

Uso da borracha de pneu em argamassas como substituição parcial dos agregados miúdos

Pryscilla de Barros Gonçalves¹, Qurat Ul Ain², Marcus Metri Corrêa^{3*}, Maryam Iqbal⁴, Rebeca Carolina de Albuquerque Oliveira Lancha⁵, Romildo Morant de Holanda⁶

¹ M.Sc. in Environmental Engineering, Centro Universitário Maurício de Nassau, Brazil.

² B.Sc. in Environmental Engineering, University of Engineering and Technology Lahore, Pakistan.

³ PhD in Water Resources and the Environment, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brazil. (*Corresponding author: marcus.mcorrea@ufrpe.br)

⁴ B.Sc. in Electrical Engineering, University of the Punjab, Pakistan.

⁵ B.Sc. in Environmental Engineering, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brazil.

⁶ PhD in Natural Resources, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brazil.

Histórico do artigo: Submetido: 21/07/2026 - Revisado: 04/08/2026 - Aceito: 11/08/2026

ABSTRACT

Currently, the disposal of rubber tires has generated concern in society due to its irregular dumping. The difficulty in recycling the material and its impact on environment has sparked scientific interest. Researchers are exploring various possible destinations that can be given to this material to prevent environmental impact. Thus, the study investigated the partial replacement of fine aggregates in mortars made for wall coverings with rubber from crushed tires, using the ratios 1:3, 1:5, 1:0.5:3, and 1:1:5, with 5%, 10%, 20%, 40%, and 60% substitution. Laboratory tests were conducted to evaluate the properties of water absorption by capillarity, water absorption by immersion, axial compression strength, and tensile strength by diametric compression. All tests were performed in accordance with the methodologies specified by the respective standards of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). As a result, it was found that partially replacing 20% of natural fine aggregates (sand) with waste tires did not cause significant compromise in the studied mechanical properties when compared with traditional mortars.

Keywords: Disposal, Coatings, Recycling, Performance.

Uso da Borracha de Pneu em Argamassas como Substituição Parcial dos Agregados Miúdos

RESUMO

Atualmente, o descarte de pneus de borracha tem gerado preocupação na sociedade devido ao seu descarte irregular. A dificuldade na reciclagem do material e seu impacto ambiental despertaram o interesse científico. Pesquisadores estão explorando diversas destinações possíveis para esse material, visando evitar impactos ambientais. Assim, o estudo investigou a substituição parcial de agregados miúdos por borracha de pneus triturados em argamassas para revestimento de paredes, utilizando os traços 1:3, 1:5, 1:0,5:3 e 1:1:5, com teores de substituição de 5%, 10%, 20%, 40% e 60%. Foram realizados ensaios laboratoriais para avaliar as propriedades de absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral. Todos os ensaios foram conduzidos em conformidade com as metodologias especificadas pelas respectivas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Como resultado, constatou-se que a substituição parcial de 20% dos agregados miúdos naturais (areia) por resíduos de pneus não comprometeu significativamente as propriedades mecânicas estudadas quando comparadas às argamassas tradicionais.

Palavras-Chaves: Descarte, Revestimentos, Reciclagem, Desempenho.

Uso del Caucho de Neumáticos en Morteros como Sustitución Parcial de los Agregados Finos

RESUMEN

En la actualidad, la disposición de neumáticos de caucho desechados ha generado una creciente preocupación en la sociedad, ya que, por lo general, se realiza de manera inadecuada. La dificultad para reciclar este material y el impacto que ocasiona al medio ambiente han despertado el interés científico por las diversas posibilidades de aprovechamiento que permitan darle un destino adecuado sin

Gonçalves, P. de B., Ain, Q.U., Corrêa, M.M., Iqbal, M. & Holanda, R.M. (2026). Uso da borracha de pneu em argamassas como substituição parcial dos agregados miúdos. *Revista Brasileira do Meio Ambiente*, v.14, n.2, p.449-461.



causar danos ambientais. En este contexto, el presente estudio evaluó la sustitución parcial de los agregados finos de morteros destinados al revestimiento de paredes por caucho proveniente de la trituración de neumáticos, considerando las dosificaciones 1:3, 1:5, 1:0,5:3 y 1:1:5, con porcentajes de sustitución del 5 %, 10 %, 20 %, 40 % y 60 %. Para ello, se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de evaluar las propiedades de absorción de agua por capilaridad, absorción de agua por inmersión, resistencia a la compresión axial y resistencia a la tracción por compresión diametral. Todos los ensayos se llevaron a cabo de acuerdo con las metodologías establecidas en las normas correspondientes de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT). Al finalizar la investigación, se comprobó que la sustitución parcial del 20 % de los agregados finos naturales (arena) por residuos de neumáticos desechados no produjo un deterioro significativo de las propiedades mecánicas evaluadas, en comparación con los morteros convencionales.

Palabras clave: Desecho, Revestimientos, Reciclaje, Desempeño.

1. Introdução

O modelo econômico linear atual promove o consumo excessivo de recursos naturais e gera impactos ambientais significativos. O principal fator é a alta descarga de poluentes no final do ciclo de vida dos materiais (Zhao et al., 2025). Por essa razão, a transição para um modelo de economia circular mais eficiente tornou-se um objetivo fundamental. O objetivo principal é conciliar o crescimento econômico com o desenvolvimento sustentável (Monfared et al., 2025). No entanto, a circularidade da produção ainda representa menos de 10% da economia global (Fort e Cerny, 2020).

O setor da construção é responsável por aproximadamente 38% das emissões globais (Li et al., 2024). Além disso, os resíduos de construção e demolição são o principal fluxo de resíduos na União Europeia (Zhang et al., 2026). A indústria da construção produz cerca de 48 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano somente no Brasil (ABRELPE, 2022). Esse cenário destaca a necessidade de buscar métodos alternativos de reutilização para materiais secundários. Esses métodos possibilitarão a transição para uma economia circular no setor da construção.

Um dos principais desafios enfrentados pela sociedade moderna é a gestão dos pneus inservíveis. A composição química dos pneus dificulta a biodegradação. Esse tipo de lixo pode levar até 600 anos para se decompor. Além disso, o descarte e queima de resíduos de pneus impactam negativamente a atmosfera, o solo e a saúde pública (Anis et al., 2025). Em aterros sanitários, os pneus podem absorver gases liberados pela decomposição de outros resíduos. Esse fenômeno leva à expansão dos pneus e, em casos extremos, causa explosões que comprometem as coberturas do aterro. Quando descartados em áreas abertas, os pneus representam riscos à saúde pública. O acúmulo de água da chuva em pneus descartados favorece a proliferação de vetores de doenças e contribui para a contaminação ambiental. A queima dos pneus libera aproximadamente 10 litros de óleo por unidade, que pode infiltrar solo e água subterrânea, além de emitir gases tóxicos como carbono, dioxinas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e outras substâncias cancerígenas (Moreira, Souza e Figueiredo, 2021).

Estima-se que, até 2030, aproximadamente 1,2 bilhão de pneus serão descartados anualmente em todo mundo (Pham et al., 2026). Dado esse alto volume de produção, o descarte de resíduos de pneus aumentou significativamente, reforçando a necessidade de estudos focados em reciclagem e reutilização. Isso destaca a importância de desenvolver métodos simples, energeticamente eficientes e de baixo custo para reciclar resíduos de pneus (Sun et al., 2026).

Em resposta, a comunidade científica e organizações governamentais uniram esforços para desenvolver métodos mais econômicos e ambientalmente amigáveis para reciclar resíduos de borracha (Moez et al., 2026). Por meio da logística reversa, os pneus podem ser redirecionados para setores de produção, onde são transformados em produtos como tapetes, asfalto borrachado, grama sintética e combustível para a indústria de cimento, entre outros. Nos Estados Unidos e países da União Europeia, aproximadamente 80% e 95% dos pneus usados são reciclados por diferentes métodos, e cerca de 6% a 8% são aplicados em engenharia civil (Laftah et al., 2025; Wang et al., 2020).

A areia é um material mineral formado pela decomposição de vários tipos de rochas e está amplamente

disponível na natureza. É uma matéria-prima essencial para a sociedade devido ao seu uso em larga escala na indústria da construção, o que resulta em altos volumes de extração. De acordo com a Agência Nacional de Mineração do Brasil (ANM), aproximadamente 312 milhões de toneladas de areia foram extraídas em 2017, distribuídas da seguinte forma: 35% para argamassas, 20% para produção de concreto, 15% para construtoras, 10% para elementos pré-moldados, 10% para varejistas, 5% para pavimentação asfáltica e 5% para outros usos (ANM, 2019).

Embora a extração de areia seja economicamente importante, ela causa inúmeros impactos ambientais, como degradação da qualidade da água, processos de erosão e alterações na geomorfologia dos rios.

O uso de borracha de resíduos para pneus como substituto de agregados finos e grossos em matrizes cimentícias apresenta um potencial promissor para sustentabilidade e reciclagem de materiais. Diversos estudos demonstraram a viabilidade de incorporar borracha triturada em materiais de construção (Ahmed et al., 2026; Yuan et al., 2025; Ameri et al., 2021). Ahmed et al. (2026) indicaram que a incorporação do polímero PEAD ao asfalto por meio do processo úmido e do pó de borracha triturada por meio do processo seco promove um aumento significativo das propriedades Marshall, além de elevar a resistência da mistura aos danos causados pela umidade e à deformação permanente. Além disso, Yuan et al. (2025) revelaram que o betume modificado com borracha triturada (CRMB) apresentou melhoria no desempenho em altas temperaturas após exposição térmica prolongada, enquanto sua resistência ao puncionamento/fissuração está fortemente associada ao grau de inchamento. A otimização das condições de processamento permitiu um inchamento controlado, resultando em um melhor desempenho geral em serviço. De forma semelhante, Ameri et al. (2021) destacaram que a substituição de parte da escória de cobre por borracha triturada em argamassas ativadas por álcalis resultou em menor trabalhabilidade e resistência, mas melhorou o isolamento térmico, enquanto o tratamento com NaOH aprimorou a aderência entre a borracha e o aglomerante e aumentou a resistência. Os autores recomendaram utilizar 10% de borracha tratada com NaOH por 1 hora para atingir o melhor desempenho geral com benefícios ambientais.

Além disso, Santos et al. (2026) relataram que incorporar partículas de borracha de pneus em produtos pré-fabricados de gesso melhora a resistência à água, reduz a densidade e aprimora o desempenho térmico e acústico. Wang et al. (2025) destacaram que o uso de borracha de resíduos de pneus e fibras de aço recicladas em materiais concretos de cimento pode proporcionar aproveitamento total dos componentes de pneus descartados, considerando o benefício econômico e ambiental. De forma semelhante, Hassan et al. (2023) observaram que substituir 30% dos agregados finos por pó de borracha de pneus aumentou a resistência à penetração contra projéteis de alta velocidade, apesar da redução da resistência à compressão.

Singh et al. (2026) descobriram que a resistência à compressão do concreto produzido com 20% de borracha de pneus foi reduzida em 71,5%, o que está dentro do limite permitido para aplicações não estruturais. Miah et al. (2023) verificaram que a substituição do agregado fino natural por agregado fino de resíduos não causa efeitos significativos na resistência mecânica e nas propriedades de durabilidade das misturas de concreto. O estudo indicou que a resistência uniaxial à compressão de concretos contendo 20% de agregado fino de resíduos de pneus atingiu 20,17 MPa e 18,72 MPa em 28 dias, para proporções água-cimento de 0,30 e 0,55, respectivamente. Os autores concluíram que a substituição de 20% dos agregados finos naturais pode ser usada como substituto da areia de rio em muitos concretos estruturais cujos requisitos de resistência de projeto não são significativamente altos.

Apesar dos avanços observados na incorporação de resíduos de pneus em materiais cimentícios, ainda persistem lacunas relacionadas à aplicação dessa tecnologia em argamassas de revestimento, especialmente em condições representativas da realidade brasileira. Grande parte dos estudos disponíveis foi conduzida em contextos internacionais e direcionada ao concreto estrutural, cujos requisitos de desempenho diferem daqueles exigidos para argamassas de revestimento. Além disso, variações nas características dos cimentos, agregados naturais e resíduos de pneus utilizados em diferentes regiões podem influenciar significativamente o comportamento do material, dificultando a extrapolação dos resultados para o cenário nacional. Embora

existam pesquisas brasileiras sobre o aproveitamento de borracha de pneus em matrizes cimentícias, ainda são necessários estudos que avaliem de forma integrada seus efeitos sobre as propriedades mecânicas, físicas e de desempenho das argamassas, contribuindo para a definição de teores de substituição tecnicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis.

Portanto, este estudo visa avaliar experimentalmente o desempenho das argamassas de reboco produzidas com substituição parcial de agregados finos (areia) por borracha reciclada de pneus automotivos. Espera-se que essa abordagem melhore não apenas as propriedades mecânicas, térmicas e acústicas, mas também reduza significativamente os impactos ambientais associados à geração de resíduos, promovendo princípios de economia circular e sustentabilidade na indústria da construção.

2. Material e Métodos

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU). Quatro proporções de mistura de argamassa comumente recomendadas pelos padrões brasileiros para argamassa foram adotadas neste estudo: i.) 1:3 – A/C = 1,30 (sem cal hidratada) – revestimento externo; ii) 1:5 – A/C = 2,10 (sem cal hidratada) – revestimento interna; iii) 1:0,5:3 – A/C = 1,30 (com cal hidratada) – revestimento externo e iv) 1:1:5 – A/C = 2,10 (com cal hidratada) – revestimento interno.

Neste estudo, foram utilizados como aglomerantes a cal hidratada da marca ExtraCal, comercializada em sacos de 20 kg, e o cimento Portland composto com pozolana, CP II – Z – 32 MPa, da marca POTY, disponível em sacos de 50 kg. As marcas foram selecionadas por serem as mais vendidas nas lojas de materiais de construção em Recife-PE.

Para os agregados, foi utilizada areia fina da marca GMIX, comercializada em sacos de 20 kg. A areia foi submetida a um processo de secagem em estufa SOLIDSTEEL, a temperaturas de 100 ± 5 °C, por 30 a 40 minutos. Nos tratamentos, uma parte da areia fina foi substituída por Agregado Miúdo de Resíduo de Pneu (AMRP), constituído por resíduo de borracha de pneu fornecido pela empresa SK Reciclagem, localizada em São Sebastião do Passé – BA. Esta empresa realiza a trituração de pneus em sua fábrica, armazenando o material resultante em sacos de nylon de 50 kg. O AMRP foi peneirado em uma malha de 2 mm para garantir que a granulometria do material correspondesse às características de um agregado miúdo (Figura 1). Não foi utilizado nenhum tratamento químico para a incorporação do AMRP na fabricação da argamassa.

Figura 1 – Amostra de borracha utilizada na fabricação de argamassa

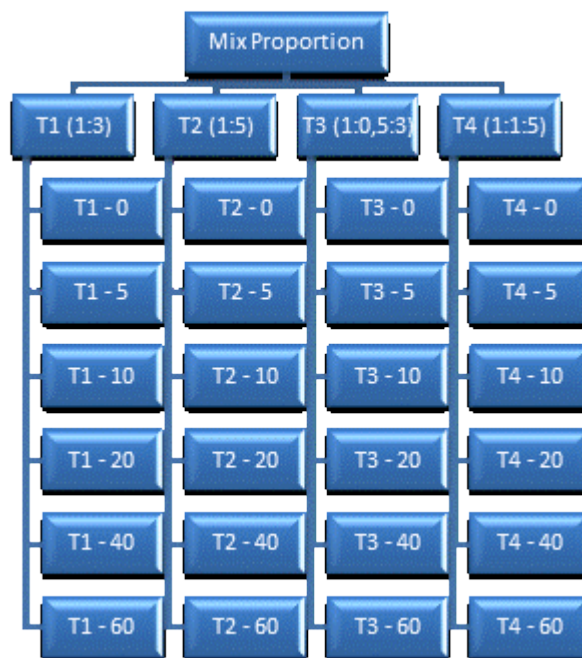


A utilização do AMRP sem tratamento químico teve como objetivo avaliar seu desempenho nas condições mais próximas da aplicação prática, permitindo analisar exclusivamente os efeitos da substituição parcial do agregado miúdo natural pelas partículas de borracha nas propriedades da argamassa. Dessa forma, os resultados obtidos refletem o comportamento do material sem modificações superficiais, possibilitando uma avaliação direta da viabilidade técnica de sua incorporação em argamassas de revestimento.

2.1 Mistura de argamassa e preparação de espasmes

Para a preparação da argamassa e identificação das amostras de teste, foram definidas as porcentagens de substituição do agregado fino (areia) pelo AMRP, bem como as respectivas proporções da mistura. Como ilustrado na Figura 2, os tratamentos T1, T2, T3 e T4 corresponderam a proporções de mistura 1:3, 1:5, 1:0,5:3 e 1:1:5, respectivamente.

Figura 2 – Fluxograma dos diversos tratamentos estudados



Cada tratamento foi combinado com níveis de reposição de 0%, 5%, 10%, 20%, 40% e 60% de areia pelo AMRP, identificados pelo sufixo numérico. Por exemplo, o tratamento "T1-0" representa a mistura controle sem adição de borracha, enquanto "T3-20" representa a mistura 1:0,5:3 com substituição volumétrica de 20% da areia por AMRP.

A mistura de argamassa seguiu os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 16541 (2016), que especifica o uso de um misturador mecânico. A mistura foi realizada usando um misturador eletromecânico de argamassa I-3010 equipado com duas velocidades de rotação e uma tigela de mistura de 5 L. Inicialmente, os constituintes secos eram colocados na tigela de mistura, e a misturadeira operava em baixa velocidade. Durante os primeiros 10 segundos de mistura, 75% da água total de mistura foi gradualmente adicionada, e a mistura continuou até 30 segundos após o início da operação. Subsequentemente, a velocidade do mixer foi aumentada e mantida por mais 60 segundos.

Após essa etapa, o misturador era parado e a argamassa aderida às paredes da pá e da tigela era cuidadosamente raspada usando uma espátula. Esse processo de raspagem não ultrapassava 90 segundos; se concluído antes, o morteiro era deixado para descansar até que os 90 segundos completos tivessem se passado. Após o período de repouso, a etapa final de mistura era iniciada adicionando os 25% restantes da água de mistura ao longo de 10 segundos, seguida pela continuação da mistura por 60 segundos.

Amostras cilíndricas de teste eram então moldadas para cada tratamento (Figura 3). Os exemplares foram desmoldados após 72 horas, de acordo com a ABNT NBR 13279 (1995), que recomenda um período de desmoldagem de 48 ± 24 horas.

Figura 3 – Processo de moldagem de corpos de prova



Após o período de cura e desmoldagem, os corpos de prova foram submetidos aos diferentes ensaios de caracterização física, hidráulica e mecânica, conforme os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas correspondentes.

2.2 Densidade Aparente (ρ)

A densidade aparente em massa de argamassas endurecidas foi determinada pelos procedimentos descritos no ABNT NBR 13280 (2005), que se aplica a argamassas usadas para assentamento de alvenaria e reboco de paredes e tetos. A densidade aparente em massa foi calculada usando a Equação (1):

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

onde m é a massa do espécime (g) e v é seu volume (cm^3). A massa da amostra foi medida usando uma balança de precisão BEL com capacidade máxima de 600 g e resolução de 0,01 g. O volume da amostra foi determinado usando um paquímetro digital. Todos os exemplares foram medidos e pesados após 28 dias de cura.

2.3 Absorção de Água por Capilaridade

A metodologia para o teste de absorção por capilaridade foi baseada na norma NBR 9779 (ABNT, 2012), com modificações. O ensaio consistiu em colocar os corpos de prova em um recipiente com uma lâmina d'água, cuja altura deveria ser constante em todos os corpos de prova, estabelecida em 5 ± 1 mm (Figura 4).

Figura 4 – Vista parcial do teste de capilaridade



Além disso, os corpos de prova foram apoiados sobre hastes de madeira para garantir o máximo contato da base com a lâmina d'água. O ensaio foi realizado após os corpos de prova completarem 28 dias de moldagem. Antes de posicionar os corpos de prova para iniciar o ensaio, eles foram lixados com lixa grossa e pesados para registrar a massa inicial de cada amostra. Após a pesagem inicial, os corpos de prova foram colocados em contato com a água e pesados novamente aos 10 e 90 minutos. Posteriormente, foram rompidos na posição longitudinal para verificar a altura da franja capilar internamente (Figura 5).

Figura 5 – Corpo de prova após ruptura longitudinal



A absorção de água foi estimada utilizando a seguinte equação (NBR 15259):

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{S} \quad (2)$$

onde A_t é a absorção capilar de água (g/cm^2), m_t é a massa da amostra no tempo t (g), m_0 é a massa inicial (g), t corresponde a 10 e 90 minutos, e S é a área da seção transversal da amostra (cm^2).

2.4 Absorção de Água por Imersão

A absorção de água por imersão foi determinada de acordo com a ABNT NBR 9778 (2005). Três amostras de cada tratamento foram selecionadas após 28 dias de cura. Os exemplares foram desgastados com lixa grossa e limpos com escova para remover resíduos superficiais. Na etapa seguinte, eram secas no forno por 72 horas a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e pesadas para obter a massa seca. Após a secagem, os exemplares foram totalmente imersos em água por 72 horas. Ao concluir o período de imersão, os esmécimes eram removidos, secados na superfície e pesados novamente. A absorção de água por imersão foi calculada usando a Equação (3):

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (3)$$

onde A é a absorção de água por imersão (%), m_{sat} é a massa saturada após a imersão (g), e m_s é a massa seca em forno (g).

2.5 Resistência à Compressão Axial

Testes de resistência axial à compressão foram realizados de acordo com a ABNT NBR 7215 (2019). Após a preparação da argamassa, a mistura foi imediatamente transferida para os moldes dos corpos de prova, garantindo que a argamassa não iniciasse o processo de pega antes da moldagem. A colocação da argamassa nos moldes foi feita com o auxílio de uma espátula, em quatro camadas de altura igual, sendo cada camada compactada com 30 golpes uniformes utilizando um soquete.

Os moldes foram deixados em repouso à temperatura ambiente por 48 horas para permitir a cura inicial. Após esse período, iniciou-se o processo de desmoldagem, conforme descrito na norma NBR 7215, para assegurar que os corpos de prova preservassem sua resistência. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram mantidos em repouso até o 28º dia, quando foram submetidos a uma pressão, por meio de uma prensa hidráulica manual digital argamassa 20T - NR12 - marca Contenco, até a ruptura. A resistência à compressão foi calculada conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2018):

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (4)$$

onde f_c é a resistência à compressão (MPa), F é a carga máxima aplicada (N) e D é o diâmetro da amostra (mm).

2.6 Resistência à tração por compressão diamétrica

A resistência à tração por compressão diametral foi determinada após a ABNT NBR 7222 (2011). Os procedimentos de moldagem e cura da amostra foram idênticos aos adotados para os testes de resistência axial à compressão. O teste consistia em aplicar uma carga compressiva ao longo do diâmetro vertical da amostra cilíndrica até que a falha ocorresse ao longo do plano horizontal. A resistência à tração foi calculada usando a Equação (5):

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (5)$$

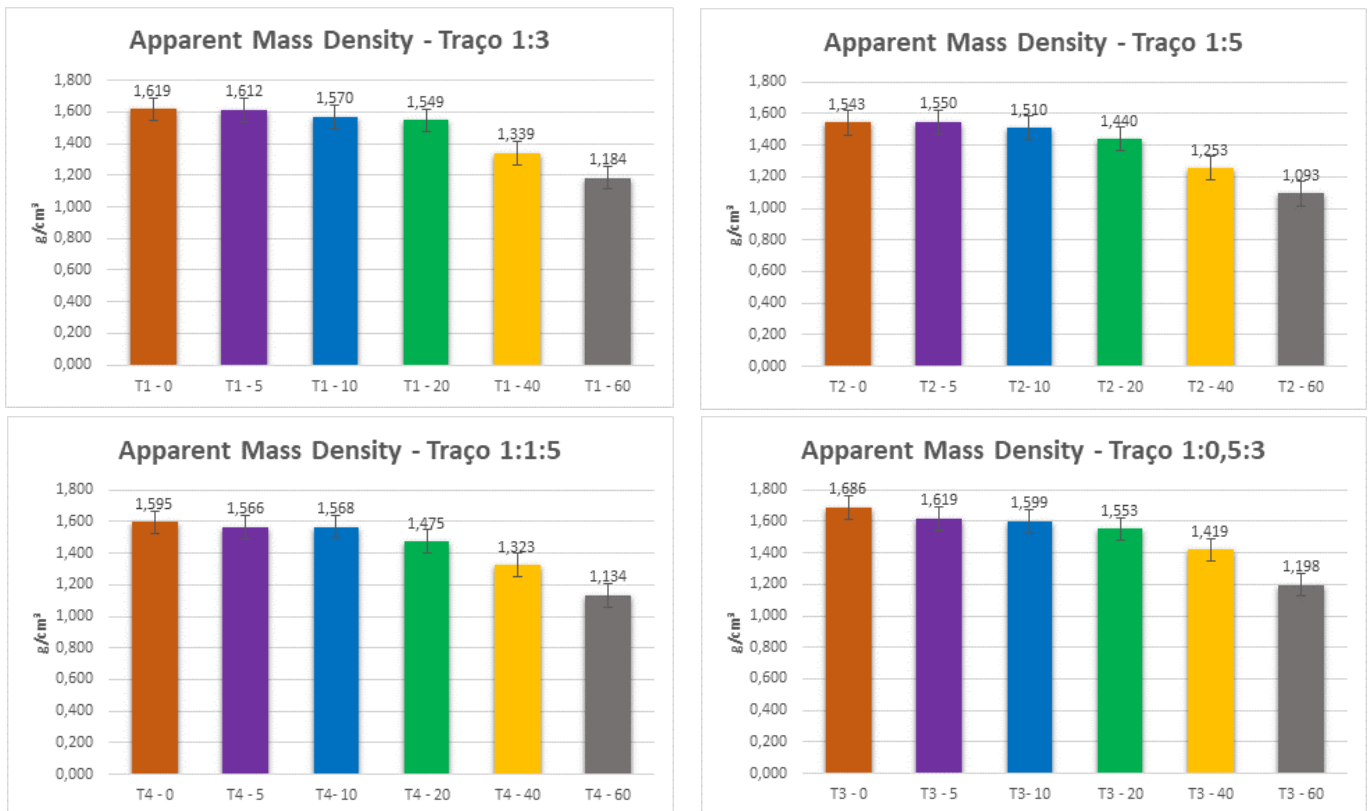
onde $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral (MPa), F é a carga máxima aplicada (N), d é o diâmetro da amostra (mm) e l é o comprimento da amostra (mm).

3. Resultados e Discussão

3.1 Densidade Aparente em Massa

Os valores aparentes de densidade global obtidos para as diferentes misturas de argamassa são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Densidade de massa aparente nos traços estudados



Uma tendência clara de queda na densidade aparente de volumes foi observada à medida que a porcentagem de borracha dos pneus incorporada aos morteiros aumentava. Os menores valores de densidade registrados são para misturas contendo 60% de substituição de areia natural por agregado miúdo de resíduo de pneu (AMRP).

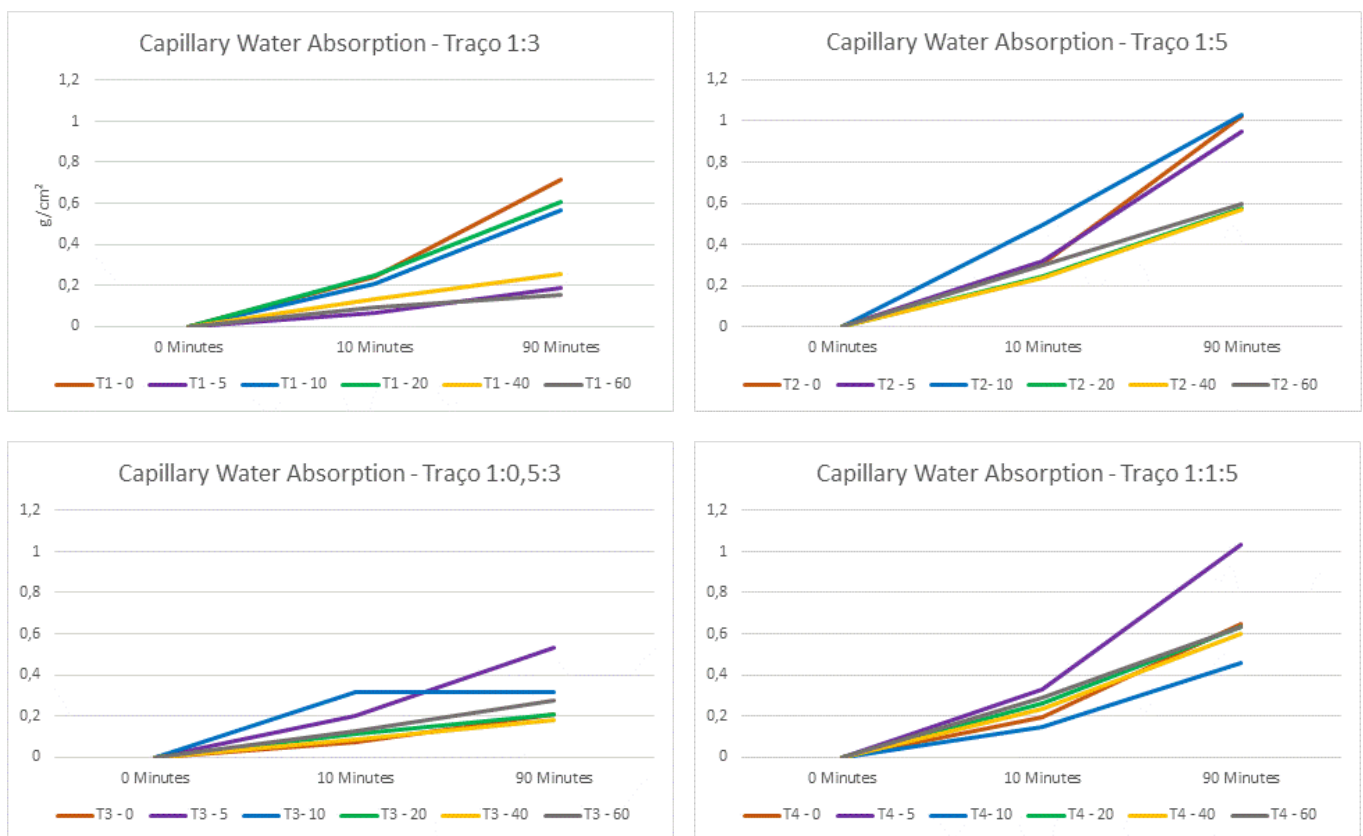
Esse comportamento deve-se às densidades dos materiais substituídos. Em ensaios preliminares foi observado que a massa específica da areia foi 2,63 g cm⁻³ enquanto que a massa específica da borracha foi de 1,17 g cm⁻³. Portanto, a adição de AMRP, que tem densidade menor do que a areia, tornou mais leve a argamassa produzida e o percentual de redução foi, em média, de 1,56%, 3,00%, 6,60%, 17,24% e 28,5% para as substituições de 5%, 10%, 20%, 40% e 60%, respectivamente.

Miah et al. (2023), analisando a substituição do agregado natural no concreto por AMRP, também observaram diminuição de densidade e atribuíram essa diminuição ao menor peso (69,54 % menor que a areia) e à massa específica (66,27 % menor que a areia) do AMRP quando comparado à areia de rio. Os autores também consideraram que a incorporação de partículas de pneus na mistura de concreto poderia aumentar os espaços vazios (maior porosidade), resultando em uma densidade menor.

3.2 Absorção de Água por Capilaridade

Os resultados da absorção de água pela capilaridade são mostrados na Figura 7. Os resultados indicam que, com o tempo, ocorreu maior absorção capilar de água em argamassas sem a incorporação do AMRP. Em contraste, argamassas contendo borracha apresentaram taxas de absorção capilares menores.

Figura 7 – Absorção de água por capilaridade



Em concordância com estudos anteriores (Vidales-Barriguete et al., 2020; Ferrandez et al., 2023), a incorporação de resíduos plásticos ou de borracha reduz a absorção de água pela capilaridade devido à natureza

hidrofóbica das partículas de borracha. No entanto, em misturas contendo cal hidratada, esse efeito hidrofóbico foi parcialmente mitigado. Para as misturas 1:0,5:3 e 1:1:5, a maior absorção capilar em 90 minutos foi observada com um nível de reposição de 5% de areia pelo AMRP.

A adição de cal hidratada às misturas de argamassa, além de aumentar a resistência mecânica e a rigidez no estado endurecido, contribui para a redução da porosidade (Santos et al., 2021). Como a água é armazenada principalmente nas estruturas dos poros, mudanças na distribuição e conectividade do tamanho dos poros afetam diretamente o comportamento de absorção capilar.

A Tabela 1 apresenta a classificação das argamassas de acordo com o coeficiente de absorção capilar estabelecido pela ABNT NBR 13281.

Tabela 1 – Classificação dos morteiros de acordo com sua Ação Capilar (NBR 13281)

Tabela 1 – Classificação de argamassas quanto à capilaridade (NBR 13281)

	Coeficiente de Absorção	Classificação
	g/dm².min^{1/2}	
T1 – 0	9,40	C5
T1 – 5	2,22	C2
T1 – 10	6,99	C4
T1 – 20	6,88	C4
T1 – 40	2,34	C2
T1 – 60	1,10	C1
T2 – 0	12,81	C6
T2 – 5	12,06	C6
T2 – 10	10,10	C5
T2 – 20	6,25	C4
T2 – 40	6,05	C4
T2 – 60	5,39	C4
T3 – 0	2,59	C3
T3 – 5	6,52	C4
T3 – 10	3,98	C3
T3 – 20	1,85	C2
T3 – 40	1,84	C2
T3 – 60	2,77	C3
T4 – 0	8,87	C5
T4 – 5	13,62	C6
T4 – 10	5,90	C4
T4 – 20	6,97	C4
T4 – 40	6,74	C4
T4 – 60	6,17	C4

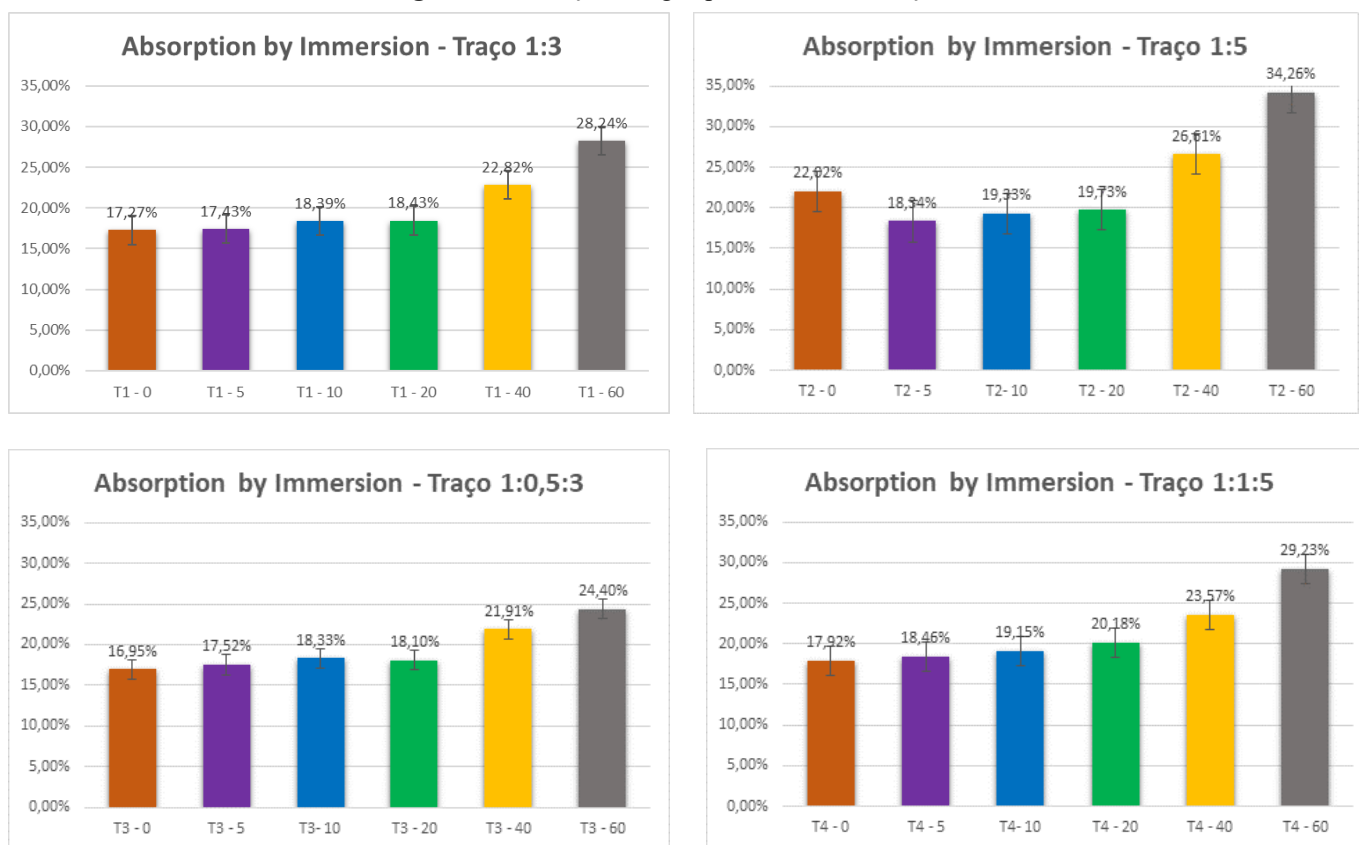
Classe C1: Coeficiente menor ou igual a 1,5 g/dm².min^{1/2} (menor absorção); Classe C2: Coeficiente de 1,0 a 2,5 g/dm².min^{1/2}; Classe C3: Coeficiente de 2,0 a 4,0 g/dm².min^{1/2}; Classe C4: Coeficiente de 3,0 a 7,0 g/dm².min^{1/2}; Classe C5: Coeficiente de 5,0 a 12,0 g/dm².min^{1/2} e Classe C6: Coeficiente maior ou igual a 10,0 g/dm².min^{1/2} (maior absorção).

A maioria dos morteiros industrializados disponíveis no mercado é classificada como C4. Assim, as seguintes misturas atenderam ao padrão desejável da indústria: a mistura 1:3 com substituição de 10% e 20%; a mistura 1:5 com substituição de 20%, 40% e 60%; a mistura 1:0,5:3 com substituição de 5%; e a mistura 1:1:5 com 10%, 20%, 40% e 60% de substituição.

3.3 Absorção de Água por Imersão

A absorção de água por imersão apresentou comportamentos muito semelhantes entre os diferentes tratamentos, como mostrado na Figura 8. Um aumento na absorção de água foi observado apenas quando o nível de reposição do AMRP ultrapassou 40%.

Figura 8 - Absorção de água por imersão nos traços estudados



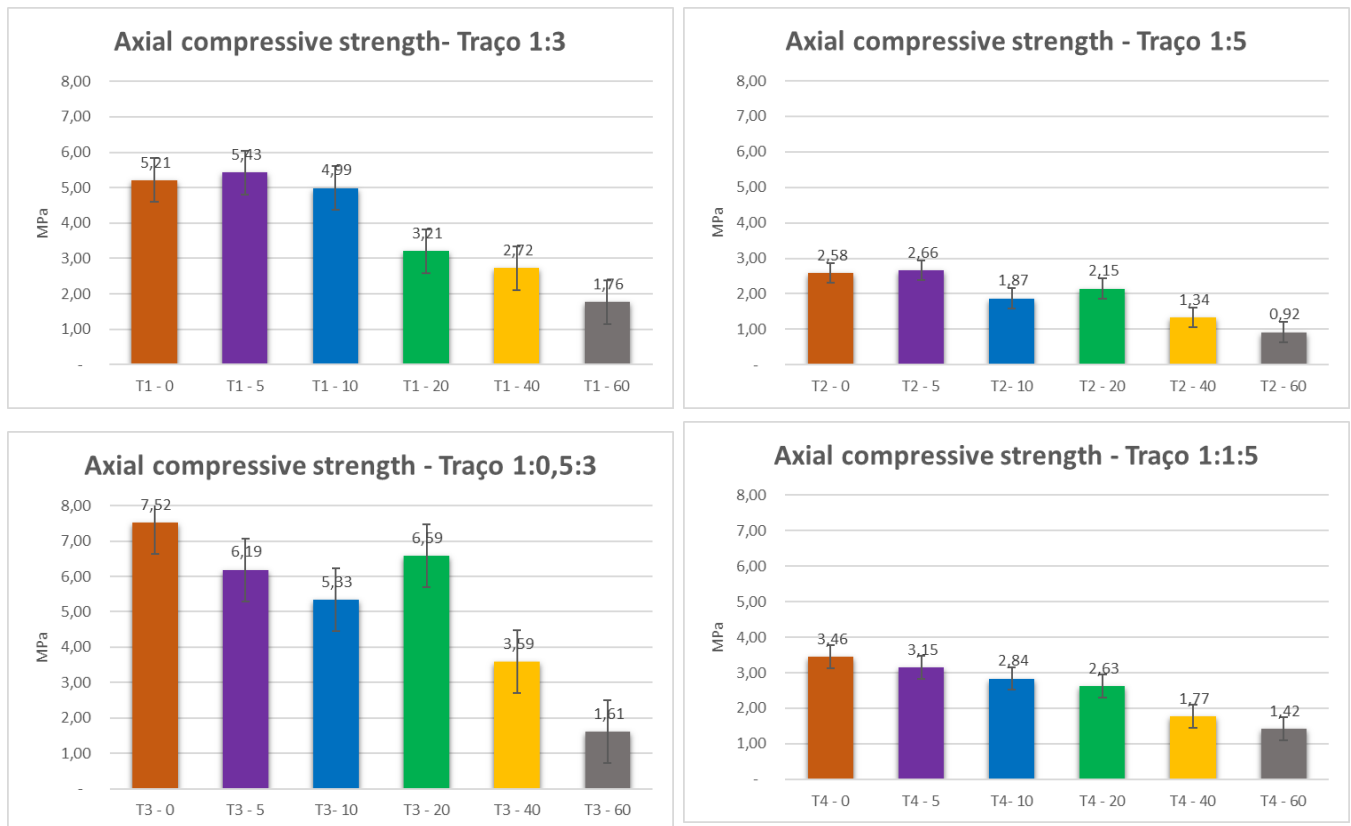
Thakare et al. (2022) também relataram aumento na absorção de água com a incorporação de fibras de borracha de pneus de resíduo, atribuindo esse efeito ao aumento do conteúdo de vazios na matriz de argamassa. A incorporação do AMRP pode aumentar o volume dos poros e promover a interconectividade dos poros, facilitando uma maior absorção de água durante a imersão.

Também foi observado que a adição de cal hidratada reduziu a absorção de água, conferindo maior impermeabilidade às argamassas. Esse efeito pode ser atribuído ao tamanho fino das partículas da cal hidratada, que preenche os vazios dentro da matriz cimentícia, reduzindo assim a porosidade geral.

3.4 Resistência à Compressão Axial

Os resultados da resistência axial à compressão são apresentados na Figura 9. Os valores obtidos indicam que substituir a areia natural por AMRP tende a levar a uma redução da resistência à compressão.

Figura 9 - Resistência à Compressão Axial nos Traços Estudados



Para todas as proporções de mistura avaliadas, os menores valores de resistência à compressão foram observados no nível mais alto de reposição (60%). Comparado aos morteiros de controle, a resistência à compressão dos morteiros borrachados contendo 5%, 10%, 20%, 40% e 60% de AMRP apresentou reduções médias de aproximadamente 4,8%, 19,7%, 22,9%, 49,2% e 67%, respectivamente, em 28 dias.

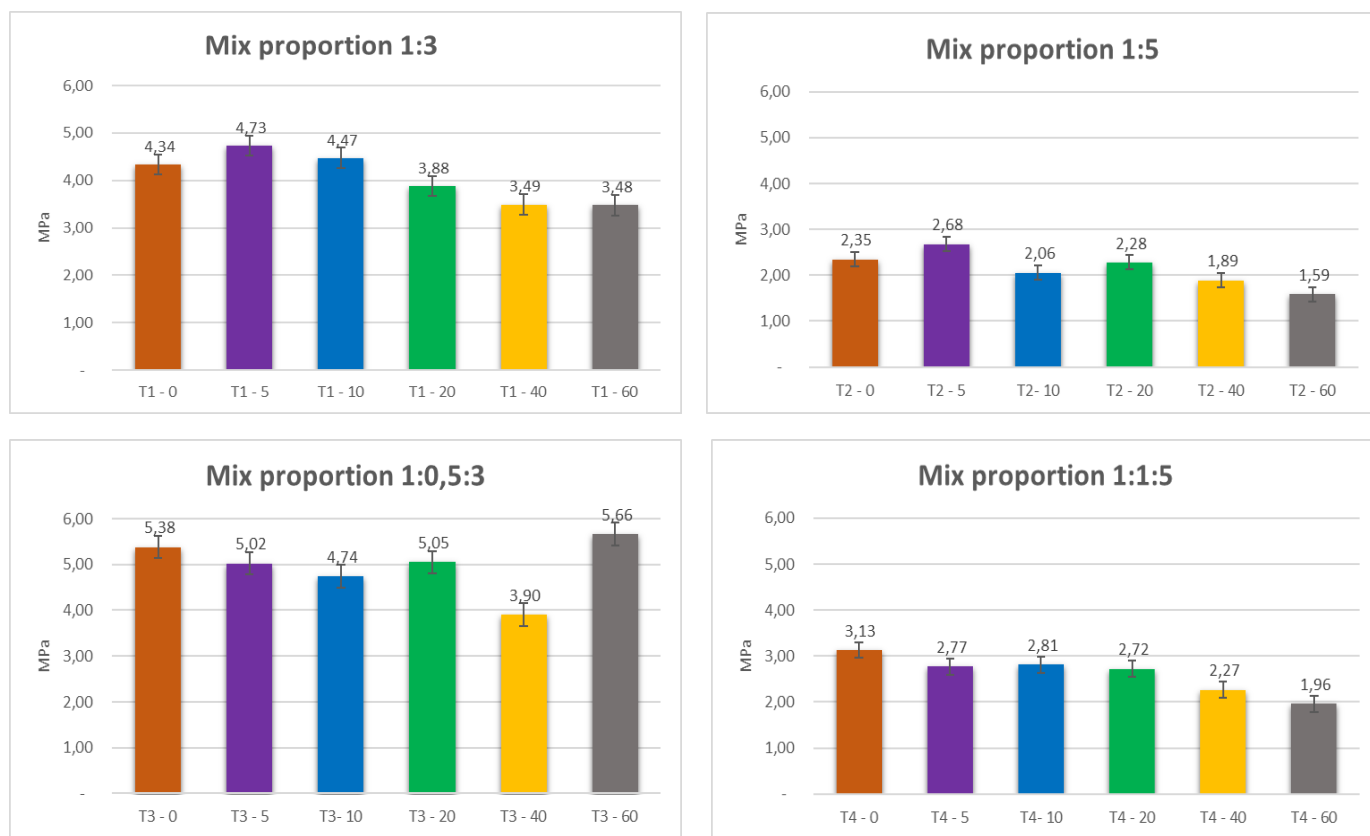
O principal fator que contribui para essa redução da resistência à compressão é a fraca ligação interfacial entre partículas de borracha não tratadas e a pasta de cimento (Miah et al., 2023; Zhu et al., 2023). Apesar dessa tendência geral, observou-se um aumento na resistência à compressão para as misturas 1:3 e 1:5 com substituição de 5% de AMRP, o que é um resultado desejável, já que a resistência à compressão é um indicador-chave de durabilidade para aplicações de renderizado.

Além disso, para todas as proporções da mistura, níveis de substituição de até 20% resultaram em valores de resistência à compressão acima do limite mínimo recomendado de 1,5 MPa, indicando viabilidade técnica para aplicações práticas.

3.5 Resistência à tração por compressão diamétrica

Os resultados da resistência à tração por compressão diametral são mostrados na Figura 10. Essa propriedade foi apenas minimamente afetada pela substituição da areia pela AMRP. Os valores relativamente estáveis de resistência à tração sugerem que a incorporação de partículas de borracha não comprometeu significativamente a resistência do material a tensões de tração. Esse comportamento pode estar associado à capacidade de absorção de energia das partículas de borracha, o que pode contribuir para mecanismos de ponte de trinca e atrasar a propagação da trinca sob carga diametral.

Figura 10 - Resistência à tração por compressão diamétrica



Os resultados obtidos evidenciam que a incorporação do agregado miúdo proveniente de resíduos de pneus modifica significativamente as propriedades físicas e mecânicas das argamassas, sendo os efeitos diretamente dependentes do teor de substituição empregado. Embora níveis elevados de incorporação resultem em redução da resistência à compressão, substituições de até 20% preservaram o desempenho técnico necessário para aplicações em revestimentos, ao mesmo tempo em que proporcionaram redução da densidade e melhoria do comportamento frente à absorção capilar de água. Sob a perspectiva ambiental, esses resultados reforçam o potencial de reaproveitamento de resíduos de pneus como alternativa para reduzir a disposição

inadequada desse passivo ambiental e diminuir a demanda por agregados naturais, contribuindo para práticas mais sustentáveis e alinhadas aos princípios da economia circular na construção civil.

4. Conclusão(s)

O grande volume de pneus descartados gerado anualmente. Ao mesmo tempo, a extração extensiva de areia natural necessária para atender às demandas da indústria da construção representa um desafio ambiental global significativo. Nesse contexto, este estudo avaliou experimentalmente a viabilidade de substituir parcialmente agregado fino natural por agregado miúdo de resíduo de pneu (AMRP) em argamassas de reboco. Esta pesquisa também enfatiza as principais propriedades físicas e mecânicas relevantes para aplicações de revestimentos.

A incorporação do AMRP levou a uma redução consistente na densidade aparente de argamassa à medida que o nível de substituição aumentava. Esse comportamento está diretamente associado à menor densidade da borracha dos pneus em comparação com a areia natural, resultando em compósitos de argamassa mais leves. A argamassa sem AMRP apresentaram maior absorção de água por capilaridade. A adição de partículas de borracha reduziu a absorção capilar de água devido à sua natureza hidrofóbica; no entanto, esse efeito foi parcialmente compensado por misturas contendo cal hidratada, que alteraram a estrutura porosa da matriz cimentícia.

A absorção de água por imersão mostrou comportamento semelhante na maioria das misturas, com aumento perceptível apenas em níveis de reposição acima de 40%. A presença de cal hidratada contribuiu para menor absorção de água, indicando melhor impermeabilidade devido aos efeitos de preenchimento dos poros. A resistência axial à compressão diminuiu com o aumento do conteúdo de AMRP, principalmente devido à fraca ligação interfacial entre partículas de borracha não tratada e a pasta de cimento. No entanto, argamassas contendo até 20% de substituição de areia natural mantiveram valores de resistência à compressão acima do limite mínimo recomendado de 1,5 MPa, demonstrando viabilidade técnica para aplicações de renderizado.

A resistência à tração por compressão diametral foi apenas levemente influenciada pela incorporação do AMRP, sugerindo que a substituição da areia por borracha de pneus não compromete significativamente o desempenho à tração em argamassas de reboco. Considerando o desempenho físico e mecânico obtido, a substituição parcial da areia natural por agregado miúdo de resíduo de pneu em teores de até 20% representa uma alternativa ambientalmente promissora para argamassas de revestimento, conciliando viabilidade técnica com a valorização de resíduos sólidos e a redução da exploração de recursos naturais não renováveis, em consonância com os princípios da economia circular e da construção sustentável.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela Coordenação para o Aperfeiçoamento do Pessoal do Ensino Superior (CAPES), Brasil – Código Financeiro 001. Os autores também reconhecem o apoio de bolsas concedido pela CAPES.

6. Referências

Ahmed, A.A.A.A., Morsi, A.G.M. & Eisa, M.S. (2026). Improving the mechanical properties and performance of asphalt mixtures using high density polyethylene and crumb rubber powder. **Case Studies in Construction Materials**, 24(e06011), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2026.e06011>

Ameri, F., Shoaie, P., Musaei, H.R., Zareei, S.A. & Ban, C.C. (2021). Corrigendum to “Partial replacement of copper slag with treated crumb rubber aggregates in alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**, 283 (123212). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123212>

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2022). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 64p.

Anis, S., Sukarni, S., Azeez, A., Siswantara, A.I., Maulana, S., Fitriyana, D.F., Kusumastuti, A., Siregar, J.P., Palanisamy, S., Alagarsamy, A., Abbas, M., Kalathil, S. & Belay, M. (2025). Thermogravimetric and physicochemical characterization of waste tire–coconut shell blends as potential renewable energy feedstock, **Journal of Royal Society of Chemistry**, 4(1), 537-550. <https://doi.org/10.1039/d5su00712g>

ANM - Agência Nacional de Mineração (2019). **Sumário Mineral 2017**. Brasília-DF, 201p.

Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1995). **NBR 13529: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas**. Rio de Janeiro, 8p.

Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2005). **NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água por Imersão - Índice de Vazios e Massa Específica**. Rio de Janeiro, 4p.

Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2005). **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro, 2p.

Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2011). **NBR 7220: Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 5p.

Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2012). **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 3p.

Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2016). **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura para a realização de ensaios**. Rio de Janeiro, 6p.

Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2018). **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 9p.

Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2019). **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 12p.

Ferrandez, D., Yedra, E., Recalde-Esnoz, I. & del Castillo, H. (2023). Reuse of end-of-life tires and their impact on the setting time of mortars: Experimental study using a new measuring equipment. **Journal of Building Engineering**, 69(106255), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106255>

- Fort, J. & Cerny, R. (2020). Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios. **Waste Management**, 118, 510-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.004>
- Hassan, Z., Sakai, Y. & Watanabe, K. (2023). Penetration resistance and damage characteristics of cementitious mortar with partially replaced waste tire rubber as a filler against high-speed impact loading. **Journal of Building Engineering**, 80(108039), 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108039>
- Li, K., Zou, Z., Zhang, Y. & Shuai, C. (2024). Assessing the spatial-temporal environmental efficiency of global construction sector. **Journal of Science of the Total Environment**, 951(175604). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175604>
- Laftah, W.A. & Rahman, W.A.W.A. (2025). A comprehensive review of tire recycling technologies and applications. **Royal Society of Chemistry**, 6 (15), 4992-5010. <https://doi.org/10.1039/d5ma00463b>
- Miah, M.J., Huaping, R., Paul, S.C., Babafemi, A.J., Sharma, R. & Jang, J.G. (2023). Performance of eco-friendly concrete made from recycled waste tire fine aggregate as a replacement for river sand. **Structures**, 58(105463). <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105463>
- Moreira, A.R., Gonçalves, H.M. de S. & Figueiredo, A.P. de (2021). Reciclagem de pneus inservíveis para cobertura diária alternativa de aterro sanitário de pequeno e médio porte. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, 16(3), 332-337. <https://doi.org/10.18378/rvads.v16i3.9188>
- Moez, A. & Fattahi, S.M. (2026). Upcycled engineered earth from recycled sand via hybrid carbonate – hydroxide activation of slag with waste brick powder and recycled rubber fibers. **Journal of Materials and Design**, 266(116187), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2026.116187>
- Monfared, M., Marandi, F. & Sauer, P. (2025). Achieving sustainable development by integrating circular economy principles into solid waste management: A systematic literature review and research agenda, **International Journal of Production Economics**, 290(109787), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109787>
- Pham, T.T., Ngo, S.H., Trinh, T.H. & Pham, T.H. (2026). Impact resistance and low-carbon potential of concrete using rubber from scrap tires. **Journal of Next Materials**, 12(102366), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2026.102366>
- Santos, P., Alvoeiro, F., Ferrandez, D., Benzal, A.Z., Sanchez, E.A. & Duraes, L. (2026). Innovative gypsum composites and silica aerogels based on recycled tyre rubber colloidal solution for high thermal performance LSF systems. **Applied Materials Today**, 51(103344), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2026.103344>
- Singh, S., Zeng, H. & Kim, H.J. (2026). Performance evaluation of concrete pavement incorporating recycled rubber tire mulch for urban heat island mitigation. **Journal of Next Sustainability**, 7(100303). <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2026.100303>
- Sun, Q., Zhai, Y., Li, Z., Ye, X., Zhang, L. & Wang, Y. (2026). Efficient electromagnetic wave absorption of porous 3D heterogeneous composites based on Fe₃O₄ / waste-tyre-recycled carbon black (RCB) hybrids. **Journal of Composites Communications**, 62(102728). <https://doi.org/10.1016/j.coco.2026.102728>

Santos, A. M., Costa e Silva, A. J. & Mota, J.M.F. (2021). Influência da Adição de Cal Hidratada na Aderência do Preparo da Base Chapisco e Argamassa para Revestimento. **Revista Matéria**, 24(3), 1-15. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13039>

Thakare, A.A., Gupta, T., Deewan, R. & Chaudhary, S. (2022). Micro and macro-structural properties of waste tyre rubber fibre-reinforced bacterial self-healing mortar. **Construction and Building Materials**, 322(126459). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126459>

Vidales-Barriguete, A., Atanes-Sanchez, E., Rio-Merino, M. & Pina-Ramirez, C. (2020). Analysis of the improved water-resistant properties of plaster compounds with the addition of plastic waste. **Construction and Building Materials**, 230(116956). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116956>

Wang, J., Zhao, C., Li, Q., Song, G. & Hu, Y. (2025). The synergistic effect of recycled steel fibers and rubber aggregates from waste tires on the basic properties, drying shrinkage, and pore structures of cement concrete. **Journal of Construction and Building Materials**, 470(140574). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140574>

Wang, Q.Z., Wang, N.N. & Tseng, M.L. (2020). Waste tire recycling assessment: road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China, **Journal of Cleaner Production**, 249(4):119411. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119411>

Yuan, J.; Jin, T., Cheng, H., Li, M., Wang, Z. & Sun, L. (2025). Performance evolution and technique optimization of crumb rubber modified bitumen under thermal effect throughout the production and construction process. **Fuel**, 394(135115). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135115>

Zhang, C., Hu, M., Pohjalainen, E., Maio, F.D. & Stegemann, J.A. (2026). Enhancing the uptake of secondary raw materials in the construction sector through reuse and recycling. **Chem Circularity**, 1(100013), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.checir.2026.100013>

Zhao, G., Pan, X., Yan, H., Tian, J., Han, Y., Guan, H., Ruan, Y., Liu, B. & Chen, F. (2025). Recycling shield discharged soil to produce sustainable controlled low-strength material: Performance, microscale characteristics, and environmental life cycle assessment. **Journal of Sustainable Materials and Technologies**, 46(e01717). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01717>

Zhu, Z., Lu, Y. & Zhou, M. (2023). A functionalized waste tire rubber powders for mitigating leaching of heavy metal ions and enhancing photocatalytic properties of rubberized cement mortar. **Journal of Building Engineering**, 78(107749). <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107749>