PET PÓS-CONSUMO RECICLADO MICRONIZADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO AREIA NATURAL COM POTENCIAL PARA ISOLAMENTO TERMOACÚSTICO EM ARGAMASSA PARA CONTRAPISO

Raul de Souza Brandão, IFES, raul.brandao@ifes.edu.br
Jonas Alexandre, UENF, jonas@uenf.edu.br

Resumo
A sustentabilidade através de aproveitamento de resíduos sólidos e redução do consumo energético devido à possível melhoria do desempenho térmico e acústico de edificações é o que tange este trabalho. Visando apresentar um estudo para desenvolver argamassa com características adequadas à aplicação real, bem como, com propriedades isolantes termoacústicas melhoradas em relação a uma matriz de referência. O objetivo do estudo é demonstrar um programa experimental que avaliará três dosagens de argamassa como substituição parcial do agregado areia por resíduo de Polietileno tereftalato pós-consumo reciclado (PET-PCR) de forma micronizada em comparação a uma dosagem de referência. Nesse contexto são apresentadas as informações relacionadas aos ensaios tecnológicos que visam classificar a argamassa e demonstrar as suas características físicas e mecânicas. Serão apresentadas informações dos ensaios das argamassas no estado fresco e endurecido e uma proposta de estudo da influência no desempenho termoacústico no sistema. Os resultados dos ensaios tecnológicos visam demonstrar potencial em desenvolver argamassas termoacústicas com utilização desses resíduos provenientes do PET-PCR micronizado para aplicação em sistemas de contrapiso, de forma que a substituição parcial de agregado natural areia seja verificada como um produto de melhoria significativa nos valores de condutividade termoacústica em relação ao padrão de referência normatizado.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Argamassa; Contrapiso; PET-PCR; Termoacústico.

1. Introdução

Buscar um novo produto capaz de promover devida melhoria no isolamento termoacústico em ambientes habitacionais com manutenção das capacidades mecânicas, possivelmente com custo acessível comercialmente e de forma ecologicamente sustentável é bastante fundamental, isso se torna evidente a crescente escassez e dependência por determinados recursos naturais tradicionalmente empregados na construção civil (LAMBA, *et al.* 2021).

Assim, pesquisas inovadoras que buscam materiais e técnicas alternativas, que tendem a serem cada vez menos agressivas ao meio ambiente e que possuam maior eficiência energética nas aplicações são estimuladas. Notoriamente o plástico é um material que tem grande potencial alternativo em aplicações da construção civil, isso devido ao seu grande consumo na sociedade moderna, promovendo significativamente grande quantidade de resíduos sólidos.

Vejamos também que os benefícios do plástico são inegáveis em ralação ao seu consumo, pois o material é relativamente barato, leve e fácil fabricação. Qualidades essas que leva-

ram a um boom na produção ao longo do século passado e continuará à medida que a produção global de plástico se manter em expansão (SINGLE, 2018).

No que tange ao objetivo desse trabalho, o intuito é apresentar formulação de um novo produto de forma a proporcionar uma revalorização de matéria prima originada de rejeitos urbanos, mais especificamente o PET-PCR de forma micronizada, com devida viabilidade técnica para aplicação em contrapiso, com possibilidade econômica, com benefícios ecológicos e com potencial desempenho termoacústico melhorado.

Diversos compósitos que utilizam rejeitos provenientes de vários ramos industriais têm merecido atenção de pesquisadores na busca de propor alternativas aos métodos já conhecidos e que possam promover resistência mecânica satisfatória e conforto termoacústico superado em relação a métodos referência, isto é observado nos trabalhos de Brancher, *et al.* (2016), Herrero, *et al.*(2013), Botelho (2020) entre outros.

A presente pesquisa deseja ampliar os conhecimentos destinados à busca pela redução de custos destinados aplicações com propriedades melhoradas na produção civil, sendo destaque o passivo ambiental deixado pelo lixo urbano oriundos do plástico, mais especificamente o PET-PCR (MUSHTAQ et, al. 2022).

2. Fundamentação teórica

A fundamentação teórica deve, dentro do possível, privilegiar o estado da arte. É desejável a utilização de referências atuais extraídas de fontes qualificadas.

Serão apresentados artigos relativos aos temas utilizados nessa pesquisa, afim de, demonstrar sua relevância na revisão da literatura para esse estudo. Serão apresentadas abaixo publicações indexadas para os principais temas abordados na pesquisa além de uma pesquisa da relevância do tema sustentabilidade e da correlação bibliométrica com tema agregados reciclados.

Fora utilizada a plataforma Dimensions, como base de dados para essas consultas. Sendo essa plataforma uma base de dados de pesquisa, essa plataforma fora lançada em 2018 com intuito de fornecer uma visão mais ampla de todo o ciclo de vida das pesquisas, além das publicações e citações. Vejamos então na tabela 1 algumas das pesquisas que se relacionam com esse estudo e são indexadas em consultas relativas a itens relevantes ao projeto, de modo a demonstrar uma pesquisa cientifica e também normativas recentes ao tema.

Tabela 1 – Pesquisa de trabalhos relacionados ao estudo.

Autor/Ano	Título	Local	Materiais	Objetivo
ABNT NBR 15116 2021	Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios	Brasil	Cimento e agregados reciclados	Referência normativa
Ajam *et al.* 2021	Valorisation of face mask waste in mortar	Tunísia	Cimento, areia e resíduos de máscara	Valorização de resíduo
Brancher *et*	Acoustic Behavior of Subfloor Light-weight Mortars Containing Micronized	Brasil	Cimento, areia e	Comportamento

al. 2016	Poly (Ethylene Vinyl Acetate) (EVA)		resíduos de EVA	acústico
Botelho 2020	Avaliação acústica e mecânica de argamassas com pó de borracha proveniente de pneus inservíveis para uso em contrapiso.	Brasil	Cimento, areia e borracha	Avaliação acústica de contrapiso
Campanhão *et al,* 2021	Recycled PET Sand for Cementitious Mortar	Brasil	Cimento, areia e PET	Formulação de argamassa
da Silva *et al.* 2021	Application of Plastic Wastes in Construction Materials: A Review Using the Concept of Life-Cycle Assessment in the Context of Recent Research for Future Perspectives	Brasil	Resíduos de plástico	Revisão de aplicação de resíduos de plástico em materiais de construção
Debska e Silva 2021	Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Mortars Made with Polyethylene and Poly(Ethylene Terephthalate) Waste	Polônia	Resina epóxi, areia e resíduos de PET e PP	Propriedades mecânicas e microestrutura
Herrero *et al.* 2013	Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster–rubber mortars	Espanha	Cimento, borracha e gesso	Propriedades mecânicas, térmicas e acústicas
Kocot *et al.* 2021	Strength Characteristics of Alkali-Activated Slag Mortars with the Addition of PET Flakes	Polônia	Cimento, areia aditivo e resíduos de PET	Formulação de compósito
Lamba *et al.* 2021	Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review	Índia	Plásticos	Revisão de reutilização de resíduos plásticos como material de construção
Machimbarrena e Rasmussen 2016	Comparison of acoustic regulations for housing and schools in selected countries in Europe and South America – A pilot study	Argentina	Documentação	Legislação e regulamentações
Marvila *et al.* 2022	Recycled Aggregate: A Viable Solution for Sustainable Concrete Production	Brasil	Agregados reciclados	Revisão do uso de agregados reciclados para concreto, desafios e perspectivas
Mendonça *et al.* 2021	Evaluation of Concrete with Addition of Micronized Polyethylene Terephthalate for Application as Interlocking Concrete Blocks	Brasil	Cimento, areia e PET	Ensaios tecnológicos para viabilidade de aplicação do resíduo
Mushtaq *et al.*	Performance Optimization Approach of Polymer Modified Asphalt Mixtures	China	Betume, PET e PP	Economia circular sustentável

2022	with PET and PE Wastes: A Safety Study for Utilizing Eco-Friendly Circular Economy-Based SDGs Concepts			
Nikolaivits *et al.* 2021	Progressing Plastics Circularity: A Review of Mechano-Biocatalytic Approaches for Waste Plastic (Re)valorization	Grécia	Plásticos	Revalorização de resíduos
Phutthimethakul e Supakata 2022	Partial Replacement of Municipal Incinerated Bottom Ash and PET Pellets as Fine Aggregate in Cement Mortars	Tailândia	Cimento, areia, resíduos de PET, cinzas de fundo e volante	Formulação de argamassa
Poonyakan *et al.* 2018	Potential Use of Plastic Wastes for Low Thermal Conductivity Concrete	Tailândia	Cimento, areia e resíduos de plásticos (HDPE, LDPE, PP E PET)	Condutividade térmica
Purchase *et al.* 2022	Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits.	Nova Zelândia	Resíduos de construção	Revisão de literatura sobre desafios e benefícios da economia circular na construção
Salas *et al.* 2020	Analysis and Economic Evaluation of the Use of Recycled Polyamide Powder in Masonry Mortars	Espanha	Cimento e poliamida reciclada	Análise econômica de argamassa
Silva *et al.* 2021	Technological Characterization of PET—Polyethylene Terephthalate—Added Soil-Cement Bricks	Brasil	Cimento, solo argiloso e resíduos de PET	Caracterização tecnológica
Tani *et al.* 2018	Prediction models of mechanical properties for pet-mortar composite in sodium sulphateaggressive mediums	Algeria	Cimento, areia, resíduos de PET	Durabilidade de compósitos

ABNT NBR 15116 (2021) especifica os requisitos para produção e recepção dos agregados reciclados, obtidos a partir do beneficiamento de resíduos da construção civil classe, incluindo misturas de agregados naturais e reciclados, para argamassas e concretos de cimento, esta normativa também estabelece os métodos de ensaios para verificação dos requisitos estabelecidos para os agregados reciclados, bem como apresenta diretrizes para o uso desses materiais.

Ajam et, al. (2021) utilizou-se resíduos de mascaras com intuito de revalorizar uma matéria prima destinada ao descarte em misturas de argamassa, sendo que neste trabalho, é explorado o efeito de substituição de 1 a 5% do volume da argamassa por pedaços de máscaras de 2 cm2 e seção de 4 cm2, onde mecanicamente, nota-se um aumento da força de compressão entre 10 e 20%, bem como uma melhora na força flexão de 19-30%.

Brancher et, al. (2016) verificou o comportamento acústico de argamassas leves para aplicação de contrapiso com utilização de EVA em sua composição. O trabalho teve o intuito

de contribuir para o conforto acústico em edificações apresentando um estudo sobre o resíduo EVA micronizado para uso em argamassas de impacto isolamento acústico em sistemas de contrapiso.

Botelho (2020) avaliou o desempenho acústico de sistema de contrapiso através da substituição de areia natural por pó de borracha de pneus inservíveis.

Campanhão et, al. (2021) avaliou a substituição de areia natural por areia de PET, sendo explorado a proporção de substituição em níveis de 10%, 20% e 30%, para tal foram realizados foram realizados ensaios tecnológicos no estado fresco da argamassa através medição da consistência, retenção de ar, densidade e ar incorporado e no estado endurecido a resistência à compressão, resistência à flexão, densidade, capilaridade e absorção de água.

Da Silva et, al. (2021) apresentam uma revisão da aplicação de resíduos de plásticos para aplicações como materiais de construção, através do conceito de avaliação do ciclo de vida, no estudo é apresentado um sistema circular de produtos plásticos com sustentabilidade e inteligência em sua gestão.

Debska e Silva (2021) descreve os resultados de um estudo para determinar o efeito simultâneo dos resíduos de polietileno tereftalato (PET) e polietileno (PE) sobre as características de resistência e densidade em massa de argamassas epóxi.

Herrero et, al. (2013) apresenta os principais resultados experimentais obtidos a partir do estudo de peças de teste de gesso e placas com adição de várias frações de borracha a partir da moagem mecânica de pneus de fim de vida (inservíveis), em três gradações de tamanho de partícula diferente, afim de analisar as propriedades físicas e mecânicas, bem como as propriedades de condutividade térmica e isolamento acústico em argamassas.

Kocot et, al. (2021) apresenta em sua pesquisa um estudo para criação de compostos de escória ativados por alcalinos com a adição de flocos PET como um substituto parcial (5%) para agregado natural.

Lamba et, al. (2021) apresenta os dados relativos ao aumento exponencial da produção de plástico e o consequente aumento dos resíduos plásticos, que levaram os cientistas e pesquisadores a procurar meios inovadores e sustentáveis para reutilizar/reciclar os resíduos plásticos, a fim de reduzir seu impacto negativo no meio ambiente.

Machimbarrena e Rasmussen (2016) apresentam estudos comparativos que demonstram a alta diversidade entre os limites normativos relativos ao índice de sonoridade em países da Europa e América do Sul no que tange aplicações em ambientes residenciais e escolares.

Marvila et, al. (2022) revisam o uso do agregados reciclados para a produção de concreto e traçam os principais desafios e perspectivas, são demonstrados eu os agregados reciclados reduzem o desempenho do concreto fresco e endurecido em comparação com agregado natural, porém destaca que essas reduções são muitas vezes insignificantes quando os níveis de substituição são mantidos em até 30%.

Mendonça et, al. (2021) são realizados diversos ensaios tecnológicos afim de avaliar aplicação de PET micronizado em elementos de concreto para pavimentação, nesse estudo destacasse a utilização de PET como mais uma alternativa na construção civil de modo a permitir um descarte adequado para esse tipo de resíduo.

Mushtaq et, al. (2022) demonstra que a utilização ecológica de resíduos ajuda no desenvolvimento de infraestruturas sustentáveis, visto que atualmente os pesquisadores se enfatizam na produção de infraestruturas rodoviárias utilizando o conceito de economia circular de segurança humana.

Nicolaivits et, al. (2021) apresenta uma revisão que envolve os desafios globais sobre a revalorização de resíduos de plástico, de modo a promover um caminho para sustentabilidade na economia circular do material.

Phutthimethakul e Supakata (2022) examinam a razão de mistura ideal de cinzas de fundo incinerada municipal e de PET utilizadas como substituição parcial de agregados finos na fabricação de argamassas de cimento.

Poonyakan et, al. (2018) verificaram que que a porosidade aumenta com maior volume de fibras plásticas no concreto, porém diminui a trabalhabilidade, informa como positiva a aplicação devido as propriedades benéficas do plástico reciclado, que são: leve peso, alta resistência química, durabilidade climática e alto isolamento térmico.

Purchase et, al. (2022) demonstram uma revisão de literatura que buscou apresentar as lições, os desafios e os benefícios relacionados a economia circular da construção civil, foi considerado que na economia linear os materiais residuais possuem valor zero, assim possibilitando entender que a implementação da economia circular promove um modelo potencialmente capaz de minimizar o impacto negativo dos desperdícios gerados pelos rejeitos de construção e demolição.

Salas et, al. (2020) identifica em sua pesquisa que devido à quantidade considerável de resíduos plásticos e polímeros que são produzidos anualmente, a introdução desses resíduos em materiais de construção está se tornando uma solução recorrente para reciclá-los, sendo que neste estudo, argamassas sustentáveis e leves foram projetadas e elaboradas, com intuito de substituir os agregados por resíduos de pó de poliamida

Silva et, al. (2021) propõem uma solução ecológica para a enorme quantidade de resíduos descartados PET por adição em tijolos de cimento do solo, através de caracterização tecnológica do PET.

Tani et, al. (2018) demonstra uma investigação sobre o efeito do ataque de sulfato de sódio à durabilidade dos compósitos produzidos com resíduos de PET.

2.1 Sustentabilidade

Nos últimos anos, as questões ambientais estão gerando grandes mudanças na sociedade, seja economicamente ou produtivamente, algo que fortalece a conscientização ecológica por toda comunidade, seja acadêmica, empresarial e também a população de forma geral, com intuito de desenvolver um mundo melhor, através de uma busca de gestão integrada e com responsabilidade social com os diversos setores que participam de ações de proteção contra os problemas ambientais e suas implicações pertinentes. (GRANZOTTO e PRETTO, 2012).

Foi realizada uma consulta, na plataforma Dimensions, no período compreendido entre 2000 e 2022 (abril), sendo verifica a ocorrência da palavra Sustentabilidade em publicações desse período da consulta. Sendo então detectado o número de publicações que contivessem a

palavra pesquisada. Optou-se por pesquisar a palavra "sustentabilidade" em português, por apresentar uma massa consideravelmente importante em língua portuguesa em relação ao número de registros. A Figura 1 a seguir, mostra os resultados obtidos na consulta para a palavra Sustentabilidade.

PUBLICATION YEAR **Tema:** Sustentabilidade

2022	1,247	2012	3,147	2002	365	1992	8
2021	8,416	2011	2,529	2001	270	1991	1
2020	8,798	2010	2,329	2000	210	1990	1
2019	8,380	2009	1,990	1999	122	1981	1
2018	7,828	2008	1,653	1998	78	1980	1
2017	6,493	2007	1,416	1997	66	1979	7
2016	6,022	2006	959	1996	32	1970	3
2015	4,955	2005	725	1995	20	1969	7
2014	3,964	2004	510	1994	18		
2013	3,519	2003	487	1993	4		

Data consulta: Abril/2022

Figura 1 - Registros da consulta para palavra "Sustentabilidade"

A Figura 2 abaixo demonstra a evolução dos resultados obtidos na consulta para a palavra Sustentabilidade no intervalo compreendido entre 2000 a 2022.

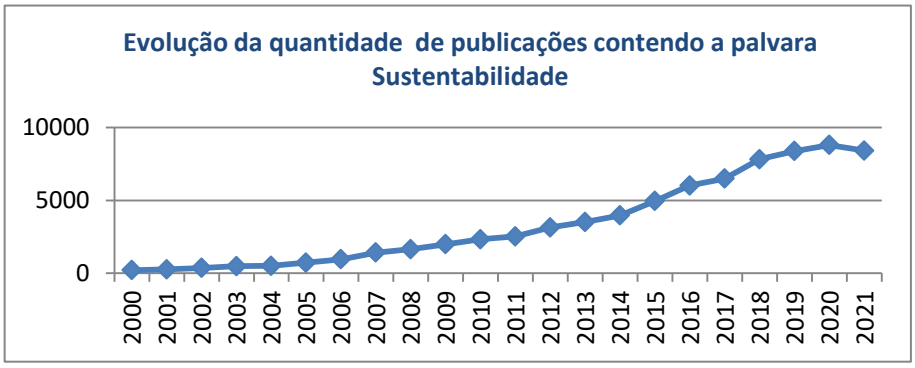

Figura 2 - Evolução de registros em publicações para palavra "Sustentabilidade"

Para o termo sustentabilidade, o número de registros de publicações cresceu quase que exponencialmente no período compreendido na consulta, apresentando uma suave queda apenas no ano de 2021, com 8.416 publicações. Sendo que o ápice ocorreu em 2020, com o registro chegando a 8.798 publicações indexadas nessa plataforma.

O aumento no número de pesquisas neste campo ocorre pelo fato de que, com o passar dos anos, a abordagem sobre o tema tem se tornado cada vez mais relevante. A sociedade, de forma geral, torna-se gradativamente mais preocupada com a proteção ambiental, à medida que novas pesquisas são realizadas de forma que o conhecimento sobre tal assunto seja cada vez maior e mais abrangente.

2.2 Agregados reciclados

A argamassa, o concreto e outros elementos que se utilizam do cimento como principal meio ligante em sua composição, geram compósitos que tornam os agregados naturais usados na composição, como materiais que necessitam de volumes expressivos em escala global, ocupando parte significativa no topo de materiais mais utilizados em termos de volume aos materiais aplicados na produção mundial.

Em conotação a essa verificação, percebe-se que vários resíduos, oriundos da própria construção civil, de processos produtivos e de produtos reciclados pós-consumo, após uma revalorização de suas propriedades, podem gerar um material com potencial de utilização comercial como agregado reciclado.

A NBR 15116 (2021) apresenta agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland. De modo que essa normativa busca apresentar classificação, requisitos e métodos de ensaios que visam corroborar com a aplicação cada vez mais necessária dos agregados reciclados.

No tocante a essa pesquisa, foi identificado que o uso de agregados reciclados em concreto e crescente e que existe grande necessidade de estudos com materiais com resíduos de PET, essa constatação é possível de ser observada na figura 3, onde Marvila, et al. (2022) apresenta uma análise bibliométrica que contem agregado reciclado para uso em concreto no intervalo de 2013 a 2022.

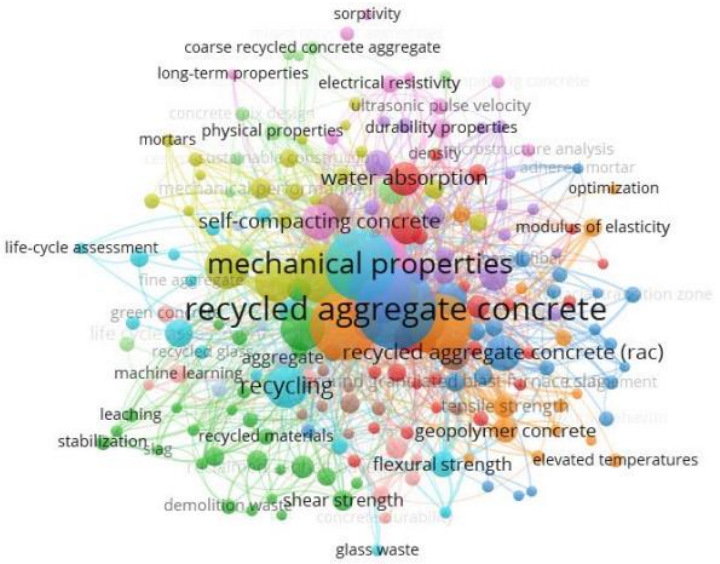

Figura 3 - Análise bibliométrica de concreto contendo agregado reciclado para os anos de 2013-2022. (MARVILA, *et al.* 2022)

Ainda nessa análise é destacado que existe baixa relevância no quantitativo de estudos com esse tipo de material, algo considerado pelos autores como injustificável, pois o material tem característica potencial de ser um agregado leve e de grande utilização em escala global.

Nota-se nessa figura ainda e também bem destacado na pesquisa de Marvila et, al. (2022) que outros agregados reciclados de concreto, bem como os resíduos de construção e demolição, resíduos de vidro e resíduos de escória possuem destaque em relação as pesquisas vinculadas ao tema.

Como essas premissas é possível identificar que o estado da arte no que tange a pesquisa de utilização de PET-PCR em materiais cimentícios carece de estudos, algo motivador para o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa.

Nota-se também que a recente normativa NBR 15116 (2021) ainda pouco influenciou nos estudos relacionados ao tema, algo que deve mudar nos próximos anos, onde essa normatização pode incentivar pesquisas nesse contexto.

3. Metodologia

Os materiais e métodos a serem empregados no desenvolvimento do compósito para aplicação em contrapiso com rejeitos de PET-PCR micronizado em substituição da fração areia dessa aplicação, bem como uma previa da viabilidade econômica são:

O aglomerante a ser utilizado nesta pesquisa é o cimento CP II – E 32, por sua vasta utilização nas obras de todo o pais, além disso, fora verificada a grande disponibilidade desse cimento nos estabelecimentos na cidade de Campos dos Goytacazes – RJ. A areia a ser utilizada como agregado na composição do compósito nesta pesquisa é natural e lavada, extraída do Rio Paraíba do Sul na cidade de Campos dos Goytacazes – RJ.O PET-PCR micronizado a ser utilizado nesta pesquisa é proveniente do estado do Espirito Santo, cedido voluntariamente pelo departamento de Química da UFES, que possui uma planta piloto de reciclagem na referida universidade.

O traço de referencia definido por norma e que em pesquisa de campo utilizada de forma mais usual, também mantendo a mesma relação água/cimento, serão analisadas duas substituições do agregado natural areia de diferentes teores do resíduo de PET-PCR na mistura. Assim optou-se por um traço convencional de argamassa, sendo em volume de aproximadamente 1:3 (aglomerante/agregado), com uma relação água/cimento de 0,5, ao qual proporciona uma consistência do tipo “farofa”. Assim, a partir desse traço o agregado miúdo natural areia será substituído em volume nas proporções de 10% (A10) e 20% (A20) pelo resíduo de PET-PCR micronizado em relação ao traço de referência (AR).

Os testes tecnológicos para classificação previstos na NBR 13281(2005), visam demonstrar informações que sirvam para comparar com produtos já existentes no mercado e que carecem de normativa específica para sistema de contrapiso, ou seja, uma fragilidade em que os estudos relacionados diretamente com argamassas de contrapiso possuem. No entanto essas características podem ser encontradas em produtos já consolidados no mercado que se destinam a aplicação em sistema de contrapiso.

Nota-se que as caracterizações físicas, morfológicas e testes tecnológicos visam demonstrar informações necessárias para classificar a argamassa em pelo menos sete requisitos previstos na NBR 13281(2005) para as argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos, no que tange as argamassas no estado fresco e endurecido são eles:

P - Resistência à compressão (MPa) NBR 13279(2005);
M - Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m3) NBR 13280(2005);
R - Resistência à tração na flexão (MPa) NBR 13279(2005);
C - Coeficiente de capilaridade (g/dm2.min1/2) NBR 15259(2005);
D - Densidade de massa no estado fresco (kg/m3) NBR 13278(2005);
U - Retenção de água (%) NBR 13277(2005);
A - Resistência potencial de aderência à tração (MPa) NBR 15258(2021).

A tabela 1 apresenta os requisitos da norma NBR 13281 (2005) para classificação.

Tabela 1 – Tabela de requisitos da norma NBR 13281 (2005)

Classes	P	M	R	C	D	U	A
1	≤ 2,0	≤ 1200	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1400	≤ 78	≤ 0,20
2	1,5 a 3,0	1000 a 1400	1,0 a 2,0	1,0 a 2,05	1200 a 1600	72 a 85	≥ 0,20
3	2,5 a 4,5	1200 a 1600	1,5 a 2,7	2,0 a 4,0	1400 a 1800	80 a 90	≥ 0,30
4	4,0 a 6,5	1400 a 1800	2,0 a 3,5	3,0 a 7,0	1600 a 2000	86 a 94	-
5	5,5 a 9,0	1600 a 2000	2,7 a 4,5	5,0 a 12	1800 a 2200	91 a 97	-
6	> 8,0	> 1800	> 3,5	> 10	> 2000	95 a 100	-

No intuito de determinar caracterizações físicas, serão utilizados os métodos de distribuição granulométrica da areia e do PET-PCR micronizado, previstos na NBR NM 248 (2003), onde após secagem e pesagem dos materiais, serão submetidos ao peneiramento em peneiras com abertura de malha da série normal e intermediária (6,3 mm, utilizada para definir tamanho máximo da amostra) e posteriormente calculados seus módulos de finura.

Como entendimento da NBR 7211 (2009) as areias que possuem módulo de finura entre os limites de 1,55 < MF < 2,2 podem ser classificadas como finas (zona utilizável inferior), entre 2,2 < MF < 2,9 como médias (zona ótima) e de 2,9 < MF < 3,5 como grossas (zona utilizável superior).

4. Resultados

Esta seção é destinada a apresentar e discutir os resultados das caracterizações e testes tecnológicos da pesquisa. Na figura 4 dados relativos à distribuição granulométrica dos agregados são ilustrados observa-se nessa figura que a faixa encontrada para ambos agregados possui módulo de finura dentro da zona ótima ou seja, 2,31 e 2,45, podendo assim ser classificada com tamanho de areia média, favorecendo sua utilização em argamassas, pois promove melhor trabalhabilidade e pequena quantidade de vazios entre os grãos.

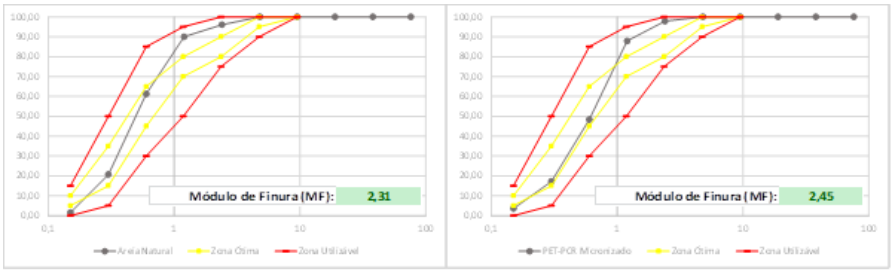

Figura 41 - Representação gráfica da distribuição granulométrica dos agregados natural e reciclado

Com intuito de apresentar a morfologia dos agregados Areia natural e PET-PCR micronizado utilizados na pesquisa, a figura 5 representa a microscopia óptica dos elementos típicos encontrados nas amostras.

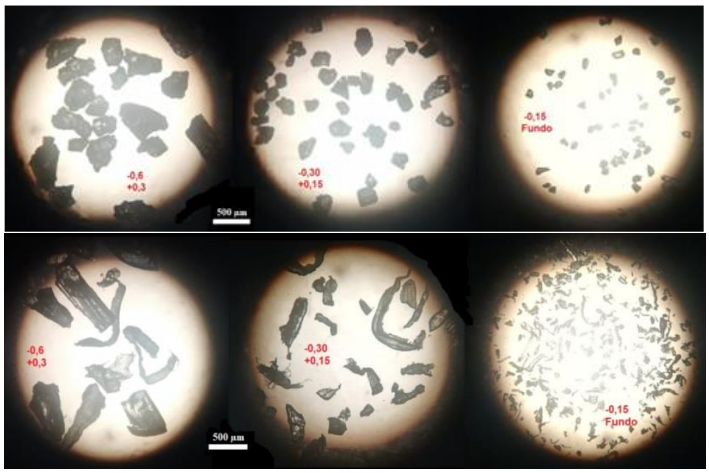

Figura 5 - Visualização da morfologia dos elementos típicos da Areia natural e do PET-PCR micronizado.

Na figura acima, observamos a predominância dos grãos de areia com morfologia cúbica, já os elementos típicos da amostra de PET-PCR micronizado, possuem morfologia alongada-lamelar.

Para realização dos ensaios no estado endurecido que visaram determinar o requisito P de Resistência à compressão (MPa) NBR 13279(2005) e o requisito R de Resistência à tração na flexão (MPa) NBR 13279(2005), foram confeccionados os corpos de prova no formato prismático com dimensões 4x4x16 cm em gabarito padronizado em acordo com as recomendações da NBR 13279 (2005), por traço estudado. Na figura 6 ilustra os resultados.

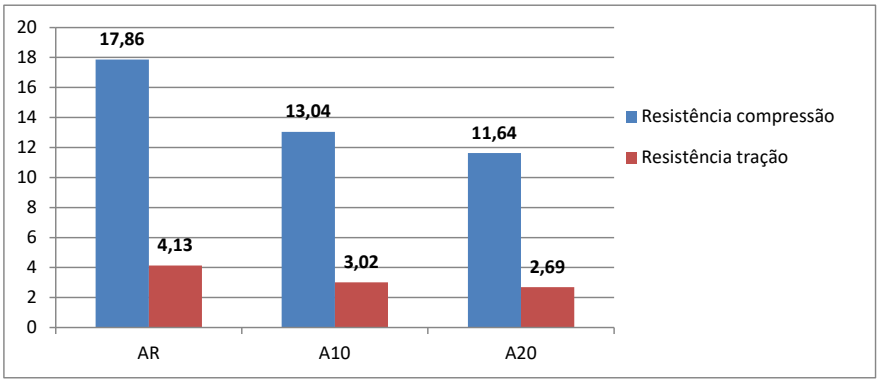

Figura 6 – Resultados dos ensaios para o requitos P e R em MPa aos 28 dias

Com intuito de verificar a influencia da substituição do PET no requisito M - Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m3) NBR 13280(2005) na densidade das argamassas, foram realizados os ensaios com seis corpos de prova para cada dos três traços, sendo dois com substituição por PET e um com traço de referência.

A figura 7 apresenta os valores obtidos após 28 dias de cura, os prismas tiveram seus valores de altura (h), largura (l) e comprimento (c) medidos com um paquímetro, em cm, e determinados suas respectivas massas (Mcp), em g. Para determinar a densidade de massa aparente no estado endurecido (D), em kg/m³, foi realizada a simples relação média dos corpos de prova de massa/volume.

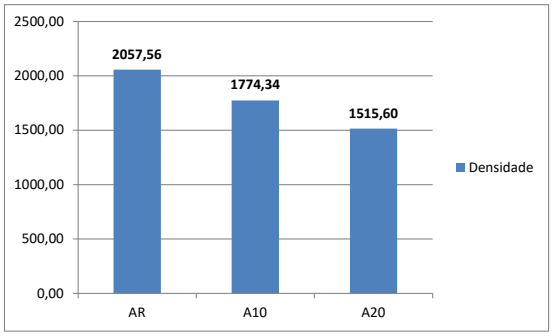

Figura 7 – Valores para o requito M em kg/m³ aos 28 dias

Para determinação do requisito C do coeficiente de capilaridade, foram realizados os ensaios de absorção de água por capilaridade, o teste de baseia a partir da colocação dos corpos de prova com 28 dias, em contato com a água, determina-se a massa após 10 minutos (m10) e após 90 minutos (m90). Para determinar o coeficiente aplica-se a equação: C = m90 − m10. Vejamos na figura 8 os resultados obtidos para cada traço estudado.

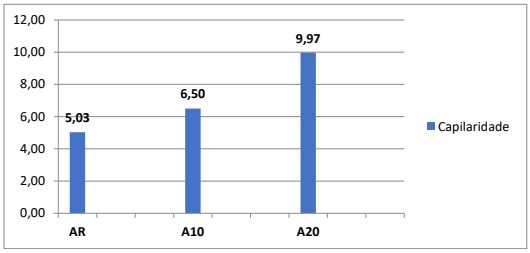

Figura 8 – Valores para o requitos C em g/dm2.min1/2 aos 28 dias

Para determinar o requisito U de retenção de água (%), fora submetido o seguinte procedimento: uma bomba de vácuo aplica sucção à argamassa posicionada num funil de Buchner, sendo realizado de forma a produzir 4 determinações para cada argamassa produzida. Na figura 9 os resultados obtidos são demonstrados.

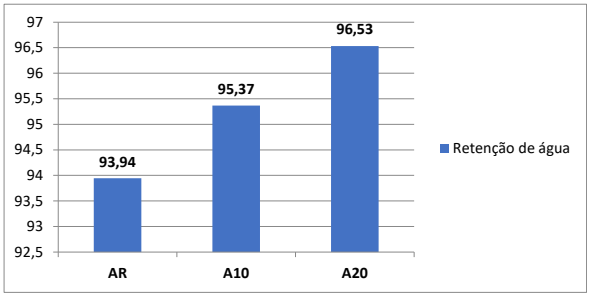

Figura 9 – Valores para o requito U em %

O requisito D relativo à densidade de massa no estado fresco expresso kg/m3 foi determinado segundo NBR 13278, sendo os resultados apresentados na figura 10.

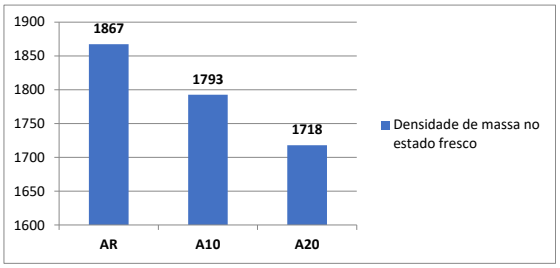

Figura 10 – Valores para o requito D em kg/m3

A figura 11 demonstra os resultados obtidos para o requisito relativo resistência potencial de aderência à tração expressos em Mpa, segundo proposto na NBR 15258.

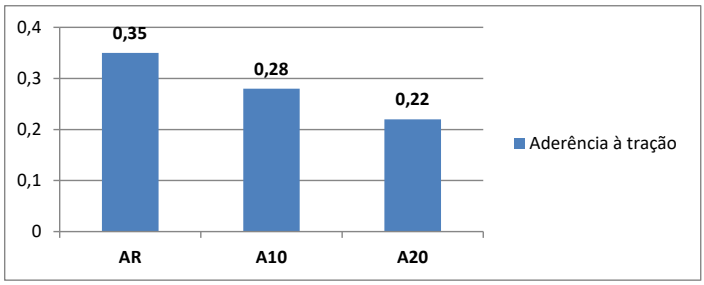

Figura 11 – Valores para o requito A em MPa

Através dos resultados obtidos em cada teste tecnológico é possível classificar a argamassa nos sete requisitos determinados pela NBR 13281. Na figura 12 é apresentado a classificação para cada um dos três traços pesquisados.

Classificação							
Traço	P	M	R	C	D	U	A
AR	6	6	6	4	4	5	3
A10	6	5	5	5	3	5	2
A20	6	4	4	5	3	5	2

Figura 11 – Classificação das argamassas segundo NBR 13281

5. Conclusões

Realizada a caracterização dos materiais, a realização dos ensaios tecnológicos que visaram classificar as argamassas e analisando os resultados obtidos, se estima conclusivamente que é de grande potencial o uso de PET-PCR micronizado em estudos de desempenho térmico e acústico, além disso, a viabilidade econômica e os impactos ambientais proporcionados são de grande valia para aplicação em argamassa para contrapiso.

No que tange a expectativa inicial, entende-se que substituição parcial do agregado por PET-PCR tendeu a promover formação de poros nas estruturas de ligação, algo que provavelmente resultará na redução sua condutividade, algo necessário para melhoria no desempenho termoacústico em comparação há uma aplicação de um sistema de piso tradicional.

Com essa expectativa, os resultados dos testes tecnológicos obtidos, são possíveis de entendimento e proporciona conhecimentos necessários da aplicação desse tipo de incorporação de material residual do lixo, assim aplicável e com ecobenefícios a sociedade.

Essa conclusão se da pelo fato de que esse tipo de resíduo é encontrado em praticamente todas as regiões urbanas do mundo, de forma que o material proposto para aproveitamento tem consumo globalizado, tão logo o impacto social, econômico e ambiental possui característica de abrangência global.

Referências

AJAM L.; TRABELSI A.; KAMMOUN Z., VALORISATION **Of face mask waste in mortar**. Technical paper. Innovative Infrastructure Solutions, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

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 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** 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 15258. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro, 2005.

BOTELHO, L. C. G. **Avaliação acústica e mecânica de argamassas com pó de borracha proveniente de pneus inservíveis para uso em contrapiso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 2020, 130 p.

BRANCHER L .R. et al. Acoustic Behavior of Subfloor Lightweight Mortars Containing Micronized Poly (Ethylene Vinyl Acetate) (EVA). **Materials**. 2016 Jan 15;9(1):51. doi: 10.3390/ma9010051. PMID: 28787851; PMCID: PMC5456577. Acesso em: 15 set. 2022

CAMPANHÃO, A.F.; MARVILA, M.T.; AZEVEDO, A.R.G.D.; DA SILVA, T.R.; FEDIUK, R.; VATIN, N. Recycled PET Sand for Cementitious Mortar. **Materials** 2022, 15, 273. https:// doi.org/10.3390/ma15010273.

DA SILVA, T.R.; DE AZEVEDO, A.R.G.; CECCHIN, D.; MARVILA, M.T.; AMRAN, M.; FEDIUK, R.; VATIN, N.; KARELINA, M.; KLYUEV, S.; SZELAG, M. Application of Plastic Wastes in Construction Materials: A Review Using the Concept of Life-Cycle Assessment in the Context of Recent Research for Future Perspectives. **Materials** 2021, 14, 3549. https:// doi.org/10.3390/ma14133549

DEBSKA, B.; BRIGOLINI SILVA, G.J. Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Mortars Made with Polyethylene and Poly(Ethylene Terephthalate) Waste. **Materials** 2021, 14, 2203. https:// doi.org/10.3390/ma14092203

HERRERO S. et al. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster–rubber mortars. **Materials and Design** 2013. Acesso em: 16 set. 2022

KOCOT, A.; CWIRZE N, A.; PONIKIEWSKI, T.; KATZER, J. Strength Characteristics of Alkali-Activated Slag Mortars with the Addition of PET Flakes. **Materials** 2021, 14, 6274. https://doi.org/10.3390/ ma14216274

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. Acesso em: 05 out. 2022

MACHIMBARRENA, M.; RASMUSSEN, B. Legislation and Regulations in Building Acoustics: Paper ICA2016-487. Comparison of acoustic regulations for housing and schools in selected countries in Europe and South America – A pilot study. In: **International Congress on Acoustics**, 2016, [s.i.]. Proceedings. Buenos Aires: ICA, 2016. p. 1 – 10.

MARVILA, M.; DE MATOS, P.; RODRÍGUEZ, E.; MONTEIRO, S.N.; DE AZEVEDO, A.R.G. Recycled Aggregate: A Viable Solution for Sustainable Concrete Production. **Materials** 2022, 15, 5276. https://doi.org/ 10.3390/ma15155276

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 47:4453–4462 https://doi.org/10.1007/s13369-021-06128-y

MUSHTAQ, F.; HUANG, Z.; SHAH, S.A.R.; ZHANG, Y.; GAO, Y.; AZAB, M.; HUSSAIN, S.; ANWAR, M.K. Performance Optimization Approach of Polymer Modified Asphalt Mixtures with PET and PE Wastes: A Safety Study for Utilizing Eco-Friendly Circu-

lar Economy-Based SDGs Concepts. **Polymers,** Junho 2022, DOI 10.3390/polym14122493. Disponível https://doi.org/10.3390/polym14122493. Acesso em: 20 set. 2022

NIKOLAIVITS E., PANTELIC B., AZEEM M., TAXEIDIS G., BABU R., TOPAKAS E., BRENNAN FOURNET M. AND NIKODINOVIC-RUNIC J 2021 Progressing Plastics Circularity: A Review of Mechano-Biocatalytic Approaches for Waste Plastic (Re)valorization. Front. **Bioeng. Biotechnol**. 9:696040. doi: 10.3389/fbioe.2021.696040

PHUTTHIMETHAKUL, L.; SUPAKATA, N. Partial Replacement of Municipal Incinerated Bottom Ash and PET Pellets as Fine Aggregate in Cement Mortars. **Polymers** 2022, 14, 2597. https://doi.org/10.3390/ polym14132597

POONYAKAN A., RACHAKORNKIJ M., WECHARATANA M. AND SMITTAKORN W. Potential Use of Plastic Wastes for Low Thermal Conductivity Concrete. **Materials** 2018, 11, 1938; doi:10.3390/ma11101938

PURCHASE, C.K.; AL ZULAYQ, D.M.; O'BRIEN, B.T.; KOWALEWSKI, M.J.; BERENJIAN, A.; TARIGHALESLAMI, A.H.; SEIFAN, M. Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits. **Materials** 2022, 15, 76. https://doi.org/10.3390/ ma15010076

Single-Use Plastics: A Roadmap for Sustainability. **United Nations Environment Programme**, p. 2-12 dez., 2018. ISBN: 978-92-807-3705-9 DTI/2179/JP. Disponível em: https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/25496. Acesso em: 11 out. 2022.

SALAS M. A., ACEBO H. P., CALDERÓN V. AND ORDEN H. G. Analysis and Economic Evaluation of the Use of Recycled Polyamide Powder in Masonry Mortars. **Polymers** 2020, 12, 2657; doi:10.3390/polym12112657

SILVA, T.R.; CECCHIN, D.; DE AZEVEDO, A.R.G.; VALADÃO, I.; ALEXANDRE, J.; DA SILVA, F.C.; MARVILA, M.T.; GUNASEKARAN, M.; GARCIA FILHO, F.; MONTEIRO, S.N. Technological Characterization of PET—Polyethylene Terephthalate—Added Soil-Cement Bricks. **Materials** 2021, 14, 5035. https://doi.org/10.3390/ma14175035

TANI N. K., BENOSMAN A.S., SENHA Y., TAÏBI H., MOULI M., BELBACHIR M. Prediction models of mechanical properties for pet-mortar composite in sodium sulphateaggressive mediums. **MATEC Web of Conferences** 2018, 149, 01051. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901051