



Potencial de argamassas com PET-PCR para pavimentos permeáveis em drenagem urbana sustentável

Raul de Souza Brandão

Professor Doutor, IFES, Brasil.

Doutorando, UENF, Brasil.

raul.brandao@ifes.edu.br

0009-0001-7399-2747

Ramon Fernandes de Abreu

Doutorando, UENF, Brasil.

ramonfeab@hotmail.com

0000-0003-3516-2643

Jonas Alexandre

Professor Doutor, UENF, Brasil

jonasuenf@gmail.com

0000-0002-2977-5585

Submissão: 15/09/2024

Aceite: 15/03/2025

BRANDÃO, Raul de Souza; ABREU, Ramon Fernandes de; ALEXANDRE, Jonas. Potential of mortars with PCR-PET for permeable pavements in sustainable urban drainage. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, [S. l.], v. 21, n. 2, 2025. DOI: [10.17271/1980082721220256161](https://doi.org/10.17271/1980082721220256161). Disponível

em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/6161

Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Potencial de argamassas com PET-PCR para pavimentos permeáveis em drenagem urbana sustentável

RESUMO

Objetivo - O estudo tem como objetivo investigar o potencial de argamassas com PET-PCR (Polietileno Tereftalato pós-consumo reciclado) para a construção de pavimentos permeáveis, visando à drenagem urbana sustentável. A pesquisa busca demonstrar como a substituição parcial da areia natural por PET-PCR influencia as propriedades físicas e mecânicas das argamassas, com foco na permeabilidade e na redução de impactos ambientais.

Metodologia - O método científico empregado incluiu a formulação de argamassas com diferentes proporções de substituição de areia por PET-PCR (0% a 40%). Foram realizados ensaios físicos e mecânicos, como resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água por imersão, índice de vazios, coeficiente de capilaridade, retenção de água, teor de ar incorporado e densidade. Os dados foram analisados estatisticamente utilizando ANOVA e teste de Tukey para avaliar diferenças significativas entre as composições.

Originalidade/relevância - O estudo insere-se no gap teórico relacionado à busca por alternativas sustentáveis para a construção civil, reduzindo a dependência de recursos naturais e promovendo a reciclagem de resíduos plásticos. A pesquisa é relevante academicamente por abordar a integração de materiais reciclados em pavimentos permeáveis, contribuindo para a literatura sobre infraestrutura verde e gestão de águas pluviais.

Resultados - Os principais resultados mostraram que: A adição de PET-PCR reduziu a resistência mecânica (compressão e tração na flexão), mas aumentou a porosidade e a permeabilidade; A absorção de água e o índice de vazios aumentaram com a proporção de PET-PCR, indicando maior capacidade de infiltração; A densidade e a massa específica diminuíram, tornando o material mais leve e adequado para aplicações de tráfego leve.

Contribuições teóricas/metodológicas - O estudo fornece evidências empíricas sobre o equilíbrio entre resistência mecânica e permeabilidade em argamassas com PET-PCR, além de propor uma metodologia padronizada para avaliação desses materiais. Os resultados contribuem para a base teórica sobre compósitos sustentáveis e pavimentos permeáveis.

Contribuições sociais e ambientais - Redução do descarte de resíduos plásticos e da extração de areia natural, promovendo a economia circular e a preservação de ecossistemas; Melhoria na gestão de águas pluviais em áreas urbanas, reduzindo enchentes e ilhas de calor, e aumentando o conforto térmico. A aplicação em pavimentos de tráfego leve (calçadas, ciclovias) oferece uma solução acessível e sustentável para cidades.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos permeáveis. PET-PCR. Drenagem urbana sustentável.

Potential of mortars with PCR-PET for permeable pavements in sustainable urban drainage

ABSTRACT

Objective - The study aims to investigate the potential of mortars containing PCR-PET (Post-Consumer Recycled Polyethylene Terephthalate) for constructing permeable pavements, focusing on sustainable urban drainage. The research seeks to demonstrate how partially replacing natural sand with PCR-PET influences the physical and mechanical properties of mortars, with an emphasis on permeability and environmental impact reduction.

Methodology - The scientific method involved formulating mortars with varying proportions of sand replaced by PCR-PET (0% to 40%). Physical and mechanical tests were conducted, including compressive strength, flexural tensile strength, water absorption by immersion, void index, capillary coefficient, water retention, air content, and density. Data were statistically analyzed using ANOVA and Tukey's test to assess significant differences between compositions.

Originality/Relevance - The study addresses the theoretical gap related to sustainable alternatives in civil construction, reducing reliance on natural resources and promoting plastic waste recycling. Academically, it is significant for integrating recycled materials into permeable pavements, contributing to the literature on green infrastructure and stormwater management.

Results - Key findings showed that: The addition of PCR-PET reduced mechanical strength (compressive and flexural) but increased porosity and permeability; Water absorption and void index increased with higher PCR-PET content,

indicating improved water infiltration; Density and specific mass decreased, making the material lighter and suitable for low-traffic applications.

Theoretical/Methodological Contributions - The study provides empirical evidence on balancing mechanical strength and permeability in PCR-PET mortars, proposing a standardized methodology for evaluating such materials. The results contribute to the theoretical foundation on sustainable composites and permeable pavements.

Social and Environmental Contributions - Reduces plastic waste disposal and natural sand extraction, promoting a circular economy and ecosystem preservation; Enhances urban stormwater management, mitigating floods and heat islands while improving thermal comfort. Applications in low-traffic pavements (sidewalks, bike lanes) offer an affordable and sustainable solution for cities.

KEYWORDS: Permeable pavement. PCR-PET. Sustainable urban drainage.

Potencial de morteros con PET-RPC para pavimentos permeables en drenaje urbano sostenible.

RESUMEN

Objetivo – El estudio tiene como objetivo investigar el potencial de morteros con PET-RPC (Polietileno Tereftalato reciclado post-consumo) para la construcción de pavimentos permeables, orientados al drenaje urbano sostenible. La investigación busca demostrar cómo la sustitución parcial de arena natural por PET-RPC influye en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros, con enfoque en la permeabilidad y la reducción de impactos ambientales.

Metodología – El método científico empleado incluyó la formulación de morteros con diferentes proporciones de sustitución de arena por PET-RPC (0% a 40%). Se realizaron ensayos físicos y mecánicos, como resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por flexión, absorción de agua por inmersión, índice de vacíos, coeficiente de capilaridad, retención de agua, contenido de aire incorporado y densidad. Los datos fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA y prueba de Tukey para evaluar diferencias significativas entre las composiciones.

Originalidad/relevancia – El estudio se inserta en el vacío teórico relacionado con la búsqueda de alternativas sostenibles para la construcción civil, reduciendo la dependencia de recursos naturales y promoviendo el reciclaje de residuos plásticos. La investigación es relevante académicamente por abordar la integración de materiales reciclados en pavimentos permeables, contribuyendo a la literatura sobre infraestructura verde y gestión de aguas pluviales.

Resultados – Los principales resultados mostraron que: La adición de PET-RPC redujo la resistencia mecánica (compresión y tracción por flexión), pero aumentó la porosidad y la permeabilidad; La absorción de agua y el índice de vacíos aumentaron con la proporción de PET-RPC, indicando mayor capacidad de infiltración; La densidad y la masa específica disminuyeron, haciendo el material más ligero y adecuado para aplicaciones de tráfico ligero.

Contribuciones teóricas/metodológicas – El estudio proporciona evidencia empírica sobre el equilibrio entre resistencia mecánica y permeabilidad en morteros con PET-RPC, además de proponer una metodología estandarizada para la evaluación de estos materiales. Los resultados contribuyen a la base teórica sobre compuestos sostenibles y pavimentos permeables.

Contribuciones sociales y ambientales – Reducción del vertido de residuos plásticos y de la extracción de arena natural, promoviendo la economía circular y la preservación de ecosistemas; Mejora en la gestión de aguas pluviales en áreas urbanas, reduciendo inundaciones y islas de calor, y aumentando el confort térmico. La aplicación en pavimentos de tráfico ligero (aceras, ciclovías) ofrece una solución accesible y sostenible para ciudades.

PALABRAS CLAVE: Pavimentos permeables. PET-RPC. Drenaje urbano sostenible.

1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e impermeabilização dos solos têm gerado desafios significativos para a drenagem urbana, como o aumento do risco de enchentes, erosão e poluição das águas superficiais. A substituição de superfícies impermeáveis por soluções sustentáveis, como pavimentos permeáveis, é amplamente discutida na literatura como uma abordagem eficaz para mitigar esses problemas, uma vez que esses sistemas permitem a infiltração da água no solo, reduzindo o escoamento superficial e promovendo a recarga dos lençóis freáticos, conforme apontam estudos sobre infraestrutura verde (Muttuvelu *et al.*, 2015) e (Fletcher *et al.*, 2015).

No entanto, a produção de pavimentos permeáveis ainda depende consideravelmente de materiais naturais, como a areia, cuja extração em larga escala gera impactos ambientais significativos, incluindo degradação de habitats e perda de biodiversidade. Diversos autores, como Peduzzi (2014) e Arquitetura Pro(2025), destacam a necessidade de minimizar o uso de recursos naturais em projetos de engenharia, buscando alternativas mais sustentáveis.

Neste contexto, a substituição parcial de agregados naturais por materiais reciclados, como o poli(tereftalato de etileno) pós-consumo reciclado (PET-PCR), surge como uma opção promissora para reduzir os impactos ambientais. Além de diminuir a extração de recursos naturais, o uso de PET-PCR em pavimentos permeáveis contribui para a gestão de resíduos plásticos, um dos maiores desafios ambientais da atualidade (Hopewell *et al.*, 2009).

Estudos indicam que a inclusão de plásticos reciclados em materiais de construção pode não apenas reduzir o acúmulo de resíduos, mas também melhorar certas propriedades mecânicas e de durabilidade de compósitos (Silva *et al.*, 2019). Dentro deste cenário, este estudo propõe a substituição parcial de areia natural por PET-PCR no desenvolvimento de argamassas para pavimentos permeáveis, avaliando sua viabilidade técnica e seu impacto na drenagem urbana sustentável.

A substituição de agregados convencionais por PET-PCR tem o potencial de aumentar a porosidade das argamassas, tornando o pavimento mais permeável e eficiente na infiltração de águas pluviais. No entanto, ainda é necessário investigar os efeitos dessa incorporação na durabilidade e resistência mecânica do pavimento, de modo a avaliar sua viabilidade como alternativa sustentável para sistemas de drenagem urbana com o uso de resíduos plásticos reciclados.

Para alcançar esses objetivos, foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão e tração na flexão, visando avaliar a robustez estrutural do pavimento ao longo do tempo. Além disso, diversos ensaios físicos foram conduzidos para caracterizar propriedades fundamentais relacionadas à permeabilidade, incluindo absorção de água por imersão, índice de vazios, coeficiente de capilaridade, retenção de água, teor de ar incorporado e densidade de massa no estado fresco. A determinação da massa específica real e da massa específica aparente das argamassas complementou a análise das propriedades físicas do material.

A avaliação desses parâmetros é essencial para compreender o desempenho do pavimento em relação à capacidade de absorção e drenagem de água, impactando diretamente a eficiência dos sistemas de drenagem urbana. Assim, espera-se que os

pavimentos desenvolvidos com PET-PCR apresentem não apenas resistência mecânica satisfatória, mas também elevada permeabilidade, favorecendo a gestão das águas pluviais e reduzindo o escoamento superficial. Esse comportamento contribui para a sustentabilidade em áreas urbanas densamente pavimentadas, corroborando estudos sobre a eficiência de pavimentos permeáveis em contextos urbanos (Menezes; Cabral, 2023). Dessa forma, este estudo busca demonstrar que a incorporação de PET-PCR pode viabilizar uma solução eficaz e ambientalmente responsável para a drenagem urbana sustentável.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pavimentos Permeáveis e Sustentabilidade Urbana

A crescente urbanização tem aumentado a impermeabilização dos solos em áreas urbanas, gerando uma série de problemas ambientais, incluindo a intensificação de enchentes, erosão do solo e poluição de corpos hídricos superficiais. Para reduzir esses impactos, uma das soluções mais eficazes tem sido a adoção de pavimentos permeáveis, que permitem a infiltração da água no solo, reduzindo o escoamento superficial e promovendo a recarga dos lençóis freáticos (Boogaard *et al.*, 2014).

Os pavimentos permeáveis são caracterizados por uma estrutura porosa que facilita a passagem da água, sendo considerados uma alternativa sustentável para a gestão de águas pluviais em ambientes urbanos densamente pavimentados (Pratt *et al.*, 2017).

O uso desses pavimentos está diretamente relacionado aos princípios da infraestrutura verde, que busca aliar desenvolvimento urbano com práticas de sustentabilidade ambiental, visando reduzir o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente (Fletcher *et al.*, 2015).

Além de controlar o escoamento de águas pluviais, pavimentos permeáveis têm mostrado benefícios em termos de controle térmico, já que ajudam a reduzir o efeito de ilha de calor, muito comum em áreas urbanas (Shafique *et al.*, 2018).

2.2 Substituição de Materiais Convencionais em Pavimentos Permeáveis

Os pavimentos permeáveis são tradicionalmente compostos por agregados minerais, incluindo areia natural, que desempenha um papel crucial na composição da mistura e na permeabilidade do pavimento.

No entanto, a extração de areia natural tem causado impactos ambientais significativos, como a degradação de *habitats* fluviais, erosão e desequilíbrio nos ecossistemas aquáticos (Peduzzi, 2014). Por esse motivo, a busca por alternativas sustentáveis que substituam materiais convencionais por opções recicladas tem ganhado força na construção civil.

Entre as alternativas mais estudadas está a utilização de resíduos plásticos reciclados, como o PET-PCR (poli(tereftalato de etileno) pós-consumo reciclado). Esse material, derivado da reciclagem de garrafas plásticas, tem sido explorado por suas propriedades mecânicas e seu potencial de reduzir a dependência de recursos naturais na construção (Hopewell *et al.*, 2009).

O uso de PET-PCR como substituição parcial à areia em misturas de pavimentos permeáveis não apenas promove a sustentabilidade por meio da reutilização de resíduos plásticos, mas também pode resultar em uma maior porosidade e permeabilidade do pavimento, melhorando sua capacidade de drenagem (Dos Santos *et al.*, 2014).

2.3 Propriedades Mecânicas e Físicas de Pavimentos com PET-PCR

Estudos recentes têm investigado o impacto da substituição parcial de areia por plásticos reciclados nas propriedades mecânicas e físicas das argamassas utilizadas em pavimentos permeáveis. As pesquisas indicam que o uso de PET-PCR pode influenciar diretamente parâmetros como a resistência à compressão, a absorção de água por imersão, o índice de vazios, o coeficiente de capilaridade, a retenção de água e o teor de ar incorporado (Brandão *et al.*, 2024).

Esses parâmetros são essenciais para avaliar a eficiência de pavimentos permeáveis, já que um aumento na porosidade, por exemplo, está diretamente relacionado à capacidade do pavimento de permitir o fluxo de água através de sua estrutura. No entanto, é crucial que essas propriedades sejam equilibradas com a resistência mecânica do material, garantindo que o pavimento seja capaz de suportar as cargas impostas por tráfego urbano (Ahmad *et al.*, 2015).

Pesquisas anteriores indicam que a inclusão de PET-PCR pode reduzir a densidade do pavimento, o que pode ser vantajoso em termos de leveza estrutural, mas ao mesmo tempo pode comprometer a resistência à compressão em comparação com materiais convencionais. Por outro lado, o aumento da permeabilidade e da capacidade de absorção de água torna o uso de plásticos reciclados uma opção viável para aplicações em áreas onde o controle de águas pluviais é prioritário (Shafique *et al.*, 2018).

2.4 Benefícios Ambientais da Utilização de PET-PCR em Pavimentos

A incorporação de PET-PCR em pavimentos permeáveis também apresenta benefícios ambientais significativos. Além de reduzir a quantidade de resíduos plásticos em aterros e oceanos, o uso desse material contribui para a diminuição da extração de areia natural, ajudando a preservar habitats fluviais e ecossistemas aquáticos (Thakur; Singha, 2017). Estudos têm mostrado que a inclusão de resíduos plásticos reciclados pode contribuir para a redução de emissões de CO₂ associadas à produção de materiais de construção, tornando o processo mais sustentável (Silva *et al.*, 2014).

Além disso, o desenvolvimento de tecnologias de pavimentação que utilizam PET-PCR pode incentivar a economia circular, promovendo a reutilização de resíduos plásticos e diminuindo a demanda por novos materiais. Esse tipo de abordagem é particularmente relevante em contextos urbanos, onde a gestão de resíduos sólidos e o controle de águas pluviais representam grandes desafios para a sustentabilidade (Kong *et al.* 2025).

2.5 Análise do PET-PCR em Pavimentos Permeáveis

O uso de PET-PCR em pavimentos permeáveis é uma prática emergente que visa a sustentabilidade e a eficiência no gerenciamento de águas pluviais nas áreas urbanas. Os pavimentos permeáveis são projetados para permitir que a água da chuva se infiltre no solo, reduzindo a quantidade de escoamento superficial e, conseqüentemente, minimizando inundações urbanas (Engenharia 360, 2022).

O uso de PET-PCR na fabricação desses pavimentos oferece uma alternativa viável e ecológica, uma vez que aproveita um material frequentemente descartado e que leva centenas de anos para se decompor. Estudos, como os de Tripathy; Acharya (2023), mostram que a incorporação de materiais reciclados no concreto pode não apenas melhorar a performance estrutural, mas também contribuir para a diminuição do impacto ambiental associado à produção de novos materiais.

Além dos benefícios ambientais, a análise do desempenho do PET-PCR em pavimentos permeáveis também considera aspectos técnicos, como a resistência à compressão e a durabilidade. Segundo pesquisa realizada por Ryu *et al.* (2020), os pavimentos permeáveis feitos com PET-PCR demonstraram resistência mecânica comparável aos pavimentos convencionais, além de possuírem propriedades de drenagem superiores. Esses estudos indicam que o uso de PET reciclado não compromete a qualidade do pavimento, mas, ao contrário, pode aprimorar características importantes, como a capacidade de infiltração e a resistência ao desgaste, aumentando a vida útil do material.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia adotada para a investigação do potencial de utilização de pavimentos permeáveis com substituição parcial de areia natural por PET-PCR na drenagem urbana sustentável. Os principais objetivos incluem a formulação e caracterização das argamassas, a realização de ensaios mecânicos e físicos, bem como a análise dos resultados obtidos para validar a hipótese de que a inclusão de PET-PCR pode aumentar a permeabilidade dos pavimentos. As proporções escolhidas de PET-PCR também foram definidas em estudos prévio dos autores de forma mais detalhada, visando nesse documento apresentar os parâmetros experimentais utilizados com desempenho dentro dos padrões.

3.1 Formulação das Argamassas

Para a formulação das argamassas, foram utilizados os seguintes materiais:

Cimento Portland CP-II E 32: utilizado como ligante; Areia natural: como agregado padrão e de tamanho de areia média; PET-PCR: como agregado artificial de substituição do natural, com granulometria de areia média e obtido a partir da reciclagem de garrafas plásticas e Água: utilizada para hidratação do cimento.

Para a formulação dos moldes das argamassas, foram definidas cinco composições distintas, a fim de avaliar o impacto da substituição da areia natural por PET-PCR nas propriedades físicas e mecânicas do material. As composições estudadas incluem:

Argamassa de Referência: Esta composição foi preparada sem a adição de PET-PCR, utilizando apenas areia natural como agregado fino. Serve como parâmetro para comparar as

propriedades das argamassas que contêm PET-PCR.

Argamassas com substituição que variam de 10% a 40% de PET-PCR: Nestas composições, o volume de areia natural foi substituído por PET-PCR. Essa proporção foi escolhida para avaliar os efeitos iniciais da adição de material reciclado sobre as propriedades da argamassa de referência.

Cada uma dessas composições foi preparada em pelo menos três repetições para garantir a confiabilidade dos resultados. Essa abordagem permitiu uma comparação detalhada entre os efeitos da substituição parcial de areia natural por PET-PCR em diferentes proporções, fornecendo informações sobre a viabilidade do uso de resíduos plásticos na produção de argamassas sustentáveis.

3.2 Preparação dos Moldes

As argamassas foram moldadas em formas de aço de dimensões padronizadas, de acordo com as normas de ensaio da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Os moldes são previamente lubrificados para facilitar a desmoldagem. Após a moldagem, as argamassas foram submetidas a um processo de cura em ambiente controlado, com temperatura e umidade constantes, durante 28 dias, seguindo as recomendações para a hidratação adequada do cimento.

3.3 Ensaios de Caracterização das Argamassas

Foram realizados diversos ensaios para caracterizar as argamassas desenvolvidas:

Resistência à Compressão: O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 13279, de modo que as amostras são submetidas à compressão em uma prensa hidráulica até a ruptura, e os valores de resistência são registrados.

Resistência à tração na flexão: Conforme estipulado pela norma ABNT NBR 13279. A realização do ensaio, ocorreu com amostras moldadas em dimensões adequadas e submetidas a um carregamento em uma prensa hidráulica até a ruptura, permitindo a obtenção da resistência à tração na flexão.

Absorção de Água por Imersão: Este ensaio determina a quantidade de água que as argamassas conseguem absorver em um período de 24 horas, conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 9778.

Índice de Vazios: É calculado com base na relação entre os volumes de poros e o volume total da amostra, de acordo com a metodologia proposta.

Coeficiente de Capilaridade: O ensaio conduzido utilizando um método de colunas de água, onde a altura de ascensão da água em função do tempo será medida, permitindo o cálculo do coeficiente de capilaridade das argamassas.

Retenção de Água: A retenção de água é medida em função do tempo, considerando a massa das amostras após a saturação em água.

Teor de Ar Incorporado: Esse parâmetro é avaliado utilizando um medidor de ar incorporado, que fornece uma medida da quantidade de ar aprisionado na argamassa.

Densidade de Massa no Estado Endurecido: A densidade é determinada pela relação

entre a massa da amostra e o volume ocupado.

Massa Específica Real: A massa específica é medida utilizando um picnômetro, que permite determinar a densidade dos sólidos presentes nas argamassas.

3.4 Análise dos Dados

Os dados obtidos dos ensaios foram analisados estatisticamente, utilizando ferramentas como análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey para verificar se há diferenças significativas entre as propriedades das argamassas formuladas. Além disso, é realizada uma análise de correlação entre a proporção de PET-PCR e os parâmetros de permeabilidade e resistência mecânica, a fim de identificar a relação entre essas variáveis.

3.5 Considerações Éticas

O estudo respeita as diretrizes éticas relacionadas à pesquisa científica, garantindo que os processos foram conduzidos com rigor e transparência. A utilização de materiais reciclados como PET-PCR é realizada de forma a minimizar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados nas argamassas desenvolvidas com substituição parcial de areia natural por PET-PCR, bem como uma discussão sobre o significado desses resultados em relação aos objetivos do estudo. Os dados são apresentados em tabelas e gráficos para facilitar a visualização e compreensão das propriedades mecânicas e físicas das argamassas.

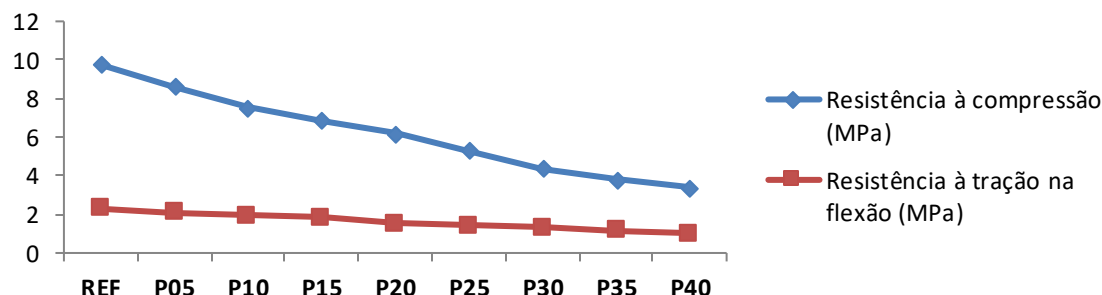
4.2 Resultados dos Ensaios de Caracterização das Argamassas

Os resultados dos ensaios realizados nas amostras de argamassas são apresentados a seguir. As propriedades analisadas incluem resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água por imersão, índice de vazios, coeficiente de capilaridade, retenção de água, teor de ar incorporado e densidade de massa no estado fresco.

4.2.1 Resistência à Compressão e Resistência à Tração na Flexão

A tendência dos valores de resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Gráfico de tendência de valores médios para ensaios de resistência das argamassas



Fonte: Autores (2024).

Os dados de resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas da pesquisa são apresentados na Tabela 1, mostrando a média de cada proporção de PET-PCR que fora estuda.

Tabela 1 - Ensaios de resistência mecânica das argamassas

Amostra	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)
REF	9,75	2,29
P05	8,65	2,10
P10	7,54	1,95
P15	6,88	1,82
P20	6,21	1,55
P25	5,33	1,42
P30	4,40	1,34
P35	3,82	1,17
P40	3,41	1,03

Fonte: Autores (2024).

A análise revela que ambas as resistências diminuem à medida que a proporção de PET-PCR aumenta, em comparação com as amostras de referência (100% areia natural). Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão são essenciais para avaliar a capacidade do pavimento de suportar tensões aplicadas, especialmente em áreas de tráfego intenso.

Os dados indicam que a adição de PET-PCR afeta negativamente essas propriedades dos pavimentos, dependendo da proporção utilizada. Isso destaca a necessidade de considerar questões práticas relacionadas à durabilidade do material. Além disso, é essencial verificar a viabilidade técnica do PET-PCR em diferentes composições, assegurando que o pavimento atenda aos requisitos de aplicação.

4.2.2 Absorção de Água por Imersão, Índice de Vazios e Coeficiente de Capilaridade

Os resultados dos parâmetros de a absorção de água por imersão, índice de vazios e coeficiente de Capilaridade são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaios de absorção de água por imersão, Índice de vazios e coeficiente de capilaridade

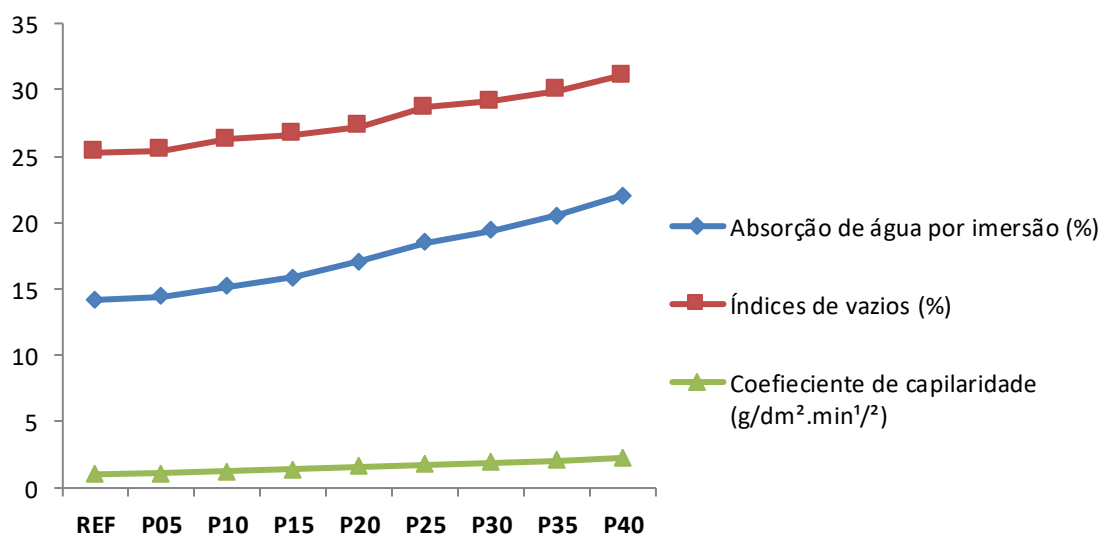
Amostra	Absorção de água por imersão (%)	Índices de vazios (%)	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
REF	14,17	25,26	1,03
P05	14,40	25,40	1,10
P10	15,20	26,24	1,23
P15	15,84	26,61	1,37
P20	17,05	27,23	1,60
P25	18,49	28,66	1,77
P30	19,39	29,12	1,90
P35	20,56	29,93	2,10
P40	22,06	31,11	2,27

Fonte: Autores (2024).

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e coeficiente de capilaridade indicam que a inclusão progressiva de PET-PCR na mistura resulta em um aumento do índice de vazios, o que contribui para uma maior capacidade de infiltração de água. Essa conclusão é confirmada pelo aumento observado tanto na absorção de água por imersão quanto no coeficiente de capilaridade.

Esses resultados são fundamentais para validar a hipótese de que a substituição parcial da areia por PET-PCR pode efetivamente promover uma maior permeabilidade no pavimento. Observe em destaque no gráfico apresentado na Figura 2 a tendência dos valores encontrados na pesquisa.

Figura 2 - Gráfico de tendência de valores médios para ensaios de resistência das argamassas



Fonte: Autores (2024).

4.2.3 Retenção de Água e Teor de Ar Incorporado

Os dados sobre os ensaios da retenção de água e o teor de ar incorporado são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Ensaios de retenção de água e o teor de ar incorporado

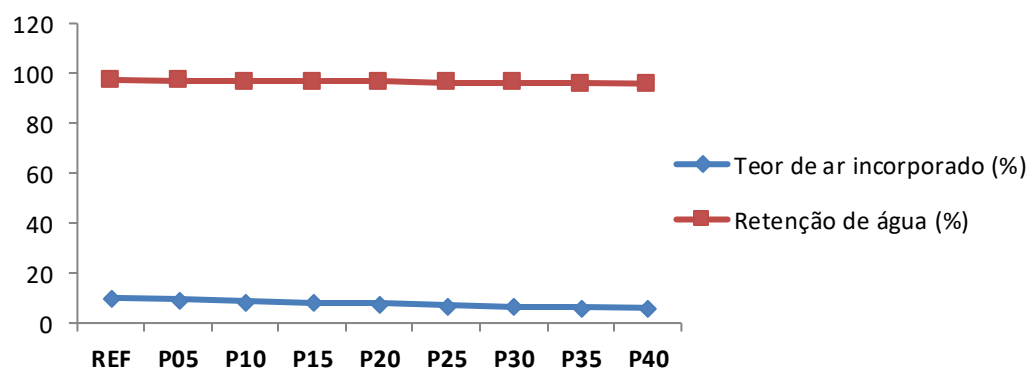
Amostra	Teor de ar incorporado (%)	Retenção de água (%)
REF	10,1	97,38
P05	9,4	97,16
P10	8,6	96,94
P15	8,2	96,89
P20	7,7	96,61
P25	7,1	96,34
P30	6,8	96,17
P35	6,4	96,03
P40	6,1	95,9

Fonte: Autores (2024).

Observa-se na tabela que os resultados dos ensaios indicam que, com o aumento da proporção de PET-PCR, tanto a retenção de água quanto o teor de ar incorporado reduzem progressivamente, corroborando a tendência esperada para esse tipo de composição. O teor de ar incorporado é um fator crucial para a durabilidade do pavimento, enquanto a retenção de água reflete a capacidade do material de se manter hidratado em diferentes condições climáticas, contribuindo para o desempenho a longo prazo.

A tendência dos valores dos ensaios da retenção de água e o teor de ar incorporado pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 - Gráfico de tendência de valores para ensaios de retenção de água e o teor de ar incorporado



Fonte: Autores (2024).

4.2.4 Densidade de Massa no Estado Endurecido e Massa Específica Real

Os resultados referentes à densidade de massa no estado endurecido e à massa específica real estão apresentados na Tabela 4. Esses resultados confirmam a expectativa inicial de redução dos valores, uma vez que o agregado artificial PET-PCR possui densidade inferior à do agregado natural (areia), além de o empacotamento das partículas na mistura aumentar a porosidade, resultando na diminuição desses parâmetros.

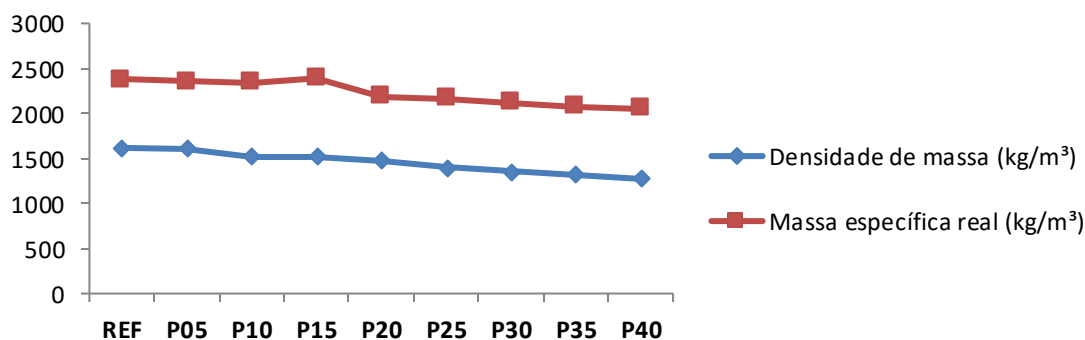
Tabela 4 - Valores para densidade de massa no estado endurecido e à massa específica real

Amostra	Densidade de massa (kg/m ³)		Massa específica real (kg/m ³)
REF	1618		2380
P05	1606		2360
P10	1526		2340
P15	1518		2390
P20	1475		2190
P25	1396		2170
P30	1351		2120
P35	1321		2080
P40	1273		2050

Fonte: Autores (2024).

A tendência dos valores médios encontrados nos ensaios de densidade de massa no estado endurecido e à massa específica real pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 - Gráfico de tendência para densidade de massa no estado endurecido e à massa específica real



Fonte: Autores (2024).

4.3 Considerações sobre os Resultados

A substituição parcial de agregados naturais por PET-PCR em argamassas apresenta tanto vantagens quanto desvantagens. Os resultados mostraram que, com o aumento da proporção de PET-PCR, houve uma redução nas resistências mecânicas à compressão e à tração na flexão, limitando o uso dessas argamassas em aplicações que exigem alta resistência estrutural. Esse efeito está em conformidade com estudos como o de Ngayakamo (2025), que observaram impacto semelhante ao incluir plásticos reciclados em materiais de construção.

Por outro lado, nos aspectos específicos de absorção de água, índice de vazios e coeficiente de capilaridade, as argamassas com PET-PCR demonstraram vantagens em aplicações onde a permeabilidade é uma característica desejada. Essas propriedades foram melhoradas pela maior porosidade resultante da inclusão de PET-PCR, o que confirma as hipóteses iniciais e corrobora estudos prévios, como os de Diniz *et al.* (2021), que ressaltam o papel dos pavimentos porosos na infiltração de água.

Nos aspectos relacionados à absorção de água por imersão, índice de vazios, coeficiente de capilaridade, retenção de água e teor de ar incorporado, observou-se que, em aplicações com características de argamassas permeáveis, as composições se mostraram vantajosas (Führ *et al.*, 2021).

Quando os parâmetros de teor de ar incorporado e retenção de água no estado fresco de uma argamassa são maiores, a tendência é que o coeficiente de absorção da argamassa seja menor. Isso ocorre porque a maior quantidade de ar incorporado e a retenção de água proporcionam uma estrutura mais porosa e saturada, o que reduz a quantidade de água que pode ser absorvida posteriormente. Corroborando com os achados da pesquisa.

O teor de ar maior cria bolhas de ar que atuam como espaços vazios na argamassa, o que pode limitar a penetração de água. Além disso, a retenção de água no estado fresco indica que a argamassa tem uma maior quantidade de água disponível para o processo de cura, resultando em uma matriz mais compacta e menos permeável após a secagem. Portanto, esses fatores combinados geralmente contribuem para um coeficiente de absorção menor.

O aumento da proporção de PET-PCR no compósito também resultou em melhorias significativas em todos esses parâmetros, tornando-o mais adequado para aplicações práticas que exigem maior permeabilidade. Conforme destacado por Diniz *et al.* (2021), os pavimentos porosos apresentam um potencial superior para a infiltração de água, um aspecto fundamental para sua eficácia.

Observa-se que os menores valores de densidade e massa encontrados nas composições que utilizam substituição parcial do agregado natural (areia) pelo agregado artificial (PET-PCR) indicam uma melhor trabalhabilidade, especialmente na montagem de pavimentos permeáveis, tornando o material mais leve e fácil de manusear. Como é amplamente reconhecido na literatura, a densidade influencia diretamente na resistência mecânica e no desempenho geral dos pavimentos, algo que foi comprovado pelos valores obtidos nos ensaios mencionados.

Os resultados indicam que a adição de PET-PCR aumenta significativamente a permeabilidade do pavimento, com destaque para o índice de vazios e o coeficiente de capilaridade. Esse efeito é comparável aos achados de Shafique *et al.* (2018), que observaram aumento na capacidade de infiltração em pavimentos com materiais reciclados. De forma prática, esses valores mais altos de permeabilidade tornam o pavimento mais adequado para aplicação em áreas de tráfego leve, como calçadas e ciclovias, onde o controle de águas pluviais é prioritário, mas as demandas de resistência são menores.

5 CONCLUSÕES

O avanço das tecnologias de pavimentação permeável, aliado ao uso de materiais reciclados como o PET, representa um passo importante em direção a cidades mais resilientes e sustentáveis. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento são fundamentais para a disseminação dessa tecnologia, bem como para a criação de normas que regulamentem a utilização de materiais reciclados na construção civil. Com o aumento da conscientização sobre a importância da gestão eficiente das águas pluviais e a redução de resíduos, o PET-PCR se apresenta como uma solução promissora, alinhando inovação e responsabilidade ambiental.

Com base na literatura revisada, a substituição parcial de areia natural por PET-PCR em pavimentos permeáveis representa uma solução promissora para a drenagem urbana sustentável. Embora desafios técnicos relacionados à resistência mecânica ainda precisem ser superados, os benefícios ambientais e a capacidade aumentada de permeabilidade desses

pavimentos reforçam sua relevância em estratégias de infraestrutura verde e desenvolvimento sustentável.

Como era esperado e demonstrado na pesquisa, a incorporação de PET-PCR como substituto parcial de agregados naturais resulta em uma argamassa com maior porosidade, que se torna uma de suas características principais. Essa porosidade é essencial para aplicações em pavimentos permeáveis, pois permite a infiltração da água através da superfície, contribuindo para a prevenção de enchentes e alagamentos em áreas urbanas, onde superfícies impermeáveis são cada vez mais predominantes.

O uso de PET-PCR promove a reciclagem de materiais plásticos, contribuindo para a redução do impacto ambiental causado pelo descarte inadequado desses resíduos. Pavimentos permeáveis são frequentemente integrados a projetos de infraestrutura verde, nos quais a sustentabilidade é um fator central. Assim, o emprego de PET-PCR está perfeitamente alinhado com essas práticas sustentáveis.

Embora a incorporação de PET-PCR possa afetar negativamente algumas propriedades mecânicas da argamassa, como a resistência à compressão e à tração na flexão, essas alterações podem ser controladas e ajustadas para atender aos requisitos de pavimentos permeáveis adequados a cada aplicação. Isso é especialmente relevante em situações que não exigem resistências tão elevadas quanto os pavimentos convencionais, como em pavimentos leves ou de tráfego moderado, onde o desempenho mecânico obtido com uma maior proporção do agregado artificial pode ser satisfatório.

Por outro lado, a diminuição na resistência à compressão e à tração na flexão, observada em proporções de PET-PCR acima de 20%, reforça uma limitação para o uso em vias de grande tráfego. Para ampliar a aplicabilidade desses pavimentos, futuras formulações poderiam incluir aditivos que reforcem a argamassa sem comprometer a permeabilidade.

Esses achados indicam que o PET-PCR é mais adequado para situações em que a resistência mecânica não é o principal requisito, mas onde a gestão de água é essencial. Em locais onde o tráfego é leve, como áreas residenciais ou zonas de pedestres, esses pavimentos podem proporcionar uma alternativa econômica e ambientalmente viável, atendendo às diretrizes de infraestrutura verde e contribuindo para a redução de inundações em áreas urbanas."

Outra vantagem observada é que o PET-PCR pode conferir maior flexibilidade à argamassa, o que é benéfico em pavimentos permeáveis, pois permite que o material se deforme levemente sem se romper, aumentando sua resistência ao desgaste e à fadiga mecânica. Essas características são essenciais para estruturas sujeitas a tráfego leve e moderado.

5.1 Considerações finais e pesquisas futuras

O estudo demonstrou que a incorporação de PET-PCR em argamassas para pavimentos permeáveis é uma abordagem promissora para a drenagem urbana sustentável. No entanto, a queda na resistência mecânica associada ao aumento da proporção de PET-PCR destaca a necessidade de ajustes na formulação para atender a diferentes requisitos de aplicação. Sugere-se, para isso, o desenvolvimento de misturas híbridas, combinando PET-PCR

com outros aditivos que possam compensar essa perda de resistência, sem comprometer a permeabilidade do material.

Para a implementação prática em projetos urbanos, recomenda-se a criação de diretrizes técnicas específicas para o uso de pavimentos com PET-PCR em áreas de tráfego leve e moderado, onde as exigências de resistência são menores. Além disso, testes em condições de campo poderiam verificar o desempenho desses pavimentos em diferentes condições climáticas e de uso, garantindo a durabilidade e eficiência da solução.

Pesquisas adicionais são recomendadas para explorar as propriedades térmicas das argamassas com PET-PCR, especialmente sua contribuição para a redução do efeito de ilhas de calor em áreas urbanas. A avaliação do comportamento térmico pode consolidar o PET-PCR como uma solução viável para pavimentos em regiões com altas temperaturas, aumentando o conforto ambiental e reduzindo custos com climatização.

Outro ponto relevante para estudos futuros é a análise de outras propriedades das argamassas, como a resistência ao desgaste e à fadiga sob condições de tráfego contínuo. A exploração de contextos de uso diferenciados e a otimização da proporção de PET-PCR nas misturas contribuirão para o desenvolvimento de normas técnicas e ampliarão o leque de aplicações práticas.

REFERÊNCIAS

AHMAD, S.; GHANI, A. N. A.; ADEWALE, P. Properties of sustainable permeable pavement. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3157-3162, 2015.

ARQUITETURA PRO. Arquitetura sustentável e o uso de recursos naturais renováveis. **Arquitetura Pro**, 2025. Disponível em: <https://arquiteturapro.com.br/arquitetura-sustentavel-e-o-uso-de-recursos-naturais-renovaveis/>. Acesso em: 30 Março. 2024.

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, 2009.

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.

BRANDÃO, R. S.; LIMA, J. A. P.; ALEXANDRE, J. Characterization and classification of mortars for underlayment with PCR-PET artificial aggregate in partial replacement of natural sand aggregate in the mix. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 12, n. 85, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/23188472128520245312>.

DINIZ, M. I. L.; CAVALCANTI, A. B.; CLAUDINO, C. M. A.; SENA, T. S.; NASCIMENTO, R. F.; NUNES, C. G. L.; SILVA, D. C.; PEREIRA, P. H. S.; DELFINO, L. M.. Estudo da eficiência de pavimentos permeáveis: análise da permeabilidade e das propriedades mecânicas. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.3, p.398-407, 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0032>

DOS SANTOS D. V. N.; PIRES G. C.; ROBERTO L. A. G. F. Análise do processo de construção de um ambiente constituído por garrafas PET. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 1, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/19800827912013594>

ENGENHARIA 360. **Pavimentos permeáveis reduzem inundações**. [S. l.], [2022]. Disponível em: <https://engenharia360.com/pavimentos-permeaveis-reduz-inundacoes/>. Acesso em: 16 jul. 2024.

FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H.; HAMEL, P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of the art. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 261-279, 2015.

FÜHR, G.; MASUERO, A.; PAGNUSSAT, D.; BARRETO, M. Impact sound attenuation of subfloor mortars made with exfoliated vermiculite and chrome sawdust. **Applied Acoustics**, v. 174, 107725, 2021.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 364, n. 1526, p. 2115-2126, 2009.

KONG, J.; JEONG, S.; LEE, J.; JEONG, S. **Permeable pavement blocks as a sustainable solution for managing microplastic pollution in urban stormwater**. *Science of The Total Environment*, v. 966, p. 178649, 2025. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178649>.

MENEZES, L. A. A.; CABRAL, J. J. S. P. Utilização de pavimento permeável como alternativa compensatória para drenagem urbana em Recife-PE. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 19, n. 5, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/1980082719520233775>

MUTTUVELU, D. V.; WYKE, S.; VOLLERTSEN, J. Are permeable pavements a sustainable solution? A qualitative study of the usage of permeable pavements. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 12432, 2022. Disponível em: 10.3390/su141912432. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su141912432>.

NGAYAKAMO, B. H. Investigation of plastic-sand paving blocks: A sustainable solution using recycled plastic waste. **Hybrid Advances**, v. 10, p. 100492, 2025. ISSN 2773-207X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100492>.

PEDUZZI, P. Sand, rarer than one thinks. **Environmental Development**, v. 11, p. 208-218, 2014.

PRATT, C.; MANTLE, J.; SCHOFIELD, P. UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures. **Water Science and Technology**, v. 32, n. 1, p. 63-69, 2017.

RYU, B.-H.; LEE, S.; CHANG, I. Pervious pavement blocks made from recycled polyethylene terephthalate (PET): fabrication and engineering properties. **Sustainability**, v. 12, n. 17, 6356, 2020. DOI: 10.3390/su12176356.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M. Use of recycled plastic in permeable pavement: a review. **Environmental Technology Reviews**, v. 7, n. 1, p. 19-30, 2018.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.

TRIPATHY, A.; ACHARYA, P. K. Ecological impact assessment of sustainable concrete paver blocks based on endpoint damage categories. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], 2023. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.281>

THAKUR, V. K.; SINGHA, A. S. **Green polymer composites from natural resources**. Cham: Springer International Publishing, 2017.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

- **Concepção e Design do Estudo:** Raul de Souza e Ramon Fernandes de Abreu.
 - **Curadoria de Dados:** Raul de Souza Brandão.
 - **Análise Formal:** Raul de Souza Brandão e Ramon Fernandes de Abreu.
 - **Aquisição de Financiamento:** Jonas Alexandre.
 - **Investigação:** Raul de Souza Brandão.
 - **Metodologia:** Raul de Souza Brandão e Ramon Fernandes de Abreu.
 - **Redação - Rascunho Inicial:** Raul de Souza Brandão.
 - **Redação - Revisão Crítica:** Ramon Fernandes de Abreu.
 - **Revisão e Edição Final:** Raul de Souza Brandão e Ramon Fernandes de Abreu.
 - **Supervisão:** Jonas Alexandre.
-

CLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, **Raul de Souza Brandão, Ramon Fernandes de Abreu e Jonas Alexandre**, declaramos que o manuscrito intitulado: "**Potencial de argamassas com PET-PCR para pavimentos permeáveis em drenagem urbana sustentável**":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui/possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho. (Detalhe aqui, se aplicável: "Este trabalho foi financiado por [Nome da Instituição ou Entidade]"; ou "Nenhuma instituição ou entidade financiadora esteve envolvida no desenvolvimento deste estudo").
2. **Relações Profissionais:** Não possui/possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
3. **Conflitos Pessoais:** Não possui/possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.