

Análise da atenuação acústica em ruídos de impacto e resistência à compressão de argamassas para contrapiso com substituição parcial de agregado natural por PET-PCR

Analysis of acoustic attenuation in impact noise and compression resistance of mortars for underlayment with partial replacement of natural aggregate by PET-PCR.

Análisis de la atenuación acústica en ruidos de impacto y resistencia a la compresión de morteros para contrapiso con sustitución parcial de agregado natural por PET-PCR.

Raul de Souza Brandão

Professor Doutor, IFES, Brasil.
raul.brandao@ifes.edu.br

José Augusto Pedro Lima

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

Jonas Alexandre

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

RESUMO

Este estudo tem como objetivo analisar os efeitos da substituição parcial do agregado natural por Polietileno Tereftalato Pós Consumo Reciclado (PET-PCR) em argamassas para contrapiso, destacando tanto o desempenho acústico e a resistência à compressão. A pesquisa adota uma abordagem metodológica que abrange desde a caracterização dos materiais até a avaliação de desempenho em termos de resistência e atenuação acústica. A originalidade do trabalho reside na análise abrangente das propriedades físicas e mecânicas das argamassas, focando na eficácia da substituição do agregado natural por PET-PCR. Os resultados indicam que, à medida que a proporção de PET-PCR na mistura aumenta, a densidade de massa aparente diminui, impactando diretamente na resistência à compressão. Além disso, destaca-se a melhoria na absorção sonora em argamassas com maior substituição de areia por PET-PCR, evidenciando implicações positivas no desempenho acústico desses materiais. As contribuições teóricas e metodológicas incluem uma compreensão mais profunda das propriedades das argamassas, enquanto as implicações sociais e ambientais residem na promoção de práticas sustentáveis na construção civil, destacando o potencial uso de materiais reciclados.

PALAVRAS-CHAVE: Atenuação acústica. Ruídos de impacto. Argamassas para contrapiso.

SUMMARY

This study aims to analyze the effects of partial replacement of natural aggregate with Post-Consumer Recycled Polyethylene Terephthalate (PET-PCR) in screed mortars, emphasizing both acoustic performance and compressive strength. The research adopts a methodological approach that encompasses material characterization to performance evaluation in terms of strength and acoustic attenuation. The originality of the work lies in the comprehensive analysis of the physical and mechanical properties of mortars, focusing on the effectiveness of replacing natural aggregate with PET-PCR. The results indicate that as the proportion of PET-PCR in the mix increases, the apparent density decreases, directly impacting compressive strength. Additionally, there is an improvement in sound absorption in mortars with higher substitution of sand by PET-PCR, highlighting positive implications for the acoustic performance of these materials. Theoretical and methodological contributions include a deeper understanding of mortar properties, while social and environmental implications reside in promoting sustainable practices in construction, emphasizing the potential use of recycled materials.

KEYWORDS: Acoustic attenuation. Impact noise. Compression resistance. Mortars for subfloor.

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar los efectos de la sustitución parcial del agregado natural por Polietileno Tereftalato Postconsumo Reciclado (PET-PCR) en morteros para contrapisos, destacando tanto el rendimiento acústico como la resistencia a la compresión. La investigación adopta un enfoque metodológico que abarca desde la caracterización de los materiales hasta la evaluación del rendimiento en términos de resistencia y atenuación acústica. La originalidad del trabajo radica en el análisis integral de las propiedades físicas y mecánicas de los morteros, centrándose en la eficacia de la sustitución del agregado natural por PET-PCR. Los resultados indican que a medida que aumenta la proporción de PET-PCR en la mezcla, la densidad aparente disminuye, impactando directamente en la resistencia a la compresión. Además, se destaca la mejora en la absorción del sonido en morteros con una mayor sustitución de arena por PET-PCR, evidenciando implicaciones positivas para el rendimiento acústico de estos materiales. Las contribuciones teóricas y metodológicas incluyen una comprensión más profunda de las propiedades de los morteros, mientras que las implicaciones sociales y ambientales residen en la promoción de prácticas sostenibles en la construcción, enfatizando el uso potencial de materiales reciclados.

PALABRAS CLAVE: Atenuación acústica. Ruídos de impacto. Resistencia a la compresión. Morteros para contrapiso.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial das áreas urbanas e a expansão das zonas habitacionais têm intensificado a demanda por soluções construtivas que não apenas proporcionem conforto térmico e estrutural, mas também abordem de maneira efetiva a mitigação dos impactos sonoros presentes em ambientes residenciais. Ruídos de impacto provenientes de atividades cotidianas, como passos, quedas de objetos e movimentação de mobiliário, representam uma fonte expressiva de desconforto acústico em ambientes habitacionais convencionais (MÉNDEZ, 1994).

Nesse contexto, o presente estudo dedica-se de maneira minuciosa à análise da atenuação acústica em ruídos de impacto, incluindo uma investigação de algumas características físicas e mecânicas dos materiais desenvolvidos. O principal enfoque concentra-se nas argamassas destinadas a contrapisos, investigando a possibilidade de substituição parcial de agregado natural por Polietileno Tereftalato Reciclado (PET-PCR).

Em estudos destacados, notamos trabalhos como os de Johnson *et al.* (2018) e Lee e White (2021), que exemplificam pesquisas voltadas para práticas mais eficientes do ponto de vista ambiental no que se refere à utilização de recursos na construção e melhoria acústicas nos ambientes construídos Houcine *et al.* (2023).

Devido a crescente busca por soluções sustentáveis na construção civil ter instigado pesquisas como de Green e Brown (2020) sobre materiais inovadores e práticas ecoeficientes, destacaram a importância da sustentabilidade na construção, a estratégia promissora de substituição parcial de agregados convencionais por materiais reciclados, como o PET-PCR, não só contribui para a redução do impacto ambiental, mas também visa otimizar propriedades específicas do material, destacando-se a atenuação acústica. Essa abordagem oferece benefícios adicionais, elevando a qualidade de vida dos ocupantes de ambientes construídos de maneira convencional.

Apesar de estudos anteriores como de Führt *et al.* (2021) terem examinado a influência de várias composições de argamassas na atenuação acústica, há uma lacuna significativa no entendimento das características específicas associadas à substituição parcial de agregado natural por PET-PCR nesse contexto. Esta ausência de conhecimento a respeito desse tema destaca a urgência e importância da pesquisa atual.

A compreensão aprofundada das propriedades físicas e mecânicas dessas argamassas desempenha um papel crucial na avaliação de sua viabilidade prática. Pesquisas anteriores destacaram a importância de investigar não apenas a eficácia na atenuação acústica, mas também a resistência e outras propriedades mecânicas que exercem influência direta sobre o desempenho e a longevidade das estruturas construídas. Nesse contexto, Mehta e Monteiro (1994) ressaltam há tempos que a propriedade de resistência à compressão desempenha um papel crítico na avaliação do desempenho, da durabilidade e da segurança de materiais cimentícios empregados na construção civil, sendo crucial sua consideração.

Este artigo propõe preencher uma lacuna, oferecendo uma análise abrangente das propriedades físicas e mecânicas das argamassas para contrapiso, com especial destaque para a eficácia da substituição parcial do agregado natural por PET-PCR no que tange ao desempenho acústico ao ruído de impacto e à resistência à compressão nessa aplicação.

A abordagem integrada dessas propriedades almeja não apenas fornecer informações relevantes para a aplicação prática desses materiais, mas também contribuir para o avanço do conhecimento na interseção entre sustentabilidade, desempenho acústico e propriedades físico-mecânicas na construção civil.

Em Monteiro e Veras (2017), destaca-se que as construções sustentáveis devem considerar os princípios ecológicos, visando a utilização eficiente dos recursos empregados em sua construção. Isso implica na redução do consumo, na maximização e reutilização de recursos naturais, e na utilização de materiais provenientes de recicláveis, com o objetivo de proteger o meio ambiente. Com o principal objetivo de fornecer informações fundamentais para a viabilidade técnica em aplicações ecoeficientes, a pesquisa busca contribuir significativamente para os avanços na sustentabilidade no contexto da construção civil de ambientes construtivos modernos.

2 METODOLOGIA

A metodologia proposta neste documento de pesquisa busca abordar de forma abrangente os procedimentos necessários para investigar a influência da substituição parcial de agregado natural por PET-PCR nas propriedades das argamassas para contrapiso. Este processo engloba desde a caracterização dos materiais até a avaliação de desempenho em termos de resistência, densidade e atenuação acústica.

2.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa envolveram a separação, armazenamento e utilização de componentes para a confecção de cinco formulações de argamassas para contrapiso. Seguindo uma referência padrão, essa composição inclui areia natural, cimento CP II E 32 e água. Nas novas formulações, o PET-PCR foi introduzido em substituição parcial do agregado natural. Foram desenvolvidas quatro composições com substituição parcial de areia por PET-PCR, explorando diferentes proporções para investigar os efeitos dessa prática nas argamassas.

Todos os materiais anidros foram obtidos do mesmo lote de fabricação/distribuição, garantindo uniformidade nos ensaios e testes realizados. A água utilizada em todas as amostras provém da mesma fonte fornecedora. Essa abordagem visa assegurar a consistência e comparabilidade dos resultados, uma vez que os materiais-base são provenientes de fontes e lotes idênticos, proporcionando uma base sólida para a pesquisa.

Composição de Referência:

Areia Natural: Utilizada como padrão de referência.

Cimento CP II E 32: Componente padrão para a base da argamassa.

Água: Elemento essencial para a mistura.

Composições com Substituição por PET-PCR:

Foram desenvolvidas quatro composições distintas, cada uma substituindo parcialmente em volume a proporção de areia natural por PET-PCR.

Proporções variáveis de substituição 10%, 20%, 30%, 40% foram aplicadas para investigar diferentes níveis de influência.

2.2 Composições das Argamassas

Serão desenvolvidas cinco formulações de argamassas, cada uma projetada para avaliar diferentes níveis de substituição parcial de areia natural por PET-PCR. A argamassa de referência, também conhecida como argamassa padrão, será formulada sem qualquer substituição. As quatro formulações subsequentes terão substituição parcial de areia natural por 10%, 20%, 30%, e 40% de PET-PCR em volume.

Observa-se na NBR 15116 (2021) que, quando os agregados reciclados são empregados em argamassas de cimento Portland para usos não estruturais, artefatos pré-fabricados sem função estrutural, e argamassa de assentamento, revestimento e contrapiso, é permitido utilizar teores de substituição de até 100% da massa de agregados naturais.

Cada formulação foi meticulosamente misturada para assegurar homogeneidade e consistência adequada. A seleção dessas proporções visa abranger uma gama representativa de substituições parciais, possibilitando uma avaliação abrangente do impacto da presença do PET-PCR nas propriedades das argamassas para contrapiso.

2.3 Granulometria dos Agregados

Os materiais utilizados foram adquiridos e armazenados em quantidade superior à necessária para toda a extensão da pesquisa. A escolha preferencial desses materiais recaiu sobre uma composição com tamanho de granulometria média para agregados, devendo assim apresentar um módulo de finura medido na faixa que compreende 2,2 a 2,9. Sendo a areia adquirida no mês de junho de 2023, do Rio Paraíba do Sul, localizado na cidade de Campos dos Goytacazes – RJ. Já o PET-PCR utilizado nesta pesquisa foi adquirido no mês de março do ano de 2023, é proveniente do estado do Espírito Santo, cedido voluntariamente pelo departamento de Química da UFES, que possui uma planta piloto de reciclagem na referida universidade.

A fim de analisar a distribuição granulométrica da areia e do PET-PCR, foram estritamente seguidos os procedimentos delineados pela norma NBR 17054 (2022). Os materiais, areia e PET-PCR, foram submetidos a um processo controlado de secagem, seguido pela precisa pesagem.

Utilizando peneiras em conformidade com as diretrizes da norma, procedeu-se ao peneiramento dos materiais secos. Diferentes aberturas de malha foram empregadas, incluindo uma peneira de 6,3 mm, estabelecendo assim o tamanho máximo da amostra. Este cuidadoso procedimento assegura a consistência e a confiabilidade dos resultados, atendendo plenamente aos requisitos da norma técnica. A Figura 1 ilustra a infraestrutura utilizada para o procedimento de separação granulométrica. O aparato de infraestrutura consiste em peneiras padronizadas, uma estufa para secagem e uma balança para verificação da massa.

Figura 1 – Peneiras, estufa e balança para separação dos agregados



Fonte: Autores.

2.4 Morfologia dos Agregados

Com o intuito de aprofundar o entendimento da morfologia do material PET-PCR e da areia natural utilizados na pesquisa, foram realizadas análises microscópicas em faixas granulométricas específicas. Essa caracterização visa demonstrar se há variações significativas na forma em que o material se apresenta em relação ao seu tamanho.

Para realizar essa análise, amostras de PET-PCR e areia natural foram preparadas em faixas granulométricas distintas, e a microscopia óptica foi utilizada como ferramenta para a geração de imagens.

O objetivo é apresentar, em uma escala aumentada, a forma e o tamanho observado das partículas típicas desses materiais. Essa abordagem permitirá uma visualização mais detalhada e precisa da morfologia, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada das características físicas desses componentes.

2.5 Densidade das Argamassas

A determinação da densidade das argamassas para contrapiso seguiu métodos apropriados de acordo com as diretrizes da NBR 13280 (2005). Foram moldados seis corpos de prova prismáticos com medidas de 4x4x16 para avaliar a influência da substituição do PET-PCR na propriedade de densidade de massa aparente no estado endurecido de cada um dos traços com substituição por PET, em comparação com o traço de referência (sem substituição). Esse procedimento permitiu uma avaliação robusta e comparativa das densidades resultantes, proporcionando entendimentos significativos sobre o impacto da substituição parcial de agregado natural por PET-PCR.

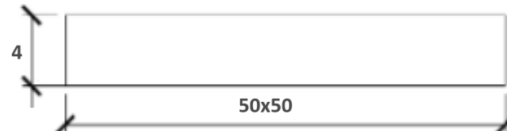
2.6 Resistência à Compressão das Argamassas

A execução dos testes foi conduzida após a avaliação dos corpos de prova utilizados na determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Em seguida, foram realizados ensaios de resistência à compressão para cada composição, conforme as normas técnicas específicas definidas na NBR 13279 (2005). Nesse processo, foi avaliada a força máxima suportada pelas amostras, proporcionando uma análise precisa da capacidade resistente das argamassas desenvolvidas. Os resultados são analisados de modo a expressar a comparação entre os elementos avaliados, sem estabelecer avaliações absolutas dos materiais, mas sim uma relação de desempenho entre as amostras das formulações estudadas.

2.7 Desempenho Acústico para Ruídos de Impacto

A fim de realizar os ensaios, foram utilizados a Câmara Universal de Testes Acústicos (CUTA) e a Máquina de Impactos (*Tapping Machine* - TM). A CUTA oferece um ambiente anecoico controlado para a realização dos testes acústicos, enquanto a TM é empregada como fonte geradora de ruídos padronizados para aplicação nas amostras de contrapiso com as medidas de 50x50x4 cm, conforme pode ser visualizado na Figura 2. Esse procedimento envolve o uso de equipamentos apropriados para garantir a precisão e consistência dos resultados.

Figura 2 – Detalhamento das amostras de contrapiso



Fonte: Autores.

Durante os ensaios, ruídos de impacto são aplicados de forma controlada sobre as amostras, seguidos pela medição das taxas de atenuação acústica. Esse processo possibilita uma avaliação detalhada do desempenho acústico das argamassas, fornecendo informações essenciais sobre sua eficácia na redução de ruídos de impacto em condições simuladas.

2.8 Estatística e Interpretação

A análise estatística dos resultados será conduzida, abrangendo médias, desvios-padrão e análise de variância. Esse processo visa identificar diferenças significativas entre as diversas composições desenvolvidas. Será realizada uma comparação minuciosa dos dados obtidos com as normas e padrões relevantes na área da construção civil.

A análise da influência da substituição parcial de agregado natural por PET-PCR nas propriedades físicas, mecânicas e no desempenho acústico das argamassas constitui uma fase essencial da pesquisa. Além da análise estatística, esta etapa da pesquisa inclui a avaliação de tendências ou padrões identificados nos dados estatísticos. Adicionalmente, é realizada uma discussão sobre possíveis melhorias ou ajustes com base nos resultados obtidos.

Esta seção da pesquisa vai além da mera apresentação de dados numéricos, buscando situar os resultados no contexto normativo da construção civil. A condução de uma discussão aprofundada propicia uma compreensão mais abrangente dos efeitos da substituição parcial de agregado natural por PET-PCR nas características das argamassas. Essa abordagem não apenas enriquece a interpretação dos resultados, mas também oferece uma contribuição substancial para o avanço do conhecimento nessa área específica.

Ao integrar a análise técnica com considerações normativas, esta pesquisa visa não apenas informar, mas também influenciar positivamente as práticas e padrões na construção civil, promovendo soluções ecoeficientes e sustentáveis.

3 RESULTADOS

Esta seção do documento tem como propósito oferecer uma análise completa e clara dos procedimentos adotados para os resultados obtidos. Isso inclui a conexão dos dados com os objetivos da pesquisa, contribuindo para uma compreensão abrangente dos efeitos da substituição parcial de agregado natural por PET-PCR nas propriedades das argamassas.

3.1 Caracterização Granulométrica dos Agregados

Para caracterização dos materiais, são inicialmente coletadas amostras representativas de areia natural e PET-PCR. Em seguida, é conduzida a análise granulométrica conforme as diretrizes estabelecidas pela norma técnica NBR 17054 (2022). Este procedimento tem como finalidade avaliar a distribuição de tamanhos de partículas característicos de cada agregado presente nas misturas.

A coleta de dados granulométricos é crucial para compreender a composição granular dos materiais, desempenhando um papel fundamental na definição precisa das proporções nas misturas de argamassas para conhecer seus efeitos no estado fresco e endurecido (CINCOTTO *et al.*, 2018). A adesão estrita à norma técnica assegura a padronização e confiabilidade dos resultados, estabelecendo uma base consistente para a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa.

A Tabela 1 exibe os dados da distribuição granulométrica dos materiais utilizados na pesquisa, nomeadamente o PET-PCR e a areia. É possível observar que os módulos de finura encontrados nas distribuições estão em conformidade com o desejado, ou seja, correspondem a uma classificação de agregados no tamanho de areia média dos elementos típicos.

Tabela 1 – Planilha de distribuição granulométrica do PET-PCR e da areia

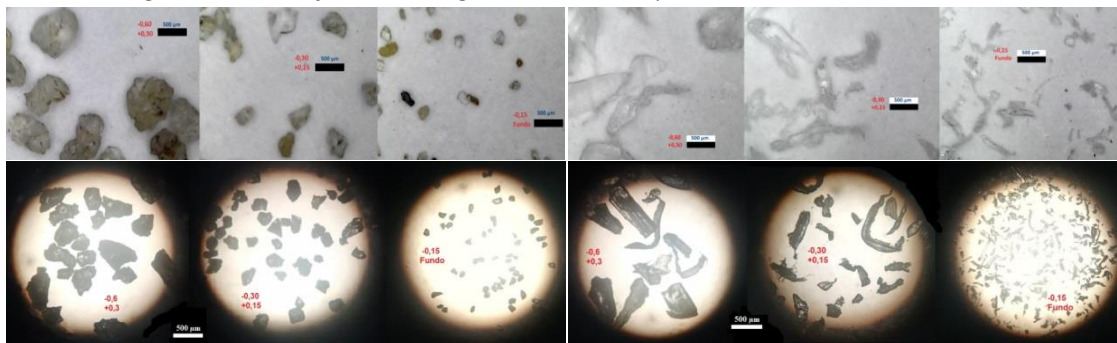
Material: PET-PCR								Material: Areia									
Massa Inicial M1 (g): 506,5								Massa Inicial M1 (g): 654,1									
Data: 12/05/2023								Data: 01/08/2023									
Massa Inicial M2 (g): 288,6								Massa Inicial M2 (g): 351,6									
Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Massa Retida (%)		Variação (%)	Média (%)	Acumulada (%)	Passada (%)	Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		Massa Retida (%)		Variação (%)	Média (%)	Acumulada (%)	Passada (%)
	m1	m2	m1	m2						m1	m2	m1	m2				
4,75	2,8	0	0,55	0,00	0,55	0,28	0,28	99,72	4,75	4,4	2,5	0,67	0,71	-0,04	0,69	0,69	99,31
2,36	6,5	0	1,28	0,00	1,28	0,64	0,92	99,08	2,36	16,5	7,3	2,52	2,08	0,45	2,30	2,99	97,01
1,18	329,2	0	65,00	0,00	65,00	32,50	33,42	66,58	1,18	78,8	22,1	12,05	6,29	5,76	9,17	12,16	87,84
0,60	121,3	45,4	23,95	15,73	8,22	19,84	53,26	46,74	0,60	214,1	100,1	32,73	28,47	4,26	30,60	42,76	57,24
0,30	37,4	72,5	7,38	25,12	-17,74	16,25	69,51	30,49	0,30	231,7	150,5	35,42	42,80	-7,38	39,11	81,87	18,13
0,15	7,9	82,8	1,56	28,69	-27,13	15,12	84,63	15,37	0,15	100,4	64,4	15,35	18,32	-2,97	16,83	98,70	1,30
Fundo	1,4	87,9	0,28	30,46	-30,18	15,37	100,00	0,00	Fundo	8,2	4,7	1,25	1,34	-0,08	1,30	100,00	0,00
Diâmetro Máximo: 2,4 mm								Diâmetro Máximo: 6,3									
Módulo de Finura (MF): 2,42								Módulo de Finura (MF): 2,39									

Fonte: Autores.

3.2 Caracterização Morfológica dos Agregados

Na Figura 3, é possível visualizar microscopicamente uma pequena amostra dos elementos típicos encontrados nos agregados de areia e PET-PCR. Esses elementos foram separados em faixas granulométricas distintas e submetidos ao microscópio digital e óptico para a geração das imagens.

Figura 3 – Visualização da morfologia dos elementos típicos da areia natural e do PET-PCR.



Fonte: Autores.

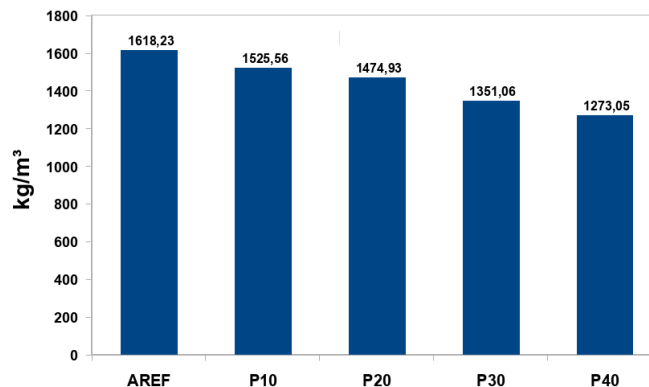
Em Mehta e Monteiro (1994), observa-se que grãos com morfologia lamelar e alongada, como os encontrados nos elementos de PET-PCR, conforme mostrado na figura, possuem uma área específica volumétrica maior do que as partículas esféricas características das partículas de areia, também expostas na figura. Isso resulta no preenchimento irregular da argamassa, aumentando a porosidade do material (MELO, 2004).

3.3 Densidade de massa aparente

Na avaliação da influência da substituição do PET na densidade da argamassa, foram conduzidos ensaios para determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, seguindo as diretrizes da NBR 13280 (2005). Para realizar essa análise, foram confeccionados 6 corpos de prova para cada um dos traços, incluindo o traço de referência, nos quais houve substituição por PET-PCR.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios após 28 dias de cura, nos quais os prismas utilizados foram destinados posteriormente aos ensaios de compressão. Esses ensaios consistem basicamente na medição dos valores de altura (h), largura (l) e comprimento (c), realizados com um paquímetro em centímetros. Além disso, as massas respectivas (Mcp) foram medidas em gramas usando uma balança. Para determinar a densidade de massa aparente no estado endurecido (D), em kg/m³, é estabelecida a relação média simples entre a massa e o volume dos corpos de prova.

Figura 4 – Gráfico de Densidade de massa aparente no estado endurecido.



Fonte: Autores.

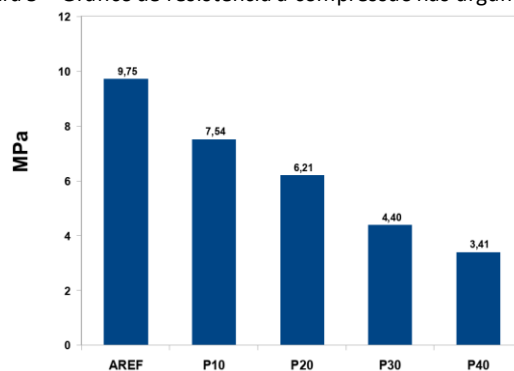
Na devida interpretação comparativa dos dados da Figura 4, observa-se claramente uma relação de redução na densidade de massa aparente, conforme aumenta a proporção de PET-PCR na mistura, em comparação com a argamassa de referência.

3.4 Testes de Resistência à Compressão das Argamassas

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados no aparato prensa EMIC DL2000, utilizando corpos de prova provenientes de 6 amostras distintas para cada mistura, originados das medições de densidade. Para a realização do experimento, o procedimento adotado seguiu as recomendações estabelecidas na NBR 13279 (2005).

A Figura 5 apresenta visualmente os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão realizados na pesquisa. Observa-se nessa figura que a resistência à compressão diminui nas argamassas com substituição de areia por PET-PCR em comparação à argamassa de referência. Este decréscimo é mais pronunciado à medida que a proporção de PET-PCR na composição da mistura aumenta. Em resumo, podemos verificar que quanto maior a quantidade de PET-PCR introduzida na formulação, menor é a resistência encontrada.

Figura 5 – Gráfico de resistência à compressão nas argamassas



Fonte: Autores.

3.5 Ensaios Acústicos aos Ruídos de Impacto

Os resultados dos ensaios conduzidos para determinar os índices de redução sonora por faixas de frequência, assim como o valor ponderado para cada uma das amostras em relação aos ruídos de impacto nas composições de argamassas destinadas ao contrapiso e investigadas nesta pesquisa, podem ser visualmente identificados pela coleta de dados do microfone da câmara universal de testes acústicos.

Esses dados são adquiridos por meio do *software Realtime Analyzing*, integrado ao dispositivo, e após a captura, é retirada a média em um intervalo já estabilizado de medição. Os resultados estão minuciosamente apresentados na Tabela 2.

Os dados apresentados na Tabela 2 são expressos em termos de transmissão, evidenciando que valores mais baixos correspondem a uma maior atenuação (absorção) do ruído medido em relação ao isolamento da fonte geradora.

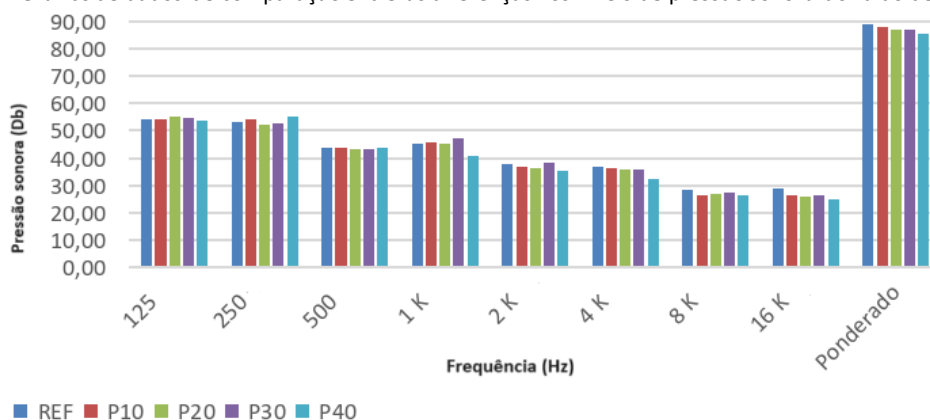
Tabela 2 – Dados de comparação entre as diferenças nos níveis de pressão sonora ao ruído de impacto

Frequências	Ruído de Impacto Transmitido com Tapping Machine				
	REF	P10	P20	P30	AP40
125 Hz	53,97	54,34	54,97	54,63	53,89
250 Hz	53,26	53,95	52,35	52,86	54,98
500 Hz	43,64	43,56	43,20	43,32	44,00
1 K Hz	45,09	45,57	45,43	47,25	40,72
2 K Hz	37,65	36,91	36,47	38,48	35,42
4 K Hz	36,64	36,20	35,69	35,75	32,27
8 K Hz	28,28	26,69	26,96	27,25	26,41
16 K Hz	28,72	26,33	26,14	26,25	24,87
Ponderado	89,08	87,76	86,89	86,65	85,46

Fonte: Autores.

Ao analisar as frequências capturadas na pesquisa, com uma variação em oitavas de 125Hz até 16kHz, estabelecida como fundamentais e dentro do espectro audível, podemos classificar as frequências das ondas estudadas em graves (correspondendo às frequências de 125Hz até 500Hz), médias (de 1kHz até 4kHz) e agudas (de 8kHz até 16kHz) dentro das oitavas utilizadas no estudo. Essas definições são estabelecidas tomando a mistura de referência como padrão, conforme exposto na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de dados de comparação entre as diferenças nos níveis de pressão sonora ao ruído de impacto



Fonte: Autores.

Destaca-se que, na maioria das faixas de frequências, os resultados mais promissores foram alcançados nas argamassas com uma maior proporção de substituição de areia por PET-PCR. Isso evidencia uma notável melhoria na absorção sonora em relação ao ruído de impacto nos materiais que contêm uma maior quantidade do material PET-PCR, corroborando achados em pesquisas semelhantes (FÜHR *et al.*, 2021).

Verifica-se que, no método ponderado, os resultados de desempenho foram os seguintes: a argamassa P40 apresentou atenuação superior a 3 dB em relação à referência, enquanto P30 e P20 apresentaram atenuação um pouco maior que 2 dB, e P10 teve atenuação maior que 1 dB. Na análise de desempenho por frequência, observa-se uma semelhança nos resultados obtidos, com pequenas distorções.

4 CONCLUSÕES

Os dados da distribuição granulométrica, apresentados na Tabela 1, oferecem uma visualização clara e detalhada das características dos materiais utilizados na pesquisa. Essa análise é crucial para compreender a composição granular dos materiais, desempenhando um papel fundamental na definição precisa das proporções nas misturas (CINCOTTO *et al.*, 2018). O cuidado na condução desses procedimentos contribuiu significativamente para a validade e confiabilidade dos dados obtidos.

A análise morfológica dos agregados desempenha um papel crucial na compreensão das características físicas desses materiais (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Na Figura 3, apresentamos uma visualização microscópica reveladora dos elementos típicos encontrados tanto na areia natural quanto no PET-PCR, após o processo de separação em faixas granulométricas distintas. Essa análise revelou elementos com características lamelares e alongadas, resultado do processo de trituração.

A observação microscópica oferece informes valiosos sobre a forma e a estrutura das partículas presentes nos agregados. A morfologia da areia natural e do PET-PCR é essencial para entender como esses materiais se comportarão nas misturas de argamassa. A diversidade na forma das partículas, como destacado na Figura 4, influencia diretamente propriedades como a compactação, a aderência e a resistência das argamassas resultantes (MELO, 2004).

A avaliação da densidade de massa aparente no estado endurecido, considerando a substituição parcial de areia por PET-PCR nas argamassas, revela tendências significativas que influenciam diretamente nas propriedades físicas dos materiais. Os ensaios, conduzidos conforme as diretrizes rigorosas da NBR 13280 (2005), proporcionaram dados claros e elucidativos, conforme representado na Figura 4.

A análise dos resultados indica uma relação evidente de redução na densidade de massa aparente à medida que aumenta a proporção de PET-PCR na mistura em comparação com a argamassa de referência. Essa diminuição é consistente com as expectativas, uma vez que o PET-PCR possui uma densidade inferior em comparação com a areia natural. A natureza porosa e a leveza do PET-PCR contribuem para uma diminuição global na densidade das argamassas. Os resultados demonstram similaridades com outras pesquisas, no qual foram investigadas propriedades dos materiais com adição de materiais reciclados e identificaram um potencial impacto no aumento da porosidade como visto em Smith *et al.* (2019).

Essa redução na densidade de massa aparente não apenas reflete a introdução de um material mais leve na composição, mas também sugere alterações nas características de compactação e na distribuição de partículas dentro das misturas. A compreensão dessas variações na densidade é crucial para avaliar a adequação das argamassas para diferentes aplicações na construção civil.

A análise dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial proporciona uma compreensão clara do impacto da substituição de areia por PET-PCR nas propriedades mecânicas das argamassas. Os testes, conduzidos rigorosamente de acordo com as diretrizes estabelecidas pela NBR 13279 (2005), geraram dados representados na Figura 5.

Os resultados evidenciam uma tendência consistente de redução na resistência à compressão à medida que a proporção de PET-PCR na mistura aumenta em comparação com a argamassa de referência. Esse decréscimo na resistência é mais acentuado à medida que a

quantidade de PET-PCR aumenta, indicando uma relação direta entre a presença desse material e a diminuição da capacidade de suportar cargas compressivas.

A diminuição na resistência à compressão pode ser atribuída às características intrínsecas do PET-PCR como sugere Canellas (2005), que, embora ofereçam benefícios ambientais pela reciclagem, podem comprometer a integridade mecânica da argamassa. A natureza mais leve e porosa do PET-PCR pode resultar em uma distribuição menos eficiente das forças de compressão, levando a uma capacidade reduzida de carga.

É essencial destacar que, apesar dessa redução na resistência à compressão, as argamassas ainda atendem aos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis. Isso sugere que, mesmo com a substituição de até determinada proporção de areia por PET-PCR, as argamassas mantêm uma adequação aceitável para diversas aplicações na construção civil.

Essa compreensão das mudanças na resistência à compressão fornece informações cruciais para a avaliação do desempenho mecânico das argamassas, informando sobre as limitações e possíveis aplicações específicas em projetos de construção (MENDONÇA *et al.*, 2021).

Na avaliação da capacidade de absorção de ruídos de impacto nas argamassas, destinadas a contrapiso, revelou resultados significativos que podem influenciar as escolhas em projetos arquitetônicos. Os ensaios, conduzidos com base em uma ampla faixa de frequências (125Hz a 16kHz), forneceram dados detalhados expressos na Tabela 2.

Ao analisar os resultados, observa-se uma tendência clara de melhoria na atenuação do ruído de impacto à medida que a proporção de substituição de areia por PET-PCR aumenta. Os melhores desempenhos foram registrados nas argamassas com maior quantidade de PET-PCR, indicando um potencial promissor desse material na redução da transmissão de ruídos.

Destaca-se que, no método ponderado, a argamassa P40 apresentou uma notável atenuação superior a 3 dB em relação à argamassa de referência. As misturas P30, P20 e P10 também demonstraram melhorias consideráveis, com atenuações proporcionais às proporções de PET-PCR adicionadas.

A análise individual por frequência corroborou com esses resultados, indicando consistência no desempenho das argamassas em diferentes faixas de frequências. Especificamente, as frequências consideradas médias e agudas apresentaram melhorias proporcionais à quantidade de PET-PCR adicionada, consolidando a eficácia desse material na absorção de ruídos em diversas faixas sonoras com o comportamento típico de materiais porosos conforme descrito por Brandão (2016).

Essas descobertas sugerem que a introdução de PET-PCR nas argamassas não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental (LAMBA *et al.*, 2021), mas também oferece benefícios acústicos, melhorando a eficiência na redução de ruídos de impacto em ambientes construídos. Isso pode ter implicações positivas na qualidade do conforto acústico em edificações, proporcionando ambientes mais tranquilos e agradáveis, pois o uso de materiais adequados deve garantir os requisitos necessários para um conforto dos usuários dos sistemas construtivos (MAEKAWA *et al.*, 2011).

REFERÊNCIAS

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.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15116. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022

BRANDÃO, E. **Acústica de salas**. São Paulo: Edgard Blucher, 2016

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**. 78p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CINCOTTO, M. A. *et al.*. Composições granulométricas de argamassas e seus efeitos no estado fresco e endurecido. 2012, **Anais..** Coimbra: APFAC, 2012.

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.

GREEN, A.; BROWN, B. **Environmental Impact of Building Materials**. Springer, 2020.

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

JOHNSON, M. A. *et al.* **Utilization of Recycled Plastics in Concrete: A Review**. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, vol. 7, nº 1, 2018.

LAMBA P.; KAUR D. P.; RAJ S.; SOROUT J. **Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review**. Environmental Science and Pollution Research 2021 <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16980-y>.

LEE, S.; WHITE, D. **Recycled Plastic Aggregates in Mortar: Effects of Aggregate Surface Modification**. Construction and Building Materials, vol. 304, 2021.

MÉNDEZ, A. M. *et al.* **Acústica arquitectônica**. Buenos Aires: UMSA, 1994

MENDONÇA A. M. G. D, ALMEIDA S. P.; RODRIGUES J. K. G; COUTINHO Y; NETO O. M. M; GUERRA T. D.; LUZ P. M. S. G. Evaluation of Concrete with Addition of Micronized Polyethylene Terephthalate for Application as Interlocking Concrete Blocks. **Arabian Journal for Science and Engineering** 2022

MAEKAWA, Z.; RINDEL, J. H.; LORD, P. **Environmental and Architectural Acoustics**. 2nd .ed. New York: Taylor & Francis Group, 2011.

MELO. J. W., **Produção e caracterização de pó de PET – Poli(Tereftalato de etileno), obtido a partir de garrafas pós-consumo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Belo Horizonte – MG, REDEMAT (UFOP – CETC – UEMG), 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994, 573p.

Monteiro A. R. e Veras A. T. R. **A questão habitacional no Brasil**. Mercator, Fortaleza, v. 16, e16015, 2017 <https://doi.org/10.4215/RM2017.E16015>

SMITH, J. *et al.* **Sustainable Construction Materials: Advances in Research and Applications**. Publisher, 2019.