das propriedades mecânicas em diferentes temperaturas do PET e ensaios de arrancamento com tratamento mecânico em matriz cimentícia à base de cimento Portland**. 2017.

[11] FERNANDES, I. V.; NASCIMENTO, C. F. G. do; SANTOS, M. D. dos; MENDONÇA, A. M. G. D.; MELO NETO, A. A. de. **Avaliação das propriedades físicas de argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por PET reciclado**. Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, v. 6, 2025. https://doi.org/10.46421/EUROELECS.V6.8112.

[12] CARASEK, H.; JAPIASSÚ, P.; CASCUDO, O.; VELOSA, A. Bond between 19th century lime mortars and glazed ceramic tiles. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 85–98, 2014.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Portland cement and other powdery materials – Determination of specific gravity. Rio de Janeiro, 2017.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Portland cement and other powdery materials – Determination of Blaine fineness. Rio de Janeiro, 2015.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm. Rio de Janeiro, 2012.

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2022.

[19] 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, 2005.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Revestimento de

paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

[23] NEVILLE, A. M.; CREMONINI, R. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

[24] BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

[25] 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, 143567, 2024. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143567.