

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS CONTENDO PARTÍCULAS PET PÓS-CONSUMO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO.

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.I-005>

Laura Menegat Dias Cordeiro(*), Nathália Pacheco Teixeira, Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar, Alexandre Landesmann.

* Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil-COPPE–Rio de Janeiro, RJ, Brasil
lauramenegat@coc.ufrj.br

RESUMO

A crescente demanda por sustentabilidade na construção civil tem impulsionado a busca por alternativas ao uso de recursos naturais não renováveis, como a areia. Nesse contexto, este trabalho propõe a incorporação de partículas de politereftalato de etileno (PET) pós-consumo como substituição parcial do agregado miúdo em argamassas. Foram produzidos compósitos com teores volumétricos de PET de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, a partir de um traço de referência 1:3 (cimento: areia) e relação água/cimento de 0,53. As misturas foram avaliadas nos estados fresco (índice de consistência e massa específica aparente) e endurecido (resistência à compressão aos 28 dias). Observou-se que o aumento do teor de PET promoveu reduções significativas no índice de consistência de até 28,2% (PET20 em relação à REF), na massa específica de até 45,8% (PET50 em relação à REF) e na resistência à compressão uniaxial de até 90,2% (PET50 em relação à REF). Contudo, os compósitos com até 20% de PET apresentaram desempenho compatível com aplicações não estruturais para argamassas, destacando-se como alternativas viáveis em painéis de vedação e elementos construtivos leves. Os resultados reforçam o potencial do reaproveitamento de resíduos plásticos na composição de materiais cimentícios sustentáveis, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados à extração mineral e à disposição inadequada do plástico.

PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem de resíduos, Agregados PET pós consumo, Índice de consistência, Massa específica aparente, Resistência a compressão.

ABSTRACT

The growing demand for sustainability in the construction industry has driven the search for alternatives to the use of non-renewable natural resources, such as sand. In this context, this study proposes the incorporation of post-consumer polyethylene terephthalate (PET) particles as a partial replacement for fine aggregate in mortars. Composites were produced with PET volumetric contents of 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%, based on a reference mix of 1:3 (cement: sand) with a water/cement ratio of 0.53. The mixtures were evaluated in both fresh (consistency index and apparent specific mass) and hardened states (compressive strength at 28 days). The results showed that increasing the PET content significantly reduced the consistency index by up to 28.2% (PET20 compared to REF), the specific mass by up to 45.8% (PET50 compared to REF), and the uniaxial compressive strength by up to 90.2% (PET50 compared to REF). However, composites with up to 20% PET exhibited performance compatible with non-structural mortar applications, standing out as viable alternatives for sealing panels and lightweight construction elements. The results reinforce the potential of reusing plastic waste in the composition of sustainable cementitious materials, contributing to mitigating the environmental impacts associated with mineral extraction and improper plastic disposal.

KEY WORDS: Waste recycling, Post-consumer PET aggregates, Consistency index, Apparent specific mass, Compressive strength.

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade na construção civil envolve não apenas a diminuição do desperdício de materiais, mas também a adoção de medidas que possibilitem a redução do consumo de insumos e de custos. Adicionalmente, busca-se o reaproveitamento de materiais e a utilização eficiente dos recursos naturais. Em relação ao consumo de recursos naturais, a areia e o cascalho somente perdem para água, com cerca de 40 e 50 bilhões de toneladas extraídas por ano (UNEP, 2019). Falando especificamente da areia, o seu consumo tem ocorrido em um ritmo mais rápido do que sua capacidade de reposição natural, resultando em impactos ambientais e sociais adversos (UNEP, 2019). Entre os impactos ambientais decorrentes da extração excessiva de areia, tem-se poluição, inundações, diminuição das águas subterrâneas e agravamento de secas.

No mesmo âmbito de problemas ambientais, a produção e o consumo global de plástico cresceram exponencialmente desde a década de 1950, sendo projetada para atingir cerca de 450 milhões de toneladas até 2025 e 1,2 bilhão de toneladas até 2060 (UNEP, 2023). Com o aumento da produção do plástico, também houve um crescimento na poluição decorrente do seu descarte inadequado. Cerca de 11 milhões de toneladas de plásticos chegam aos oceanos por ano a partir de fontes terrestres, representando pelo menos 85% de todo o lixo marinho (UNEP, 2023). No cenário brasileiro, a reciclagem de politereftalato de etileno (PET) ocupa uma posição de destaque em relação aos demais plásticos. De acordo com o 12º Censo de Reciclagem de PET no Brasil, realizado pela Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), 56,4% das embalagens descartadas pelos consumidores foram recicladas em 2021 (ABIPET, 2021). Embora o país tenha avançado em relação à reciclagem de PET, cerca de 277 mil toneladas de PET pós-consumo não foram recicladas em 2021 (ABIPET, 2021).

Diversos estudos têm investigado o uso de resíduos de PET como substituto parcial da areia em argamassas, com o objetivo de promover sustentabilidade, reduzir o impacto ambiental da construção civil e contribuir para a economia circular.

Kim *et al.* (2021) investigaram os efeitos do uso de flocos de PET reciclado de origem oceânica como substituição parcial da areia natural em argamassas com traço 1: 2,5 (cimento: areia, em massa), relações água-cimento (a/c) variando entre 0,30 e 0,60. Foram testadas substituições de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% do volume de areia por PET. Os flocos de PET possuíam espessura entre 0,5 e 1,2 mm e todos os flocos passaram pela peneira de 10 mm e ficaram retidos na peneira de 1 mm. A argamassa de referência, com relação a/c igual a 0,55 (sem PET), teve um espalhamento de 220 mm e uma resistência a compressão de 32 MPa. As substituições parciais de areia por flocos de PET promoveram reduções no espalhamento de até 12% e na resistência de 38% (argamassa com 20% de PET). Para todas as argamassas estudadas, as substituições de areia por PET causaram quedas no espalhamento e na resistência à compressão com o aumento da concentração de PET.

Beibei *et al.* (2021) estudaram argamassas com traço 1: 3 (cimento: areia, em massa), relação a/c igual a 0,42 e com substituições (em volume) de 5% e 10% da areia por pó de PET com tamanho de partículas inferior a 2,0 mm. A argamassa de referência apresentou massa específica aparente igual a 2332 kg/m³, enquanto as argamassas com 5% e 10% de PET tiveram massas específicas iguais a 2230 kg/m³ e 2209 kg/m³, respectivamente. Ao comparar os resultados de resistência à compressão aos 28 dias da referência com a argamassa com 10% de PET, houve uma redução superior a 15%. Os pesquisadores atribuíram ao comportamento observado na massa específica à menor massa específica do PET em relação à areia, enquanto a queda na resistência foi devido à baixa adesão entre os agregados PET e a matriz cimentícia (Beibei *et al.*, 2021).

Oliveira *et al.* (2020) estudaram argamassas com traço 1: 4 (cimento: areia, em massa), relação a/c de 0,75 e substituições parciais de areia por partículas PET. Foram avaliadas duas argamassas com partículas PET com distribuição granulométrica similar a areia, nos teores (em volume) de 5% e 10% (denominadas A5P e A10P), e uma argamassa com fração volumétrica de 5% de partículas PET com tamanhos maiores que 4 mm (nomeada A5PG). A argamassa de referência, sem substituição de areia por PET, apresentou espalhamento igual a 184 mm, massa específica de 1703 kg/m³ e resistência à compressão aos 28 dias de 30 MPa. As substituições de areia por PET proporcionaram reduções nas propriedades estudadas de até: 8% (argamassa A5P) e 18% (argamassa A5PG) no diâmetro de espalhamento; 32% (argamassa A10P) e 5% (argamassa A5PG) na massa específica; e 47% (argamassa A10P) na resistência à compressão. Já a argamassa com 5% de partículas PET maiores que 4 mm (argamassa A5PG) apresentou uma resistência à compressão 10% superior que a argamassa de referência. Os pesquisadores observaram uma baixa

aderência entre as partículas PET e a matriz cimentícia nos corpos de prova de compressão, decorrente do comportamento hidrofóbico do plástico (Oliveira *et al.*, 2020).

Kunthawatwong *et al.* (2022) avaliaram argamassas com traço 1: 2,75 (cimento: areia, em massa) e relação a/c igual a 0,50, com substituições de areia por PET em teores de 10% e 20% (em volume). A distribuição granulométrica das partículas PET adotadas foi similar à da areia. Os resultados indicaram que a substituição de areia por PET resultou em redução na resistência à compressão de até 55%, passando de 49,5 MPa (argamassa de referência sem PET) para 28,9 MPa (10% PET) e 22,5 MPa (20% PET). As massas específicas das argamassas foram iguais a 2042 kg/m³ (0% PET), 1853 kg/m³ (10% PET) e 1763 kg/m³ (20% PET). As substituições de areia por PET causaram quedas na massa específica de até 14%, para o teor de substituição de 20%.

Teixeira *et al.* (2024) investigaram argamassas leves com substituições parciais da areia, em volume, por partículas PET provenientes de garrafas trituradas, em teores de 5%, 10%, 15%, 50%, 60% e 70%. As misturas foram preparadas com traço 1: 3 (cimento: areia, em massa), relação a/c de 0,45 e adição de superplastificante. As partículas PET possuíam morfologia irregular e tamanho variando entre 0,2 mm e 6,2 mm. Foram realizados ensaios de índice de consistência e resistência à compressão aos 7 e 28 dias. O índice de consistência da mistura de referência foi igual a 259 mm, enquanto as misturas com PET alcançaram menores resultados, iguais a: 237 mm (PET05), 217 mm (PET10) e 193 mm (PET15). A resistência à compressão da argamassa de referência foi igual a 53,7 MPa. As argamassas com menores teores de PET (até 15%) apresentaram melhores desempenhos mecânicos, com resistência à compressão variando de 24 MPa (PET15) a 38 MPa (PET10), enquanto as com maiores teores (a partir de 50%) apresentaram valores significativamente reduzidos, entre 0,5 MPa (PET70) e 1,5 MPa (PET50). Apesar dos prejuízos aos desempenhos nos estados fresco e endurecido verificados pelas substituições de areia por partículas PET, as autoras concluíram que as argamassas apresentaram propriedades adequadas para a aplicação em painéis sanduíches, sendo as argamassas com até 15% de PET indicadas para as faces externas e as argamassas com teores de PET a partir de 50% para o núcleo.

OBJETIVOS

No contexto apresentado, com o objetivo de mitigar tanto o consumo de areia quanto a poluição proporcionada pelo PET, este estudo propõe o uso de agregados PET em argamassa, obtidos pela trituração de garrafas, em substituições parciais de areia 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Os compósitos foram avaliados nos estados fresco, através dos ensaios de índice de consistência e de massa específica aparente, e endurecido, por ensaios de resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de idade. A pesquisa objetivou o aproveitamento de um resíduo danoso ao meio ambiente como um recurso que pode ser incorporado em materiais sustentáveis para a construção civil.

METODOLOGIA

Para a confecção das argamassas foram adotados o cimento CPV-ARI (Lafarge-Holcim), a areia lavada de rio, a água do sistema de abastecimento do Rio de Janeiro e as partículas PET.

As partículas de PET foram obtidas a partir de garrafas de água mineral e de refrigerante. As garrafas foram lavadas, os rótulos e tampas removidos, foram secas de forma natural sobre uma lona e, por fim, foram trituradas (Figura 1a). A Figura 1c apresenta o aspecto final das partículas adotadas na pesquisa, obtidas após 4 triturações, pois não houve redução do tamanho das partículas nas triturações subsequentes.

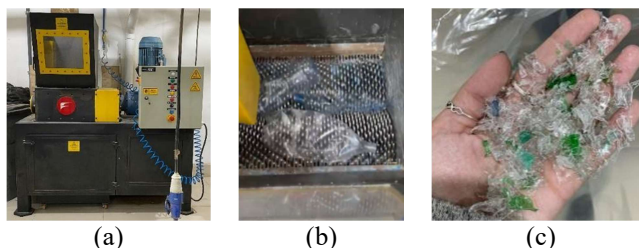


Figura 1 – Processo de trituração: (a) Equipamento; (b) Garrafas sendo trituradas; (c) Aspecto das partículas

Caracterização dos materiais

O cimento foi caracterizado quanto à massa específica (em picnômetro a gás hélio), distribuição granulométrica (granulômetro a laser), composição química (espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X) e perda ao fogo, conforme a norma ABNT NM 18 (2012). A areia foi avaliada quanto à massa específica e massa específica aparente (em triplicata), seguindo as normas ABNT NM 52 (2009) e ABNT NBR 16916 (2021) e quanto à granulometria (em triplicata), de acordo com a norma ABNT NBR 17054 (2022). As partículas PET também tiveram a massa específica (picnômetro a gás hélio) e a granulometria (ABNT NBR 17054, 2022) determinadas.

Traço, preparo e cura dos compósitos

A partir de uma argamassa de referência (REF) com traço de 1:3 (cimento: areia, em volume) e relação água-cimento igual a 0,53 foram produzidos compósitos com substituições de areia por PET (em volume) iguais a: 10% (PET10), 20% (PET20), 30% (PET30), 40% (PET40) e 50% (PET50).

O preparo das argamassas foi realizado em uma argamassadeira (capacidade de 5 litros), conforme a norma ABNT NBR 16541 (2016). Cinco corpos de provas cilíndricos (5 cm de diâmetro e 10 cm de altura) foram moldados por compósito para os ensaios de compressão. As moldagens da REF, PET10, PET20 e PET30 foram realizadas com o preenchimento do molde em 3 camadas, utilizando o bastão de vidro para adensamento. Em decorrência dos altos teores de PET, os compósitos PET40 e PET50 foram moldados com preenchimentos dos moldes em até 5 camadas, com os adensamentos realizados por um soquete, sem o total preenchimento dos moldes (cerca de 5 mm). O espaço vazio foi preenchido com pasta de cimento (relação água-cimento de 0,3). Após 24 horas de cura úmida, os cilindros foram desmoldados e mantidos na câmara de cura (temperatura = $21 \pm 1^\circ\text{C}$ e 100% de umidade) até a idade de 28 dias. Os cilindros foram faceados no torno mecânico para a retirada de imperfeições das faces.

Caracterização física e mecânica dos compósitos

Os compósitos foram avaliados no estado fresco em triplicata quanto ao índice de consistência (Figura 2a), conforme a norma ABNT NBR 13276 (2016), e massa específica aparente, em uma balança de lama (Figura 2b). A caracterização mecânica foi por meio do ensaio de compressão uniaxial aos 28 dias em prensa com célula de carga de 100 kN e velocidade de 0,1mm/min (Figura 2c e Figura 2d).

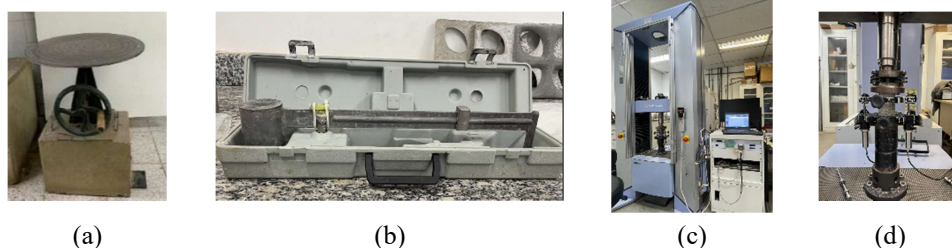


Figura 2 – Ensaios físicos e mecânico: (a) Mesa de consistência; (b) Balança de lama; (c) Prensa de ensaios; (d) Detalhe do corpo de prova.

As propriedades das argamassas foram submetidas à análise estatística pelo método da Análise de Variância (ANOVA) do programa computacional OriginPro2016. Para a comparação das médias foi adotado o *Método de Tukey*, a um nível de confiança igual a 95%.

RESULTADOS

Caracterização dos materiais

As distribuições granulométricas dos materiais granulares estão apresentadas na Figura 3. Os diâmetros abaixo dos quais se situaram 10% (D_{10}), 50% (D_{50}) e 90% (D_{90}) das partículas do cimento foram iguais a $2,71 \pm 0,01 \mu\text{m}$, $17,07 \pm 0,06 \mu\text{m}$ e $42,5 \pm 0,08 \mu\text{m}$, respectivamente. A areia apresentou os diâmetros médios iguais a: $0,21 \pm 0,01 \text{ mm}$ (D_{10}),

$0,69 \pm 0,03$ mm (D_{50}) e $2,09 \pm 0,05$ mm (D_{90}). Já as partículas PET apresentaram distribuição granulométrica superior à areia e ao cimento, com os seguintes diâmetros médios: 2,13 mm (D_{10}), 4,08 mm (D_{50}) e 6,16 mm (D_{90}).

O cimento e as partículas PET apresentaram massas específicas iguais a $3,080 \pm 0,003$ g/cm³ e $1,393 \pm 0,002$ g/cm³, respectivamente. As seguintes massas específicas foram determinadas para a areia: $2,39 \pm 0,02$ g/cm³ (condição seca), $2,44 \pm 0,02$ g/cm³ (condição saturada superfície seca) e $2,53 \pm 0,02$ g/cm³ (massa específica real). A absorção de água da areia foi igual a $2,34 \pm 0,13\%$.

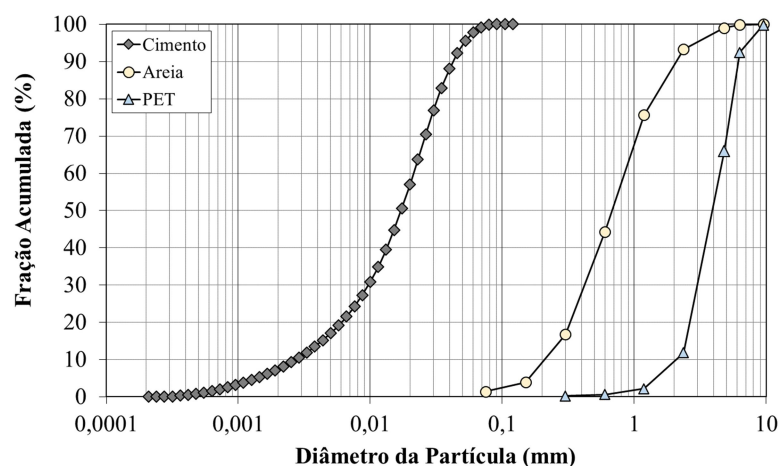


Figura 3 – Distribuições granulométricas dos materiais granulares.

A Tabela 1 mostra os resultados da composição química e da perda ao fogo (PF) do cimento. O cimento atende aos critérios da ABNT NBR 16697 (2018), que exigem para o tipo de cimento adotado teores de perda ao fogo e óxido de magnésio menores ou iguais a 6,5% e trióxido de enxofre menor ou igual a 4,5%.

Tabela 1 - Composição química do cimento.

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	SrO	TiO ₂	PF
CPV-ARI	12,57	3,54	4,10	68,74	0,46	3,55	0,32	0,26	6,34 ± 0,05

Caracterização das argamassas

Os aspectos das argamassas após os ensaios estão apresentados na Figura 4a (REF), na Figura 4b (PET10), na Figura 4c (PET20), na Figura 4d (PET30), na Figura 4e (PET40) e na Figura 4f (PET50). Os seguintes índices de consistência foram determinados: $256,0 \pm 6,9$ mm (REF), $224,7 \pm 9,0$ mm (PET10) e $183,7 \pm 7,6$ mm (PET20). A análise estatística mostrou diferenças significativas ao comparar os índices de consistência das argamassas, com reduções no índice de consistência em relação à REF de 12,2% (PET10) e de 28,2% (PET20). Os compósitos PET30, PET40 e PET50 não apresentaram coesão e, por isso, os seus diâmetros de espalhamento não foram medidos. No entanto, mesmo com as perdas de consistência pela substituição de areia por PET nos maiores teores, o ajuste no procedimento de moldagem permitiu a confecção de corpos de prova de compressão homogêneos.

Reduções no diâmetro de espalhamento e, decorrência de substituições parciais de areia por partículas PET em argamassas também foram observadas por outros pesquisadores. Ao comparar a argamassa de referência com relação a/c igual a 0,55 com as argamassas com partículas PET, Kim *et al.* (2021) verificaram uma queda de 12% nesta propriedade com 20% de substituição de areia por flocos de PET (em volume). Oliveira *et al.* (2020) avaliaram argamassas confeccionadas com relação a/c de 0,75 e com substituições de areia por partículas PET com duas frações granulométricas. Ao comparar os índices de consistência da argamassa de referência com as argamassas com PET com distribuição granulométrica similar a areia, os pesquisadores constataram uma redução de até 8% (argamassa com 5% de PET). Já, ao comparar os resultados da argamassa de referência e a argamassa com partículas PET maiores que 4 mm, verificou-se uma queda de 18% (argamassa com 5% de PET). Ao substituir a areia por partículas PET em argamassas com relação a/c igual a 0,45, Teixeira *et al.* (2024) verificaram reduções no índice de consistência de até 25% (argamassa com 15% de PET).

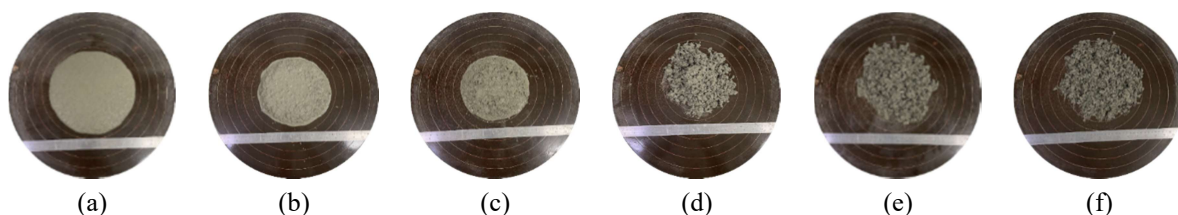


Figura 4 – Aspectos das argamassas com partículas PET: (a) REF; (b) PET10; (c) PET20; (d) PET30; (e) PET40; (f) PET50.

As massas específicas aparentes médias e os respectivos desvios-padrões dos compósitos estão apresentados na Figura 5. Ao comparar os resultados das argamassas PET10 e REF, não houve variação estatística significativa. A análise estatística mostrou que não houve variações significativas entre os resultados da PET10 e PET20 e entre os resultados da PET20 e PET30. No entanto, diferenças estatísticas significativas foram constatadas ao comparar os resultados das argamassas com teores de PET superiores a 10% com a argamassa REF, sendo que o aumento do teor de PET impactou em quedas da massa específica aparente iguais a: 6,1% (PET20), 11,2% (PET30), 30,4% (PET40) e 45,8% (PET50). Os resultados estão coerentes, uma vez que as partículas PET possuem massa específica inferior à da areia.

Os resultados estão em consonância com a literatura, uma vez que outros pesquisadores também constataram reduções nas massas específicas de argamassas devido às substituições parciais de areia por partículas PET. Beibei *et al.* (2021) verificaram queda na massa específica aparente de até 5%, para a argamassa com 10% de substituição de areia por pó de PET (em volume). Oliveira *et al.* (2020) observaram decréscimos na massa específica que variaram entre 5% (argamassa com fração volumétrica de 5% de partículas PET maiores que 4 mm) e 32% (argamassa com fração volumétrica de 10% de partículas PET na mesma faixa granulométrica que a areia).

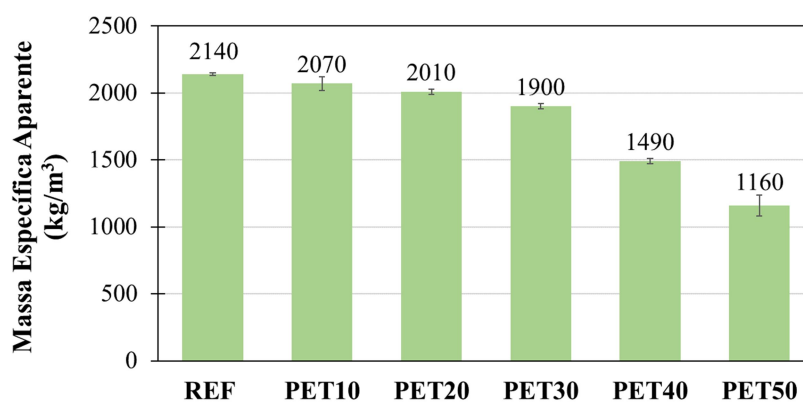


Figura 5 – Massas específicas aparentes.

As resistências à compressão médias e os respectivos desvios-padrões dos compósitos estão apresentadas na Figura 6. A análise estatística indicou que a substituição de areia por PET promoveu variações significativas na resistência à compressão, com decréscimos na resistência em relação à REF de 26,6% (PET10), 48,8% (PET20), 70,2% (PET30), 83,5% (PET40) e 90,2% (PET50).

Os prejuízos ao desempenho mecânico observados na pesquisa em decorrência das substituições parciais de areia por partículas PET estão em consonância com a literatura. Kim *et al.* (2021) constataram que as substituições parciais de areia por flocos de PET (em volume) promoveram reduções na resistência à compressão de até 38% (argamassa com 20% de PET). Beibei *et al.* (2021) verificaram decréscimo na resistência à compressão superior a 5%, para a argamassa com 10% de substituição de areia por pó de PET (em volume). Ao comparar os resultados das argamassas com PET e a argamassa de referência, Oliveira *et al.* (2020) observaram dois comportamentos distintos na resistência à compressão pela substituição da areia por partículas PET: redução de até 47% no desempenho, para a argamassa com fração volumétrica de 10% de partículas PET com distribuição granulométrica similar à areia; e aumento de 10% da resistência, para a argamassa com fração volumétrica de 5% de partículas PET maiores que 4 mm. Os resultados de resistência à compressão do estudo realizado por Kunthawatwong *et al.* (2022) mostraram que as substituições parciais de areia por partículas PET (com distribuição granulométrica similar à areia) impactaram em uma redução nesta propriedade de até 55% (argamassa com 20% de substituição de areia por PET, em volume). Teixeira *et al.* (2024)

também verificaram prejuízos ao desempenho sob compressão pelas substituições parciais de areia por partículas PET (tamanhos entre 0,2 mm e 6,2 mm). Ao comparar as resistências à compressão da argamassa de referência com os compósitos com teores de substituição de PET, as quedas nesta propriedade variaram entre 29% (argamassa com 10% de PET) e 97% (argamassa com 50% de PET).

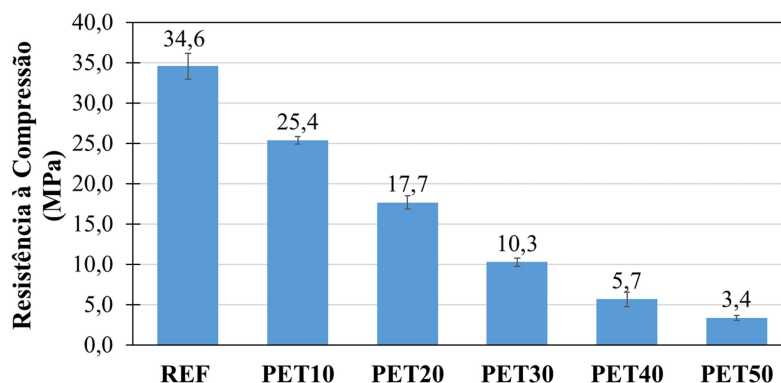


Figura 6 – Resistências à compressão aos 28 dias.

Os modos de ruptura das misturas podem ser verificados na Figura 7a (REF), Figura 7b (PET10), Figura 7c (PET20), Figura 7d (PET30) e Figura 7e (PET50). Houve uma predominância de ruptura por cisalhamento.

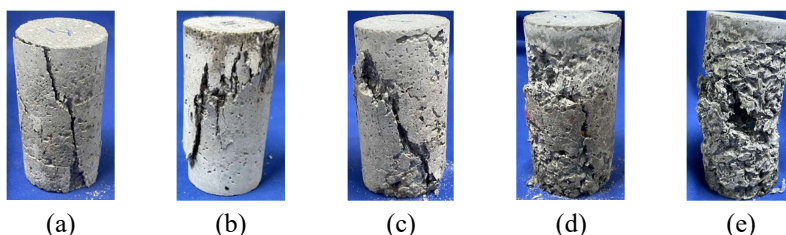


Figura 7 – Modos de ruptura: (a) REF; (b) PET10; (c) PET20; (d) PET30; (e) PET50.

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos neste estudo foi possível entender os comportamentos dos compósitos com substituições parciais de areia por PET no que diz respeito à consistência, massa específica aparente e resistência à compressão uniaxial.

Através do ensaio de índice de consistência, foi verificado que o aumento do teor de PET proporcionou a diminuição dessa propriedade. Além disso, para os maiores teores de PET, não houve a manutenção da coesão, mas todos os compósitos apresentaram consistências suficientes para as moldagens.

Na determinação da massa específica aparente, houve um decréscimo dessa propriedade com o aumento do teor de PET. O resultado foi como o esperado, pois o PET é um material mais leve que a areia e, além disso, aumenta o índice de vazios nas misturas.

Os resultados do ensaio de compressão evidenciaram que a adição de PET causou prejuízos ao desempenho mecânico.

As propriedades estudadas nos estados fresco e endurecido apontam algumas possibilidades de aplicação dos compósitos. Em virtude das trabalhabilidades e resistências à compressão alcançadas, os compósitos PET10 e a PET20 são bons candidatos para aplicação em painéis de vedação pré-moldados e em faces de painéis sanduíche. Enquanto os compósitos PET40 e PET50, em função das baixas massas específicas aparentes, poderiam ser utilizados em núcleos de painéis sanduíche e em blocos de vedação.

Na continuidade da pesquisa serão avaliados os impactos das partículas PET na absorção total de água, índice de vazios, massa específica e na resistência à compressão residual. O principal objetivo é ter uma compreensão mais abrangente do comportamento dos compósitos com PET, cuja utilização mitigará os danos causados pela exploração da areia e pela poluição do PET.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Associação Brasileira da Indústria do PET – ABIPET (2021), “12º Censo de Reciclagem do PET no Brasil”. Disponível em: <https://abipet.org.br/reciclagem/>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2025.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021), “Agregado Miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água: NBR 16916”. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
3. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), “Agregado Miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente: NBR NM 52”. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
4. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022), “Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio: NBR 17054”. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016), “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência: NBR 13276”. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
6. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016), “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios: NBR 16541”. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), “Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo: NBR NM 18”. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018), “Cimento Portland – Requisitos: NBR 16697”. ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
9. United Nations Environment Programme – UNEP (2023), “An Opportunity to End Plastic Pollution: A Global International Legally Binding Instrument”. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/perspective-series/issue-no-44-opportunity-end-plastic-pollution-global-international>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2025.
10. United Nations Environment Programme – UNEP (2019), “Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources”. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28163>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2025.
11. Kim, M.O.; Lee, H.K.; Kim, H.K. **Cost and environmental effects of ocean-borne plastic flakes in cement mortar considering equivalent-strength mix design**. Construction and Building Materials, [S.l.], v. 291, p. 123267, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821010278> Acesso em: 31 mar. 2025.
12. Beibei, X.; Devid, F.; Giuseppe, C.; Luciana, R.; Fabio, T.; Andrea, F.G. **Experimental Characterization of Mortar with Recycled PET Aggregate: Preliminary Results**. Procedia Structural Integrity, v. 33, p. 1027–1034, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321621002092> Acesso em: 30 mar 2025
13. Oliveira, M.R., Garcia, M.L., Castro, A.C.M., Silva, T.N. **Mortar with pet—Preliminary results**. 6th International Conference on Energy and Environment Research: “Energy and environment: challenges towards circular economy”. Aveiro, 2019. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719311783> Acesso: 30 mar 2025
14. Kunthawatwong, R.; Sylisomchanh, L.; Pangdaeng, S.; Wongsu, A.; Sata, V.; Sukontadukkul, P.; Chindaprasit, P. **Recycled non-biodegradable polyethylene terephthalate waste as fine aggregate in fly ash geopolymer and cement mortars**. Construction and Building Materials, v. 328, p. 127084, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127084> Acesso em: 30 mar. 2025.
15. Teixeira, N.P.; Glória, M.Y.R.; Balthar, V.K.C.B.L.M. **Estudo experimental de argamassas leves produzidas com partículas PET residuais em substituição parcial da areia**. CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 15., 2024, Belém. Anais [...]. Belém: IBEAS, 2024. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/congresso15.htm> Acesso em: 31 mar. 2025.