CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE COMPÓSITOS LEVES COM SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS DE AREIA POR PARTÍCULAS PET RESIDUAIS

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF LIGHTWEIGHT COMPOSITES WITH PARTIAL REPLACEMENTS OF SAND BY WASTE PET PARTICLES

Nathália Pacheco Teixeira [1]; M'hammed Yassin Rajiv da Gloria [2]; Thiago Melo Grabois [3]; Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar [4].

[1]Arquiteta e Urbanista | nathalia.teixeira@coc.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; [2]Doutor | yassin@coc.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; [3]Doutor | grabois@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; [4]Doutora | vivian@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo:
Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a caracterização experimental de compósitos leves com substituições da areia natural por partículas de polietileno tereftalato (PET) residuais. Além da referência (sem PET), foram produzidas seis misturas, divididas em dois grupos: teores de PET de 5%, 10% e 15% (Grupo 1); teores mais elevados de 50%, 60% e 70% (Grupo 2). Os compósitos foram avaliados quanto ao índice de consistência, ao comportamento físico (absorção total de água, massa específica e índice de vazios) e mecânico (resistência à compressão). Os resultados mostraram misturas coesas e com boas trabalhabilidades no Grupo 1, enquanto nos compósitos do Grupo 2, os altos teores de PET prejudicaram a coesão. A incorporação de PET promoveu aumentos na absorção de água e índice de vazios, além de reduções na massa específica, conferindo leveza aos compósitos. Apesar das quedas nas resistências mecânicas com o aumento do teor de PET, as misturas do Grupo 1 superaram os 15 MPa para aplicação estrutural (RILEM, 1978). Em suma, os resultados indicam o potencial desses compósitos para aplicações estruturais e não estruturais, como elementos de vedação. O estudo reforça a viabilidade do uso de resíduos plásticos na construção civil como estratégia de sustentabilidade e economia circular.

Palavras-chave:
Compósitos leves; partículas PET residuais; resistência à compressão; desenvolvimento sustentável.

Abstract:
This study presents the development and experimental characterization of lightweight composites with replacement of natural sand by residual polyethylene terephthalate (PET) particles. In addition to the reference mix (without PET), six mixtures were produced and divided into two groups: PET contents of 5%, 10%, and 15% (Group 1); and higher contents of 50%, 60%, and 70% (Group 2). The composites were evaluated for consistency index, physical behavior (total water absorption, specific mass, and void index), and mechanical behavior (compressive strength). The results showed cohesive mixtures with good workability in Group 1, while at Group 2 composites, the high PET contents compromised the cohesion. The PET incorporation led to increased water absorption and void index, as well as a reduction in specific mass, resulting in lighter composites. Despite the decrease in mechanical strength with higher PET content, Group 1 mixtures exceeded the 15 MPa for structural application (RILEM, 1978). In summary, the results highlight the potential of these composites for both structural and non-structural applications, such as partition elements. The study reinforces the feasibility of using plastic waste in civil construction as a strategy for sustainability and circular economy.

Keywords:
Lightweight composites; waste PET particles; compressive strength; sustainable development.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, o aumento da desigualdade social, o esgotamento de recursos naturais e o crescimento populacional são desafios globais que exigem ações urgentes e conjuntas. Nesse contexto, a sustentabilidade tornou-se pauta central no debate global, consolidada por iniciativas como a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que definiu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) com metas para um futuro mais justo, resiliente e equilibrado (ONU, 2023).

Entre os setores com maior impacto ambiental está a construção civil, responsável por significativa parcela das emissões globais de gases de efeito estufa e pelo uso intensivo de recursos naturais como a areia — o segundo recurso mais explorado do planeta (UNEP, 2019; UNEP, 2022). A crescente escassez e os impactos ambientais associados à extração de agregados naturais tornaram urgente a busca por soluções construtivas mais sustentáveis.

Nesse cenário, a valorização de resíduos como alternativa aos materiais convencionais tem se mostrado uma estratégia promissora. Em especial, os resíduos plásticos – que representam grande parte dos poluentes encontrados no meio ambiente, devido ao seu descarte inadequado e longa durabilidade – vêm sendo estudados como substitutos parciais de agregados na construção civil. O politereftalato de etileno (PET), amplamente utilizado em embalagens, é um dos principais resíduos plásticos descartados no mundo. Apesar de avanços em iniciativas de reciclagem, como o destaque do Brasil no reaproveitamento do PET, o volume de produção e descarte ainda superam significativamente os índices de reaproveitamento (ABIPET, 2022). Por isso, novas aplicações para esse material são fundamentais para mitigar seu impacto ambiental e incentivar a economia circular.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e analisar compósitos leves com substituições parciais da areia natural por partículas PET residuais, caracterizando-as quanto às suas propriedades físicas e mecânica. A partir dos resultados obtidos, busca-se pensar uma aplicação viável para esses compósitos na arquitetura. Essa abordagem alinha-se aos objetivos da Agenda 2030 da ONU, especialmente ao incentivar a inovação tecnológica na construção civil (ODS 9); ao contribuir para edificações mais eficientes e sustentáveis (ODS 11); e ao promover o uso responsável de recursos e a reutilização de resíduos plásticos na indústria da construção (ODS 12).

2. REVISÃO DE LITERATURA

A viabilidade do uso de resíduos de PET como agregado leve ou reforço fibroso em argamassas e concretos vem sendo estudada por pesquisadores ao redor do mundo.

SOUZA NETO *et al.* (2019) desenvolveram argamassas com traço 1:2:9 (cimento CPII: cal: areia) e substituição de areia por garrafas PET trituradas em teores de 0%, 10% e 15%. Os autores verificaram um pequeno aumento na absorção de água pela substituição de areia por PET, mas a resistência à compressão não apresentou variação (SOUZA NETO *et al.*, 2019).

BIGOTTO *et al.* (2019) produziram argamassas utilizando traço 1:2:0,1 (cimento CP II-Z-32: areia: sílica ativa), água, sílica ativa e PET (obtida pela trituração de garrafas até granulometria próxima à da areia) substituindo a areia em teores de 0%, 5%, 10% e 15%. BIGOTTO *et al.* (2019) verificaram que o uso do PET prejudicou a trabalhabilidade e desempenho mecânico das argamassas e beneficiou sua massa específica. Com o aumento do teor de PET incorporado, os índices de consistência reduziram em 5,5% (5% PET), 25,1% (10% PET) e 44,3% (15% PET), em relação à referência. Já as quedas na resistência à compressão, em relação à referência, foram mais significativas e iguais a 31,0% (5% PET e 10% PET) e 48,9% (15% PET). Os autores também observaram ganhos na capacidade de absorção de água de 137% (5% PET), 160% (10% PET) e 165% (15% PET). As reduções da massa específica foram iguais a 10% (5% PET), 12% (10% PET) e 14% (15% PET) (BIGOTTO *et al.*, 2019).

OLIVEIRA *et al.* (2020) pesquisaram argamassas com traço 1:4 (cimento CEM I 42.5 R: areia, em massa), relação água-cimento igual a 0,75 e substituição parcial de agregado por partículas PET nos teores de 0%, 5% e 10% (em massa). As partículas PET apresentavam granulometria similar à da areia e forma irregular e angular. As substituições de areia por PET causaram quedas no índice de consistência de até 7,6% (5% PET), na massa específica de 15,7% (5% PET) e 31,9% (10% PET) e na resistência à compressão de 33,3% (5% PET) e 46,7% (10% PET), em relação à argamassa de referência (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

TEMP *et al.* (2023) estudaram misturas com traço, em massa, de 1:0,33:5,33 (cimento CP IV-32: cal: areia), e agregado PET (diâmetro máximo de 2,36 mm) substituindo parcialmente a areia nos teores de 0%, 5% e 15%. TEMP *et al.* (2023) verificaram aumentos no índice de consistência, com as substituições de areia por PET, de 20,2% (5% PET) e 15,1% (10% PET), em comparação com a referência. O mesmo comportamento foi observado na absorção de água, que foram superiores à referência em 5,6% (5% PET) e 3,3% (10% PET). Por outro lado, as substituições de areia por PET não impactaram na massa específica de forma significativa, pois em relação à referência houve uma suave queda de 2,5% (10% PET).

A Tabela 1 reúne algumas propriedades de argamassas com agregados PET que são relevantes a este estudo, obtidas por SOUZA NETO *et al.* (2019), BIGOTTO *et al.* (2019), OLIVEIRA *et al.* (2020) e TEMP *et al.* (2023).

Referência	Teor de PET	Índice de Consistência (mm)	Absorção de Água (%)	Massa Específica (kg/m³)	Resistência à Compressão (MPa)
SOUZA NETO *et al.* (2019)	0%	-	17,9	-	1,1
	10%	-	18,0	-	1,2
	15%	-	18,5	-	1,1
BIGOTTO *et al.* (2019)	0%	327	4,8	1694	23,1
	5%	309	11,5	1533	15,8
	10%	245	12,6	1499	16,0
	15%	182	12,8	1459	11,8
OLIVEIRA *et al.* (2020)	0%	184	-	1703	30,0
	5%	170	-	1435	20,0
	10%	174	-	1159	16,0
TEMP *et al.* (2023)	0%	252	89,0	2030	-
	5%	303	94,0	2020	-
	15%	290	92,0	1980	-

Tabela 1: Revisão de literatura: propriedades das argamassas.
Fonte: Os autores (2025).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As argamassas foram produzidas utilizando os seguintes materiais: cimento comercial CPV-ARI; areia lavada de rio; água do sistema de abastecimento do RJ; superplastificante de terceira geração; e partículas de polietileno tereftalato (PET) residuais.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento foi caracterizado quanto à massa específica (picnômetro a gás hélio), composição química (espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X), perda ao fogo (forno mufla) de acordo com a norma NM 18 (ABNT, 2012) e distribuição granulométrica (granulômetro a laser).

Os ensaios de caracterização da areia foram conduzidos de acordo com os procedimentos das normas NM 52 (ABNT, 2009) e NBR 16916 (ABNT, 2021), para massas específicas e absorção de água, e da norma NBR 17054 (ABNT, 2022), para a distribuição granulométrica.

As partículas de polietileno tereftalato (PET) foram obtidas a partir da trituração de garrafas PET de água mineral de uso doméstico coletadas pelas autoras, que foram higienizadas, secas e tiveram seus lacres e rótulos retirados. Depois foram levadas a um triturador industrial de resíduos, com capacidade de trituração de 50 a 100 kg por hora, e trituradas quatro vezes, a fim de obter o menor tamanho de partícula possível dentro das limitações do equipamento (o espaço entre as garras). A partículas PET também foram caracterizadas quanto à massa específica (picnômetro a gás hélio) e distribuição granulométrica de conforme o método da NBR 17054 (ABNT, 2022) adaptado por TEIXEIRA (2024).

O superplastificante foi caracterizado quanto à massa específica e teor de sólidos, seguindo os procedimentos da norma NBR 11768-3 (ABNT, 2019).

3.2. DOSAGEM, PREPARO E MOLDAGEM

A dosagem dos compósitos foi feita utilizado um traço 1:3 (em massa), relação água-cimento igual a 0,45 e teor de superplastificante (SP) de 0,45% (massa de sólidos do SP em relação à massa de cimento). A argamassa de referência (REF) apresentou um consumo de cimento igual a 509 kg/m^3, de areia igual a 1527 kg/m^3, 8 kg/m^3 de SP e 224 kg/m^3 de água. Foram confeccionados seis compósitos com partículas PET, divididos em dois grupos, em função dos teores de substituições parciais da areia por PET (em volume). No “Grupo 1” estão três misturas com os menores teores de PET e no “Grupo 2” estão outras três misturas com maiores teores, nomeadas de acordo com o percentual de areia substituída por PET: 5% (PET05), 10% (PET10) e 15% (PET15); 50% (PET50), 60% (PET60) e 70% (PET70).

Uma observação relevante para o estudo é que, para as misturas do Grupo 2, houve uma diminuição de 40%, 45% e 50% nos consumos de todos os materiais conforme o aumento do teor de PET, pois a forma irregular e aspecto “retorcido” das partículas proporcionou um aumento significativo no volume ocupado pela mistura quando pronta para moldagem. Além disso, estima-se que o consumo de garrafas por metro cúbico de mistura tenha variado entre 176 unidades (PET05) e 1230 unidades (PET70), resultando em um grande aproveitamento desse resíduo.

O preparo dos compósitos foi realizado com base na norma NBR 16541 (ABNT, 2016), com ajustes no tempo total de mistura e nas velocidades utilizadas. O tempo total de mistura foi de oito minutos, em atendimento à recomendação do fabricante para a ação do superplastificante. E a velocidade mais alta na segunda parte do preparo, como descrito na norma, não pode ser utilizada devido à segregação observada entre as partículas PET e os demais materiais.

Para esse estudo, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para os ensaios de compressão e absorção. A moldagem dos corpos de prova da REF e das misturas e do Grupo 1 foi feita em três camadas, com adensamento manual a cada camada por movimentos circulares por 30 segundos com bastão de vidro. A moldagem dos corpos de prova do Grupo 2 foi feita pela inserção do compósito no molde em camadas com uma colher de sopa, seguida da compactação com 5 golpes com soquete (soltando-o a uma altura aproximada de 5 cm da superfície da camada), até o preenchimento total do molde (ensaio de absorção) ou parcial, com uma altura aproximada de 8 mm no topo mantida vazia (ensaio de compressão). Após 1 h de cura úmida, os topos dos moldes dos cilindros de compressão foram totalmente preenchidos por uma pasta de cimento (relação água-cimento de 0,3). Os corpos de prova foram deixados em cura úmida por 24h, desmoldados e mantidos em cura úmida até a idade de 28 dias. Os corpos de prova destinados ao ensaio de compressão foram faceados em torno mecânico para a planificação e paralelismos das faces.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

As argamassas desenvolvidas foram submetidas a ensaios de espalhamento na mesa de consistência conforme procedimento da norma NBR 13276 (ABNT, 2016), em triplicata, a fim de determinar o diâmetro médio e avaliar a consistência e coesão de cada mistura, em seu estado fresco.

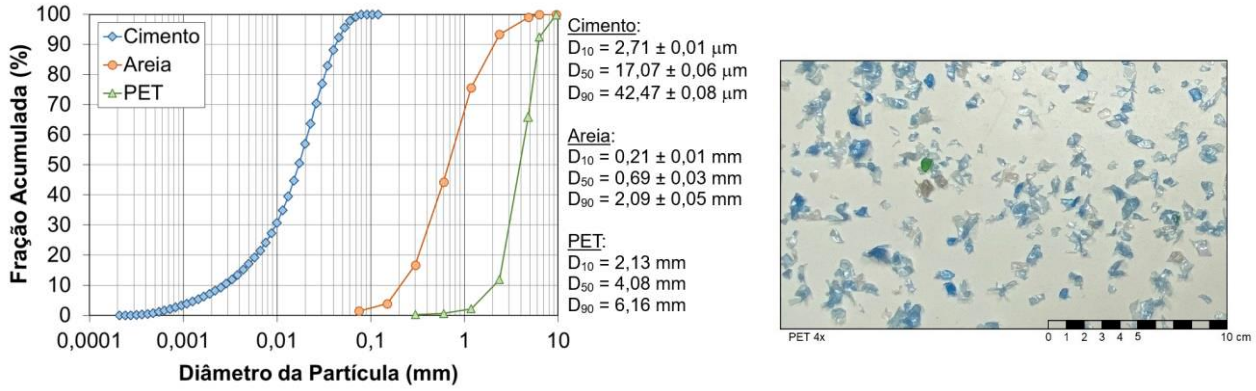
Para a caracterização no estado endurecido, foram realizados ensaios aos 28 dias de: absorção total de água em três corpos de prova por mistura (NBR 9778, ABNT 2005) e de resistência à compressão uniaxial em prensa servo-controlada em quatro corpos de prova por mistura, com célula de carga de 100kN e velocidade de deslocamento do travessão de 0,1 mm/min.

As propriedades dos compósitos foram submetidas à análise estatística pelo método da Análise de Variância (ANOVA) do programa computacional OriginPro8. Para a comparação das médias foi adotado o Método de Tukey, a um nível de confiança igual a 95%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A Figura 1a apresenta as distribuições granulométricas típicas do cimento, da areia e do PET e as e os diâmetros abaixo dos quais se situam 10% (D_{10}), 50% (D_{50}) e 90% (D_{90}) das partículas, bem como os respectivos desvios-padrão, evidenciando a diferença entre os tamanhos das partículas. A Figura 1b mostra o aspecto irregular das partículas PET após terem sido trituradas quatro vezes.



(a) (b)

Figura 1: (a) Distribuições granulométricas típicas dos materiais granulares; (b) Aspecto das partículas PET.
Fonte: Os autores (2025).

O cimento e as partículas PET apresentaram massas específicas iguais a 3081 ± 40 kg/m^3 e 1393 ± 2 kg/m^3, respectivamente. A areia apresentou absorção de água igual a 2,34 ± 0,13% e as seguintes massas específicas médias: 2390 ± 20 kg/m^3 (condição seca), 2440 ± 20 kg/m^3 (condição saturada superfície seca) e 2530 ± 20 kg/m^3 (massa específica real).

A Tabela 2 apresenta a composição química e a perda ao fogo (PF) do cimento. O cimento é composto principalmente por CaO e SiO_2 e atende aos requisitos da norma NBR 16697 (ABNT, 2018) em relação aos teores de PF (menor ou igual a 6,5%) e de SO_3 (menor ou igual a 4,5%).

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	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%

Tabela 2: Composição química do cimento.
Fonte: Os autores (2025).

Por fim, a massa específica e teor de sólidos do superplastificante foram iguais a 1136 ± 8 kg/m^3 e 32,85 ± 0,24%, respectivamente.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

A Figura 2 apresenta os aspectos dos espalhamentos das misturas REF (Figura 2a), Grupo 1 e PET50 após os ensaios de índice de consistência. É possível observar que a PET05 (Figura 2b) e PET10 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**c) apresentaram boa consistência e espalhamento uniforme. Houve exsudação nas misturas PET05 (Figura 2b) e PET15 (Figura 2d), que pode ser evitada em estudos futuros com um ajuste na dosagem do superplastificante. A PET50 apresentou espalhamento com as partículas muito dispersas, sem coesão e com pouca trabalhabilidade (Figura 2e) e, por esse motivo, não foram medidos seus diâmetros e o ensaio não foi realizado na PET60 e na PET70.



(a) (b) (c) (d) (e)

Figura 2: Espalhamentos dos compósitos: (a) REF; (b) PET05; (c) PET10; (d) PET15; (e) PET50.
Fonte: Os autores (2025).

Os índices de consistência obtidos foram de 259 ± 4 mm (REF), 237 ± 1 mm (PET05), 217 ± 2 mm (PET10) e 193 ± 2 mm (PET15). A análise estatística indicou diferenças significativas entre os índices de consistência dos compósitos, com reduções no diâmetro médio de espalhamento iguais a 8,5 % (PET05), 16,2% (PET10) e 25,5% (PET15), em comparação com à referência. Esses valores são próximos aos encontrados por BIGOTTO *et al.* (2019), cujas misturas com os mesmos teores de substituição por PET mostraram reduções de até 44,3% (15% PET), também em relação à referência. OLIVEIRA *et al.* (2020) também verificaram que as substituições de areia por PET reduziram o índice de consistência em 7,6% (5% PET), em relação à argamassa de referência. Por outro lado, TEMP *et al.* (2023), observaram aumentos nesta propriedade com o uso de PET de até 20,2%, possivelmente devido à pequena granulometria das partículas PET adotadas (diâmetro máximo de 2,36 mm).

A Tabela 3 apresenta os resultados médios de absorção total de água (A_i), índice de vazios (I_v), massa específica (ρ_r) e seus respectivos desvios-padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

Misturas	A_i – DP (CV) % - % (%)	I_v – DP (CV) % - % (%)	ρ_r – DP (CV) kg/m³ - kg/m³ (%)
REF	3,40 – 0,04 (1,1)	7,38 – 0,09 (1,3)	2167 – 4 (0,2)
PET05	3,70 – 0,14 (3,7)	7,80 – 0,29 (3,7)	2108 – 1 (0,1)
PET10	3,60 – 0,09 (2,6)	7,60 – 0,20 (2,7)	2116 – 3 (0,2)
PET15	4,11 – 0,05 (1,1)	8,45 – 0,08 (0,9)	2055 – 5 (0,3)
PET50	9,07 – 0,07 (0,8)	15,02 – 0,20 (1,4)	1656 – 11 (0,7)
PET60	10,01 – 0 ,25 (2,5)	16,58 – 0,29 (1,7)	1653 – 13 (0,8)
PET70	10,43 – 0,15 (1,4)	17,07 – 0,15 (0,9)	1637 – 9 (0,6)

Tabela 3: Absorção total de água: resultados.
Fonte: Os autores (2025).

Com exceção dos compósitos PET05 e PET10, a análise estatística apontou diferenças significativas entre os resultados de absorção total de água dos compósitos com PET e a REF. Entretanto, não houve diferenças significativas entre as absorções totais de água da PET05 e PET10 e da PET60 e PET70. A análise estatística dos índices de vazios dos compósitos também mostrou que entre os compósitos PET05 e PET10, entre esses compósitos e a REF e entre as

misturas PET60 e PET70 não houve diferenças significativas. Ao comparar os resultados dos demais compósitos entre si e ao compará-los com a REF, foram observadas diferenças significativas entre os índices de vazios, de acordo com a análise estatística. Conforme o aumento do teor de PET, houve um aumento de 7% (PET05), 6% (PET10), 21% (PET15) e 206% (PET70) na absorção total de água em relação à REF; e de 15% (PET15) e 132% (PET70) no índice de vazios em relação à REF. Esses comportamentos eram esperados, pois já havia sido observado que, por conta da forma irregular das partículas PET, a sua incorporação nas misturas aumenta a quantidade de poros no material. Os resultados obtidos nesses ensaios estão condizentes com a literatura, uma vez que SOUZA NETO *et al.* (2019) também observaram aumentos na absorção de água com a incorporação de PET, porém suas misturas apresentaram aumentos de apenas 0,5% (10% de PET) e 3,6% (15% de PET). BIGOTTO *et al.* (2019) também registraram ganhos na capacidade de absorção de água dos corpos de prova de 137% (5% de PET), 160% (10% de PET) e 165% (15% de PET), valores consideravelmente superiores aos obtidos no presente estudo.

De acordo com a análise estatística, todos os compósitos com PET apresentaram massas específicas diferentes da REF. No entanto, ao comparar as massas específicas entre PET05 e PET10, entre PET50 e PET60, entre PET50 e PET70 e entre PET60 e PET70, a análise estatística indicou que não houve diferenças significativas entre os resultados. Ainda no que se refere aos resultados da Tabela 3, é possível observar reduções nas massas específicas de 3% (PET05), 2% (PET10), 5% (PET15) e 24% (PET50, PET60 e PET70), em relação à REF. Isso ocorreu, pois, a massa específica das partículas PET (1393 kg/m^3) é inferior que a da areia (2530 kg/m^3). Esses resultados também estão de acordo com a literatura, uma vez que outros pesquisadores verificaram reduções nessa propriedade em argamassas com PET (em relação às referências) de: 10% (5% PET), 12% (10% PET) e 14% (15% PET) (BIGOTTO *et al.*, 2019); e 15,7% (5% PET) e 31,9% (10% PET) (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Embora as reduções das massas específicas da presente pesquisa tenham sido inferiores às da literatura, as misturas do Grupo 2 podem ser definidas como leves pois apresentaram massas específicas inferiores aos valores recomendados por normas, de 1800 kg/m^3 (RILEM,1978) e 2000 kg/m^3 (ABNT NBR 8953, 2015).

A Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos das argamassas aos 28 dias, onde é possível observar a redução das resistências à compressão conforme o aumento do teor de PET. Houve perda da resistência à compressão das argamassas, em relação à REF, de 37% (PET05), 28% (PET10), 54% (PET15), 97% (PET50) e 99% (PET60 e PET70).

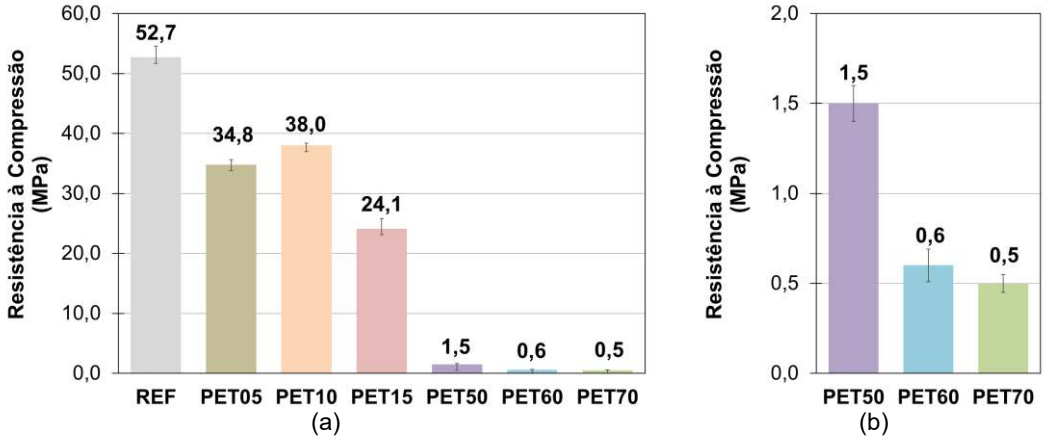
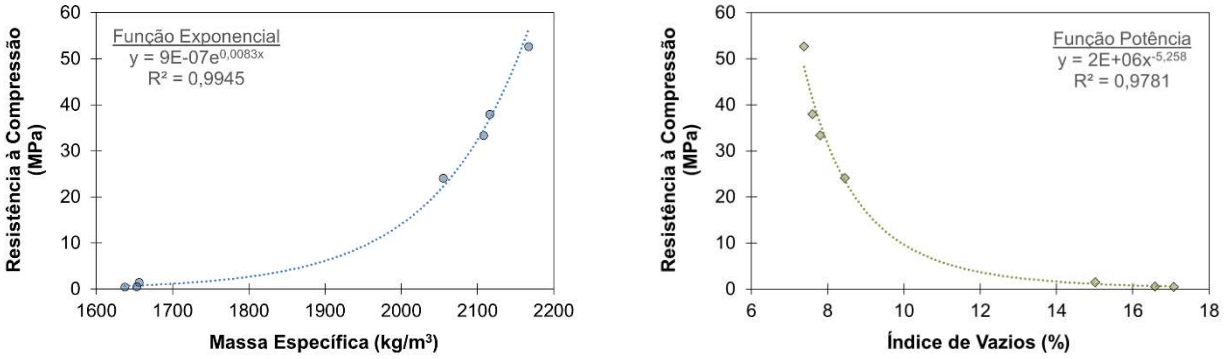


Figura 3: Resultados da caracterização mecânica: (a) Resistências de todos compósitos; (b) Resistências dos compósitos do Grupo 02.
Fonte: Os autores (2025).

De acordo com a análise estatística, todos os compósitos com PET apresentaram resistências à compressão diferentes da REF e, além disso, houve diferenças significativas entre os resultados dos compósitos do Grupo 1. No entanto, as resistências da PET60 e da PET70 foram iguais entre si e iguais à resistência da PET50, de acordo com a análise estatística. Os valores obtidos para a resistência à compressão das argamassas estudadas estão em consonância com a literatura, que

alcançaram reduções nessa propriedade (em relação às referências) de: 31,6 % (5% PET), 30,7 % (10% PET) e 48,9 % (15% PET) (BIGOTTO *et al.*, 2019); 33,3% (5% PET) e 46,7% (10% PET) (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

A partir dos resultados obtidos nas caracterizações física e mecânica dos compósitos, foram estabelecidas duas correlações: entre as resistências à compressão e as massas específicas (Figura 4a); e entre as resistências à compressão e os índices de vazios (Figura 4b) dos compósitos. Foi observado que a redução da massa específica e o aumento do índice de vazios — decorrente das substituições parciais da areia por agregados de PET — estão associados à diminuição da resistência à compressão.



(a) (b)

Figura 4: Correlações: (a) Tensão *versus* massa específica; (b) Tensão *versus* índice de vazios.
Fonte: Os autores (2025).

A Equação 1 foi obtida a partir da correlação entre as resistências à compressão e as massas específicas dos compósitos, resultando em um modelo de regressão exponencial com elevado coeficiente de correlação (R^2 = 0,9745), o que evidencia a consistência dos dados experimentais, dado o bom ajuste dos pontos à curva. A Equação 2 foi obtida a partir da correlação entre as resistências à compressão e os índices de vazios, que resultou em uma regressão potência também com elevado coeficiente de correlação (R^2 = 0,9781), o que confirma a coerência dos resultados obtidos para os compósitos analisados.

$$f_c = (9 \times 10^{-7}) \cdot e^{0,0083 \times \rho_r} \text{ (Equação 1)}$$

$$f_c = (2 \times 10^{6}) \cdot {I_v}^{-5,258} \text{ (Equação 2)}$$

Onde:
f_c = resistência à compressão (MPa);
ME = massa específica (kg/m^3);
I_v = índice de vazios (%).

Ambas as correlações observadas refletem o efeito da incorporação de PET nas misturas. As equações derivadas a partir dessas análises podem ser utilizadas como ferramentas de estimativa de uma das propriedades dos compósitos, a partir da outra previamente conhecida, em experimentos futuros.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foram desenvolvidos dois grupos de misturas cimentícias com incorporação de partículas PET residuais como agregados leves, substituindo parcialmente a areia natural: o Grupo 1, com menores teores de PET (5%, 10% e 15%), e o Grupo 2, com teores mais elevados (50%, 60% e 70%). Os compósitos foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos. Verificou-se que, no Grupo 2, os altos teores de PET e sua forma irregular reduziram o volume necessário para moldagem, diminuindo o consumo de materiais. Apesar da diminuição no índice de consistência nas misturas do Grupo 1 conforme o aumento do PET, os diâmetros de espalhamento

permaneceram adequados para moldagem e adensamento, mantendo a coesão das misturas. Já as do Grupo 2 não apresentaram coesão satisfatória, mas foi possível desenvolver uma metodologia de moldagem eficaz.

Com o aumento da incorporação de PET, ganhos na capacidade de absorção de água e no índice de vazios foram observados, além de reduções na massa específica, características benéficas pois trazem leveza ao material e diminuem a sobrecarga estrutural. Os compósitos do Grupo 1, apesar de não serem considerados leves segundo as normas, atingiram resistências à compressão superiores a 15 MPa, valor mínimo exigido por norma para concretos leves estruturais. Já os compósitos do Grupo 2 apresentaram massas específicas inferiores a 1800 kg/m³, sendo classificados como leves. No entanto, os aumentos dos teores de PET resultaram em perdas na resistência à compressão. Os resultados apontam para o potencial de uso desses compósitos com PET reciclado em elementos arquitetônicos de vedação, sem função estrutural.

Para trabalhos futuros, os autores sugerem a realização de ensaios para determinar a condutividade térmica das misturas e o estudo da melhor forma de aplicação das misturas em elementos arquitetônicos, através de testes de moldagens de elementos de vedação com diferentes formas, com a sua posterior caracterização mecânica. Além disso, propõe-se um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para as misturas desenvolvidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPET. Reciclagem. **Associação Brasileira da Indústria do PET.** 2022. Disponível em: https://abipet.org.br/reciclagem/. Acesso em: 17 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953:** Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro. 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768-3:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 3: Ensaios de caracterização. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16541:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916:** Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054:** Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 52:** Agregado Miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

BIGOTTO, S. A. M.; ASSUNÇÃO, C. C.; TREVISAN, M.; ALCÂNTARA, M. A. M. Produção de Argamassas com Substituição Parcial de Areia Natural por Resíduo de PET. **Revista Científica** – ANAP Brasil, v. 12, n. 25, p. 28–41, 2019.

SOUZA NETO, V. F.; SILVA, J. B.; SOUSA, L. M. C.; AGUIAR, M. R. L.; MENDONÇA, A. N. G. D. Sustentabilidade na construção civil a partir da utilização de garrafas pet pós-consumo para produção de argamassa. **Revista Interdisciplinar e do Meio Ambiente,** v. 1, n. 1, 2019.

OLIVEIRA, M. R., GARCIA, M L., CASTRO, A. C. M., SILVA, T. N. Mortar with PET – Preliminary results. **Energy Reports**, v. 6, p. 800-803, 2020.

ONU. The Sustainable Development Goals Report. **Organização das Nações Unidas** 2023. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023.pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.

RILEM. Functional Classification of Lightweight Concrete. **Matériaux et Constructions**. v. 5, n. 27, p. 171-172. 1978.

TEIXEIRA, Nathália Pacheco. **Do resíduo ao recurso:** compósitos leves com partículas PET - desenvolvimento, análise e aplicação. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

TEMP, A. L.; VENQUIARUTO, S. D.; DA COSTA, F. B. P.; VALSECCHI, C.; MACHADO, B. M. Avaliação de argamassas mistas com agregado reciclado de PET. *In:* XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2023, João Pessoa: **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas.** João Pessoa: Centro de convenções Ronaldo Cunha Lima, 2023.

UNEP. Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis. **United Nations Environment Programme.** 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/areia-e-sustentabilidade-10-recomendacoes-estrategicas-para-evitar-uma-crise>. Acesso em: 17 set. 2023.

UNEP. Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources. **United Nations Environment Programme.** 2019. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28163>. Acesso em: 17 set. 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à FAPERJ, pelo incentivo à pesquisa, ao CNPq e ao Programa PIBIC-UFRJ, pelas bolsas concedidas.