

Construção Sustentável e Inteligente: Análise de Argamassas com Incorporação de PET-PCR por Espectroscopia Acústica de Impacto

Raul de Souza Brandão

Professor Doutor, IFES, Brasil.
Doutorando, UENF, Brasil.
raul.brandao@ifes.edu.br
orcid.org/0009-0001-7399-2747

Gustavo dos Santos de Oliveira

Professor Mestre, IFF, Brasil.
Doutorando, UENF, Brasil.
gustavo2789@hotmail.com

Ramon Fernandes de Abreu

Doutorando, UENF, Brasil
ramonfeab@hotmail.com
orcid.org/0000-0003-3516-2643

José Augusto Pedro Lima

Professor Doutor, UENF, Brasil.
japlima@uenf.br

Jonas Alexandre

Professor Doutor, UENF, Brasil.
jonas@uenf.br
orcid.org/0000-0002-2977-5585

Construção Sustentável e Inteligente: Análise de Argamassas com Incorporação de PET-PCR por Espectroscopia Acústica de Impacto

RESUMO

Objetivo – O estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de argamassas com substituição parcial de agregado natural por PET-PCR (polietileno tereftalato pós-consumo reciclado) utilizando a técnica de Espectroscopia Acústica de Impacto (EAI). O foco está na inovação tecnológica e na sustentabilidade no setor da construção civil, investigando o impacto do PET-PCR nas propriedades mecânicas e acústicas das argamassas.

Metodologia – Foram preparadas amostras de argamassa com diferentes proporções de PET-PCR (10%, 20%, 30% e 40%) e aplicou-se a técnica de Espectroscopia Acústica de Impacto (EAI) para caracterização das propriedades mecânicas e acústicas. Os ensaios avaliaram a resistência à compressão, tração e a capacidade de isolamento acústico dos materiais desenvolvidos.

Originalidade/relevância – O estudo preenche uma lacuna ao integrar a análise de argamassas com PET-PCR e a utilização da EAI como ferramenta de caracterização. Essa abordagem inovadora permite a avaliação de materiais cimentícios reciclados sob a ótica da acústica, fornecendo alternativas sustentáveis para a construção civil e contribuindo para a redução de resíduos plásticos.

Resultados – Os resultados indicam que a substituição parcial do agregado natural por PET-PCR reduz as resistências mecânicas (compressão e tração), mas melhora as propriedades acústicas das argamassas, tornando-as adequadas para aplicações de isolamento acústico de impacto. A análise demonstrou que a EAI é uma ferramenta eficaz para avaliar as propriedades estruturais desses materiais.

Contribuições teóricas/metodológicas – O estudo valida o uso da Espectroscopia Acústica de Impacto como método de análise para materiais cimentícios reciclados, ampliando as possibilidades de caracterização não destrutiva. Além disso, a pesquisa contribui para o avanço da sustentabilidade no setor da construção civil ao investigar a viabilidade do PET-PCR como material alternativo.

Contribuições sociais e ambientais – A substituição de agregados naturais por PET-PCR promove benefícios ambientais, reduzindo a quantidade de resíduos plásticos e diminuindo a extração de recursos naturais. A pesquisa também propõe soluções sustentáveis para o setor da construção, com potencial impacto na resiliência urbana e na eficiência energética de edificações.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica. PET-PCR. EAI.

Sustainable and Smart Construction: Analysis of Mortars with PET-PCR Incorporation through Impact Acoustic Spectroscopy

ABSTRACT

Objective – This study aims to evaluate the performance of mortars with partial replacement of natural aggregate by PCR-PET (post-consumer recycled polyethylene terephthalate) using the technique of Impact Acoustic Spectroscopy (IAS). The focus is on technological innovation and sustainability in the construction sector, investigating the effects of PCR-PET on the mechanical and acoustic properties of the mortars.

Methodology – Mortar samples with different PCR-PET proportions (10%, 20%, 30%, and 40%) were prepared and tested using the Impact Acoustic Spectroscopy (IAS) technique to characterize their mechanical and acoustic properties. The experiments assessed compressive strength, tensile strength, and the sound insulation capacity of the developed materials.

Originality/relevance – The study fills a gap by integrating the analysis of mortars with PCR-PET and the use of IAS as a characterization tool. This innovative approach allows for the evaluation of recycled cementitious materials from an acoustic perspective, providing sustainable alternatives for the construction industry and contributing to the reduction of plastic waste.

Results – The findings indicate that partially replacing natural aggregate with PCR-PET reduces mechanical strength (compression and tension) but enhances the acoustic properties of mortars, making them suitable for impact sound insulation applications. The analysis demonstrated that IAS is an effective tool for assessing the structural properties of these materials.

Theoretical/methodological contributions – The study validates the use of Impact Acoustic Spectroscopy as an analytical method for recycled cementitious materials, expanding non-destructive characterization possibilities. Additionally, the research contributes to advancing sustainability in the construction sector by investigating the feasibility of PCR-PET as an alternative material.

Social and environmental contributions – The replacement of natural aggregates with PCR-PET promotes environmental benefits, reducing plastic waste and minimizing the extraction of natural resources. The research also proposes sustainable solutions for the construction sector, with potential impacts on urban resilience and building energy efficiency.

KEYWORDS: Acoustic, PCR-PET. IAS.

Construcción Sostenible e Inteligente: Análisis de Morteros con Incorporación de PET-PCR mediante Espectroscopía Acústica de Impacto

RESUMEN

Objetivo – Este estudio tiene como objetivo evaluar el rendimiento de morteros con sustitución parcial de agregado natural por PET-RPC (polietileno tereftalato reciclado post-consumo) utilizando la técnica de Espectroscopía Acústica de Impacto (EAI). El enfoque está en la innovación tecnológica y la sostenibilidad en el sector de la construcción, investigando los efectos del PET-RPC en las propiedades mecánicas y acústicas de los morteros.

Metodología – Se prepararon muestras de mortero con diferentes proporciones de PET-RPC (10%, 20%, 30% y 40%) y se aplicó la técnica de Espectroscopía Acústica de Impacto (EAI) para caracterizar sus propiedades mecánicas y acústicas. Los ensayos evaluaron la resistencia a la compresión, la tracción y la capacidad de aislamiento acústico de los materiales desarrollados.

Originalidad/relevancia – El estudio llena un vacío al integrar el análisis de morteros con PET-RPC y el uso de la EAI como herramienta de caracterización. Este enfoque innovador permite la evaluación de materiales cementicios reciclados desde una perspectiva acústica, proporcionando alternativas sostenibles para la industria de la construcción y contribuyendo a la reducción de residuos plásticos.

Resultados – Los hallazgos indican que la sustitución parcial del agregado natural por PET-RPC reduce las resistencias mecánicas (compresión y tracción), pero mejora las propiedades acústicas de los morteros, haciéndolos adecuados para aplicaciones de aislamiento acústico de impacto. El análisis demostró que la EAI es una herramienta eficaz para evaluar las propiedades estructurales de estos materiales.

Contribuciones teóricas/metodológicas – El estudio valida el uso de la Espectroscopía Acústica de Impacto como método de análisis para materiales cementicios reciclados, ampliando las posibilidades de caracterización no destructiva. Además, la investigación contribuye al avance de la sostenibilidad en el sector de la construcción al investigar la viabilidad del PET-RPC como material alternativo.

Contribuciones sociales y ambientales – La sustitución de agregados naturales por PET-RPC promueve beneficios ambientales, reduciendo la cantidad de residuos plásticos y disminuyendo la extracción de recursos naturales. La investigación también propone soluciones sostenibles para el sector de la construcción, con un impacto potencial en la resiliencia urbana y la eficiencia energética de los edificios.

PALABRAS CLAVE: Acústica. PET-RPC. EAI.

RESUMO GRÁFICO



1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma das principais consumidoras de recursos naturais e uma das maiores geradoras de resíduos sólidos. A busca por alternativas sustentáveis que mitiguem o impacto ambiental desse setor tem se intensificado nas últimas décadas como destacados em Wahrlich *et al.* (2020) e Caldas *et al.* (2020).

Entre essas alternativas, destaca-se o uso de resíduos plásticos como substitutos parciais de agregados naturais em materiais de construção, como argamassas e concretos (Silva *et al.*, 2014). A problemática ambiental associada ao descarte inadequado de resíduos plásticos, como o polietileno tereftalato (PET), e a crescente demanda por soluções sustentáveis na construção civil, são questões de extrema relevância para novos estudos.

Os polímeros de PET têm sido amplamente estudados devido à sua abundância como resíduo sólido urbano e às suas propriedades físicas adequadas para a incorporação em materiais cimentícios (Frigione, 2010). A utilização do PET pós-consumo reciclado (PET-PCR) como agregado parcial em argamassas pode não apenas reduzir a quantidade de resíduos plásticos nos aterros, mas também diminuir a extração de agregados naturais, promovendo a sustentabilidade na construção civil (Erdem e Arioğlu, 2017).

A técnica acústica de ensaios por impacto tem se mostrado uma ferramenta eficaz na avaliação das propriedades mecânicas e estruturais de materiais cimentícios. Esse tipo de técnica não destrutiva permite a análise detalhada das características acústicas do material, proporcionando dados valiosos sobre sua integridade e desempenho (Rehman *et al.*, 2016).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o desempenho de argamassas com substituição parcial de agregado natural por PET-PCR utilizando a técnica de Espectroscopia Acústica de Impacto. A pesquisa busca contribuir para a compreensão dos efeitos dessa substituição nas propriedades mecânicas e acústicas das argamassas, promovendo a utilização sustentável de resíduos plásticos na construção civil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Uso de resíduos plásticos em materiais de construção

O crescente problema ambiental causado pelo descarte inadequado de resíduos plásticos tem motivado pesquisas sobre o seu reaproveitamento na construção civil. Dentre esses resíduos, o polietileno tereftalato (PET) destaca-se por sua abundância e propriedades físicas favoráveis.

Frigione (2010) investigou a reciclagem de garrafas de PET como agregado fino em concreto, observando que a incorporação de PET reciclado pode melhorar certas propriedades mecânicas do material, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental.

Pesquisas como as de Silva *et al.* (2014), exploraram a utilização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em materiais compósitos, incluindo a substituição de agregados naturais por plásticos reciclados.

Esses estudos descritos demonstram que a adição de PET pode melhorar a durabilidade e a resistência à tração do concreto, tornando-o uma alternativa viável e ecologicamente correta aos agregados tradicionais.

2.2 Propriedades das argamassas com PET-PCR

As argamassas são materiais amplamente utilizados na construção civil, sendo essencial avaliar como a substituição parcial de agregados naturais por PET-PCR (polietileno tereftalato pós-consumo reciclado) afeta suas propriedades. Sendo que a substituição parcial de agregados naturais por PET em argamassas pode resultar em materiais com menor densidade e, em alguns casos, melhoria na resistência ao impacto e absorção de energia.

Estudos conduzidos por Erdem e Arioğlu (2017) analisaram o desempenho ambiental de gesso reforçado com fibras de PET reciclado, constatando que a utilização de resíduos plásticos pode reduzir a pegada de carbono do material final. Esses achados sugerem que a incorporação de PET-PCR em argamassas pode não apenas proporcionar benefícios mecânicos, mas também contribuir para a sustentabilidade do setor da construção.

2.3 Técnica de Espectroscopia Acústica de Impacto

A EAI é uma técnica não destrutiva amplamente utilizada para avaliar as propriedades internas de materiais cimentícios. Binda *et al.* (2001) destacaram a eficácia da testes na detecção de falhas e na análise das características acústicas de estruturas de alvenaria. A aplicação desta técnica em argamassas com PET-PCR pode fornecer informações valiosas sobre a integridade estrutural e o comportamento mecânico do material.

Além disso, pesquisas semelhantes como de Dimitrius *et al.* (2009) demonstraram a técnica de emissão acústica (EA) é amplamente utilizada para a detecção de danos em tempo real em concreto que a EA pode ser utilizada para monitorar a evolução de danos e a degradação de materiais cimentícios ao longo do tempo, permitindo uma avaliação mais precisa da durabilidade e da vida útil das estruturas construídas com materiais alternativos, como as argamassas com PET-PCR.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi elaborada para avaliar o desempenho de argamassas com substituição parcial de agregados naturais por PET-PCR, com ênfase na análise de propriedades acústicas e mecânicas. O detalhamento metodológico abrange os materiais utilizados e as etapas de preparação, moldagem, cura e análise das amostras. A técnica de Espectroscopia Acústica de Impacto foi empregada como abordagem para caracterizar as propriedades acústicas analisadas no estudo.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados na preparação das argamassas foram os seguintes:

Cimento (aglomerante) Portland CP-II E 32, em saco de 50 kg, foi adquirido em uma loja comercial da cidade de Cachoeiro de Itapemirim, ES. O material pertence a um único lote, o que foi suficiente para a realização de todos os ensaios, assegurando a homogeneidade na composição das argamassas desenvolvidas no estudo.

Areia natural de granulometria média (agregado natural), lavada, seca e peneirada, conforme a NBR 7211. Trata-se de um material de quartzo proveniente de rio, extraído em

Cachoeiro de Itapemirim, ES. A quantidade adquirida foi superior à necessária para os ensaios, permitindo a manutenção adequada das composições desenvolvidas na pesquisa.

O PET-PCR (agregado artificial) é um material reciclado de garrafas PET de diferentes morfologias e cores, obtido de duas fontes: o primeiro, denominado PET-PCR micronizado, foi produzido pela unidade piloto de reciclagem da UFES, em Vitória, ES; o segundo, chamado areia de PET-PCR, é proveniente de uma indústria localizada na região de Campos dos Goytacazes, RJ. Esses materiais foram previamente misturados e peneirados para garantir a homogeneidade nos ensaios e a manutenção da granulometria média, visando à substituição do agregado natural.

Água potável e isenta de impurezas utilizadas na preparação das argamassas, é fornecida pela concessionária de saneamento Águas do Paraíba da cidade de Campos dos Goytacazes, RJ.

3.2 Métodos

Foram preparadas duas séries de amostras de argamassas com três corpos-de-prova prismáticos para cada e com idade de 28 dias (ABNT, 2005).

Série Controle/Referência (SC): Argamassas com 100% da proporção de agregado na mistura com elemento natural.

Série Experimental (SE): Argamassas com variações na composição de mistura, sendo: 10%, 20%, 30% e 40% de substituição parcial em volume da proporção do agregado natural por agregado artificial PET-PCR.

Tabela 1: Proporção em volume dos componentes anidros das argamassas.

Amostras	Cimento (%)	Areia (%)	PET-PCR (%)
Controle (SC)	14,3	85,7	0,0
10% PET-PCR (SE1)	14,3	77,1	8,6
20% PET-PCR (SE2)	14,3	68,6	17,1
30% PET-PCR (SE3)	14,3	60,0	25,7
40% PET-PCR (SE4)	14,3	51,4	34,3

Fonte: Autores (2024).

As proporções dos materiais cimento, agregados e água: A relações de mistura foram mantidas constantes para todas as amostras, seguindo uma proporção em volume de 1:6 (aglomerante:agregados). A preparação das argamassas seguiu os seguintes passos:

Mistura dos materiais (cimento, areia, PET-PCR e água): Fora utilizado um misturador mecânico, seguindo as proporções estabelecidas e mantendo um controle padronizado de umidade e temperatura no laboratório. A mistura foi realizada com adição gradual da água e mistura contínua até obter uma consistência homogênea, conforme os procedimentos descritos na NBR 16541 (ABNT, 2016).

Moldagem e cura das amostras: Foram utilizados moldes prismáticos 4x4x16 cm, conforme orientações da NBR 13279 (ABNT, 2005), na quantidade de 3 amostras por cada mistura desenvolvida na pesquisa. Após a moldagem, as amostras foram submetidas a um processo de cura, realizado em laboratório controlado com temperatura do ar de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(60 \pm 5)\%$ por um período de 28 dias conforme as definições normativas descritas na NBR 13279 (ABNT, 2005).

Ensaio de Espectroscopia Acústica de Impacto (EAI): A realização dos testes ocorreu com os corpos-de-prova na idade de 28 dias (tolerância $\pm 8h$), as amostras foram submetidas à técnica EAI para avaliação das suas propriedades mecânicas e estruturais. O procedimento para os ensaios de EAI incluiu:

Preparação das amostras: As amostras tiveram suas superfícies limpas com pano absorvente, a fim de, retirar potenciais impurezas e umidade superficial.

Configuração do equipamento: O EAI foi calibrado, e os sensores de impacto e de recepção acústica foram acoplados às amostras de acordo com as especificações técnicas do equipamento para a realização dos ensaios.

Realização dos ensaios: Uma esfera presa a um pendulo de impacto com distancia padronizada foi utilizada para gerar o impacto nas amostras. Os sinais acústicos resultantes foram captados pelos sensores piezoelétricos e analisados por meio de *software* especializado do próprio equipamento.

Análise dos dados obtidos nos ensaios de EAI foram utilizadas para determinar as seguintes propriedades das argamassas: Velocidade de propagação das ondas sonoras, pico de intensidade sonora ponderado e frequência de ressonância característica (fundamental longitudinal).

Comparação com Amostras de Controle: Os resultados das amostras de argamassa com PET-PCR foram comparados com os das amostras de controle (100% de agregado natural) para avaliar o impacto da substituição de agregados nas propriedades mecânicas e acústicas das argamassas. As comparações incluíram análise estatística utilizando testes de significância (ANOVA) para determinar a relevância das diferenças observadas.

Além dos ensaios acústicos e de densidade, considerados não destrutivos, as amostras foram posteriormente submetidas a ensaios destrutivos finais para determinar a resistência mecânica à compressão e à tração. Esses ensaios complementares permitem estabelecer correlações com os dados obtidos nas análises acústicas, proporcionando uma visão mais abrangente do comportamento dos materiais.

A Figura 1 apresenta a execução dos ensaios acústicos e mecânicos realizados na pesquisa, evidenciando as amostras sendo submetidas aos equipamentos adequados para a condução dos testes.

Figura 1: Amostras submetidas aos ensaios acústicos e mecânicos



Fonte: Autores (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

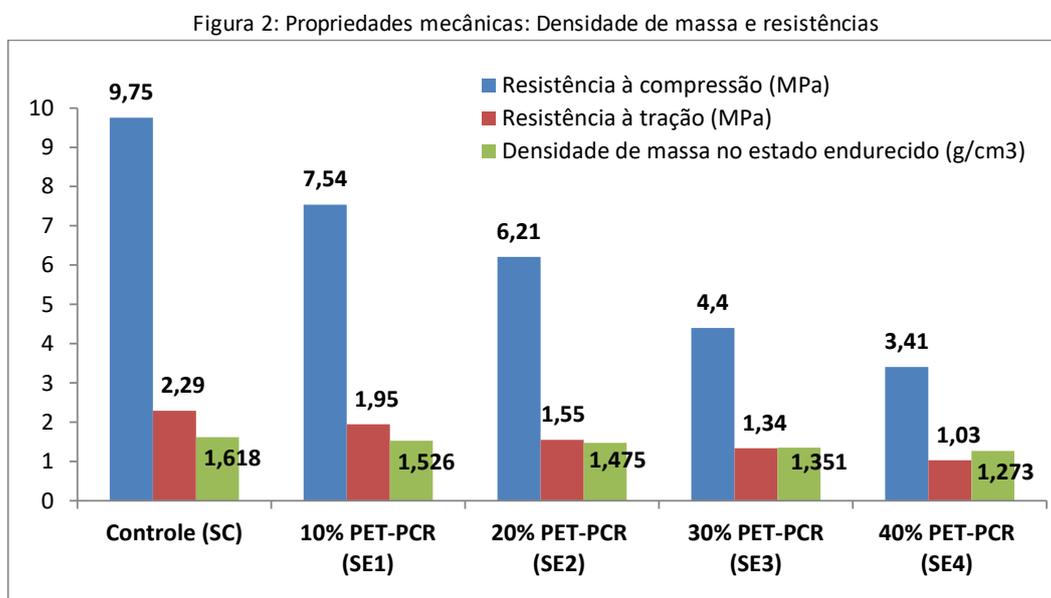
4.1 Resultados

Essa seção apresenta os resultados observados na pesquisa para os ensaios mecânicos e acústicos.

4.1.1 Ensaios de Propriedades Mecânicas

As medições dos ensaios densidade e os testes de compressão realizados nas amostras de argamassas com diferentes porcentagens de PET-PCR revelaram variações significativas nas propriedades mecânicas em comparação com as amostras de controle (SC).

A Figura 2 apresenta os valores médios das densidades de massa aparente no estado endurecido, resistências à compressão, resistências a tração das amostras após 28 dias de cura para as diferentes composições de argamassas.



Fonte: Autores (2024).

Os resultados indicam que a resistência à compressão, a resistência a tração e a densidade de massa diminuem com o aumento da porcentagem de PET-PCR na composição. Esse comportamento pode ser atribuído à menor densidade e rigidez do PET em comparação aos agregados naturais.

4.1.2 Ensaios de Propriedades Acústicas

A técnica de Espectroscopia Acústica de Impacto (EAI) foi utilizada para avaliar as propriedades acústicas das argamassas desenvolvidas na pesquisa. A análise acústica de materiais utilizados em ambientes construtivos é cada vez mais relevante para indústria construção civil, de modo que ensaios não destrutivos é ferramenta promissora no dinamismo das obras, pois permitem que sejam obtidas informações integradas e globais da estrutura e de elementos que compõem o ambiente construído.

Quando é tratado da rigidez e do amortecimento principalmente, se faz necessário repetir e comparar ao longo do tempo, a fim de obter respostas relacionadas a durabilidade e condições estruturais pertinentes, assim a análise acústica é uma inovadora metodologia de ensaio não-destrutivo que visa a determinação diversas características dos materiais cimentícios, parâmetros que correlacionados propriedades de resistência mecânica das argamassas, configura-se como diretriz ao dimensionamento de elementos relevantes da construção.

A Tabela 2 apresenta os valores médios encontrados nos ensaios para as propriedades de velocidade de propagação das ondas sonoras, pico de intensidade sonora ponderado e frequência de ressonância característica (fundamental longitudinal) para as diferentes amostras de composição estudadas.

Tabela 2: Propriedades acústicas: velocidade de propagação, pico de intensidade e frequência característica

Amostras	Velocidade de propagação das ondas sonoras (m/s)	Pico de intensidade sonora ponderado (dB)	Frequência de ressonância característica (Hz)
Controle (SC)	2532	87,17	7914
10% PET-PCR (SE1)	2460	86,49	7688
20% PET-PCR (SE2)	2181	85,43	6816
30% PET-PCR (SE3)	1793	85,16	5604
40% PET-PCR (SE4)	1556	84,38	4864

Fonte: Autores (2024).

Os resultados indicam que a velocidade de propagação das ondas acústicas diminui com o aumento da quantidade de PET-PCR, o que é indicativo de uma redução na rigidez do material devido ao aumento da porosidade. Além disso, o pico de intensidade sonora ponderado registrado também apresentou redução, sugerindo uma maior capacidade de absorção de energia das argamassas com PET-PCR quando submetidas ao impacto.

A frequência de ressonância característica, que está relacionada à integridade estrutural do material, também diminuiu com o aumento da substituição do agregado natural pelo agregado artificial PET-PCR, esse quesito tende a indicar a presença de heterogeneidades internas na morfologia de interligação entre os materiais.

Esses achados são consistentes com a literatura existente. Desde Binda *et al.* (2001) que destacaram a eficácia na detecção de falhas internas e na análise das características acústicas de materiais cimentícios a serem reparados. Também em Zhu *et al.* (2016) é confirmada que a EAI é uma técnica confiável para monitorar a evolução de danos e a degradação de materiais ao longo do tempo. Chegando em Houcine *et al.* (2023) é possível notar em seus resultados que as velocidades ultrassônicas diminuem com o aumento da porcentagem de substituição de areia natural por PET no concreto.

Em conjunto com essas pesquisas, existe evidência substancial que quanto maior a porcentagem de PET na composição da mistura, mais lenta será a velocidade das ondas sonoras, maior a absorção de energia, bem como a redução da frequência de ressonância, isso quando submetidas a energia proveniente de impacto.

4.2 Discussão

Este estudo investigou o desempenho de argamassas com substituição parcial de agregado natural por PET-PCR, utilizando a técnica tradicional de avaliação de propriedades mecânicas e Espectroscopia Acústica de Impacto para avaliar suas propriedades acústicas. O

resumo dos principais achados e implicações da pesquisa são destacados a seguir.

4.2.1 Propriedades Mecânicas

Os três parâmetros estudados tiveram seus valores reduzidos com o aumento da porcentagem de PET-PCR na composição das misturas.

Como a densidade de massa aparente no estado endurecido diminuiu, logo foi possível comprovar e identificar uma tendência de queda nos valores conforme incremento de PET-PCR na composição em relação a areia, o que proporciona a redução de peso no desenvolvimento das estruturas dos ambientes construídos com argamassas mais leves, trazendo com isso benefícios através da redução cada vez maior do seu peso. Os resultados para esse objeto de estudo demonstraram a redução de 6%, 9%, 17% e 21%, respectivamente das composições de amostras com 10%, 20%, 30% e 40% de substituição.

Para o parâmetro de resistência à compressão das argamassas as amostras com 10%, 20%, 30% e 40% de substituição apresentaram reduções de 22%, 36%, 54% e 65%, respectivamente, ao se comparar com a amostra referência (SC).

Já no requisito de resistência à tração das argamassas houve redução nos valores com 10%, 20%, 30% e 40% de substituição e apresentaram reduções de 15%, 33%, 42% e 55%, respectivamente, em comparação com a amostra da série de controle.

Essas reduções nas propriedades de resistência podem ser atribuídas à menor densidade e rigidez do PET em comparação aos agregados naturais, além da morfologia irregular e desuniforme de interligação entre os componentes da mistura, o que impacta negativamente a distribuição das tensões e a coesão interna do material.

4.2.2 Propriedades Acústicas

As três propriedades acústicas estudadas na pesquisa, tiveram comportamento semelhantes de redução de seus valores conforme foi sendo incrementando a quantidade de agregado artificial PET-PCR em substituição do agregado natural areia. Assim pode ser observado que a velocidade de propagação das ondas acústicas, a intensidade sonora ponderada e a frequência de ressonância característica diminuíram conforme a quantidade de PET-PCR aumentou na composição das argamassas.

As velocidades de propagação das ondas acústicas variaram de 2532 m/s para a argamassa de referência a 1556 m/s para a composição com maior porcentagem de PET, indicando uma redução de 36%. O pico de intensidade sonora ponderado também apresentou uma diminuição, passando de 87,17 dB para 84,38 dB. Já a frequência de ressonância característica reduziu de 7914 Hz para 4864 Hz.

Em ambos os casos, essa redução ocorreu ao comparar a composição de referência com as composições que possuem maior proporção de PET, conforme ilustrado na Tabela 2. Esses valores diminuindo indicam que existe redução na rigidez do material e presença de heterogeneidades internas na morfologia de interligação, potencialmente esses achados comprovam que maior é absorção de energia dessas composições quando submetidas ao impacto.

4.2.3 Aplicações Específicas

Apesar da redução na resistência à compressão, as argamassas com PET-PCR mostraram-se adequadas para aplicações que não exigem alta resistência mecânica, mas que podem se beneficiar das propriedades acústicas melhoradas, como o controle acústico do ambiente construído.

Para sustentabilidade ambiental, destaca-se que a incorporação de PET-PCR em argamassas representa uma estratégia eficaz para reduzir o impacto ambiental do setor da construção, promovendo a reutilização de resíduos plásticos e diminuindo a necessidade de extração de recursos naturais. Este enfoque contribui para a economia circular e para a mitigação do problema do descarte inadequado de plásticos.

5 CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS

5.1 Conclusões

A substituição parcial de agregados naturais por PET-PCR em argamassas apresenta tanto vantagens quanto desvantagens. A redução da resistência à compressão com o aumento da quantidade de PET-PCR pode ser vista como uma limitação, especialmente para aplicações que requerem alta resistência mecânica.

No entanto, a menor densidade encontrada nas composições com substituição parcial de agregado natural (areia) por agregado artificial (PET-PCR), melhora capacidade de dissipação de energia das argamassas, algo que tem potencial vantajoso para aplicações específicas, como redução no peso das estruturas e na utilização em materiais estruturais, de preenchimento e elementos arquitetônicos para tratamento e controle acústico do ambiente.

Além disso, a incorporação de PET-PCR em argamassas contribui para a sustentabilidade ambiental, reduzindo a quantidade de resíduos plásticos que são descartados em aterros e diminuindo também com a extração de recursos advindos de recursos naturais. Erdem e Arioğlu (2017) ressaltam com destaque a importância de tais abordagens para reduzir a pegada de carbono e promover a economia circular na construção civil.

Portanto, os resultados deste estudo sugerem que, embora a substituição parcial de agregados naturais por PET-PCR possa comprometer algumas propriedades mecânicas como visto na resistência mecânica das argamassas, ela oferece benefícios ambientais significativos e pode ser vantajosa para aplicações específicas com vantagens acústicas considerável para o controle de ambientes construídos.

A técnica de Espectroscopia Acústica de Impacto se mostrou eficaz na avaliação das propriedades acústicas, proporcionando uma ferramenta valiosa para a análise de materiais cimentícios avançados que utilizam de elementos reciclados em suas composições de mistura.

Esses achados complementam estudos anteriores, como os de Frigione (2010) e Silva *et al.* (2014), que também observaram uma redução na resistência mecânica com a incorporação de PET em materiais cimentícios.

Além disso, Houcine *et al.* (2023), ao avaliarem as propriedades acústicas do concreto em função do percentual de PET incorporado, detectaram uma diminuição tanto nas densidades quanto na resistência média à compressão, à medida que aumentava a substituição de PET em relação aos agregados.

Há evidências na literatura de que materiais com maior porosidade em sua estrutura

apresentam melhorias na absorção sonora, especialmente em relação ao ruído de impacto. Neste estudo, o aumento da proporção de PET-PCR na composição das argamassas demonstrou mais uma vez essa tendência, corroborando com achados de pesquisas similares, como os de Führt *et al.* (2021).

Esses resultados evidenciam melhorias no desempenho acústico de sistemas de argamassas submetidos a impactos, reforçando a contribuição positiva do PET-PCR para a absorção sonora em materiais porosos.

5.2 Pesquisas futuras

Este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre o uso de resíduos plásticos na construção civil, oferecendo uma análise detalhada das propriedades de argamassas com substituição parcial de agregados naturais por PET-PCR.

Os resultados destacam tanto os desafios quanto às oportunidades associadas a essa abordagem, fornecendo uma base para futuras pesquisas e aplicações práticas que visem a sustentabilidade e a inovação no setor da construção.

Variações na Proporção de PET-PCR: Investigar outras proporções de substituição de agregados naturais por PET-PCR para encontrar um equilíbrio ideal entre desempenho mecânico, acústico e benefícios ambientais.

Avaliação em Longo Prazo: Realizar estudos de durabilidade em longo prazo para avaliar o comportamento das argamassas com PET-PCR em condições ambientais variadas.

Análise de Outros Resíduos Plásticos: Explorar a utilização de outros tipos de resíduos plásticos reciclados em argamassas e concretos, comparando suas propriedades com as do PET-PCR.

Desenvolvimento de Novas Técnicas de Avaliação: Continuar o desenvolvimento e a aplicação de técnicas não destrutivas, como a EAI, para aprimorar a análise e a caracterização de materiais cimentícios reciclados.

Além dos pontos expostos acima, é possível concluir que uma boa prática para mitigar os impactos ambientais oriundos dos rejeitos de PET-PCR é a reciclagem desses resíduos, de forma a utilizá-los em argamassas e outros derivados cimentícios na construção civil, originando novos compósitos com propriedades melhoradas. Algo que torna relativamente importante os novos esforços em pesquisas de desenvolvimento de materiais.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). **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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211: Agregados para concreto — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

BINDA, L., SAISI, A., TIRABOSCHI, C. Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures, **NDT and E Int.** 34 (2) (2001) 123–138

CALDAS, L. R.; CARVALHO, M. T. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação de estratégias para a mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. **Ambiente construído**, v. 20, n. 3, p. 343–362, jul. 2020.

DIMITRIOS G. A., TOMOKI S., SHOUHEI M., AND AKINOBU H., Acoustic Emission and Ultrasound for Damage Characterization of Concrete Elements, **Materials Journal**, Volume: 106, 509-514 DOI: 10.14359/51663333, 2009.

ERDEM, S., & ARIOĞLU, N. An Analysis of the Properties of Recycled PET Fiber-Gypsum Composites. **A|Z Itu Journal Of The Faculty Of Architecture**, 14(1), 91–101. <https://doi.org/10.5505/itujfa.2017.70288>, 2017

FRIGIONE, M. Recycling of PET Bottles as Fine Aggregate in Concrete. **Waste Management**, 30(6), 1101-1106, 2010.

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

HOUCINE B.; MOHAMED R.; SAMIR K.; SARRA B. Valorization of plastic waste in concrete for sustainable development. **Materials and Design**, 2023.

REHMAN, S. K. U., IBRAHIM, Z., MEMON, S. A., JAMEEL, M. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review, **Construction and Building Materials**, Volume 107, 2016, Pages 58-86, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>.

SILVA, R. V., *et al.* Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**. 65. 201–217. [10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117), 2014.

WAHRLICH, JÚLIA & ALVARENGA, R.A.F. & HENKES, JAIRO & ROSSATO, IVETE & SIMIONI, FLÁVIO. AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA: UMA REVISÃO. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. 9. 183. [10.19177/rgsa.v9e22020183-201](https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e22020183-201), 2020.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** Raul de Souza e José Augusto Pedro Lima.
 - **Curadoria de Dados:** José Augusto Pedro Lima e Gustavo dos Santos Oliveira.
 - **Análise Formal:** Raul de Souza Brandão e José Augusto Pedro Lima.
 - **Aquisição de Financiamento:** Jonas Alexandre.
 - **Investigação:** Raul de Souza Brandão.
 - **Metodologia:** Raul de Souza Brandão, José Augusto Pedro Lima e Gustavo dos Santos Oliveira.
 - **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:** Jose Augusto Pedro Lima e Jonas Alexandre.
-

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, **Raul de Souza Brandão, Gustavo dos Santos de Oliveira, Ramon Fernandes de Abreu, José Augusto Pedro Lima, Jonas Alexandre**, declaramos que o manuscrito intitulado "**Construção Sustentável e Inteligente: Análise de Argamassas com Incorporação de PET-PCR por Espectroscopia Acústica de Impacto**":

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.
-