

Utilização de materiais alternativos de construção para execução de sistemas construtivos de pisos de edificações

Use of alternative building materials for the execution of building floor construction systems

HENNEBERG, Fernanda A.¹

CATAI, Rodrigo E.²

GOMES, Marcio H.A.³

WILLE, Valéria B.⁴

Resumo

No setor da construção civil é notável a crescente necessidade de projetos tecnológicos com características sustentáveis, e que busquem critérios de qualidade técnica em uma edificação. O objetivo deste artigo é explanar sobre a concepção de argamassas utilizando-se de resíduos de construção e de demolição (RCD), para a aplicação em contrapisos de edificações. Concluiu-se que as argamassas utilizadas nesta pesquisa apresentaram resistência mecânica compatível, além de desempenho acústico superior a soluções executivas convencionais, sendo portanto uma alternativa sustentável ao setor.

Palavras-chave: construção civil, resíduos, desempenho de edificações, construções sustentáveis

Abstract

In the construction industry is notable the growing need for technological projects with sustainable characteristics, and that seek technical quality criteria in a building. The objective of this article is to explain about the conception of mortars using construction and demolition waste (CDW) for application in building screeds. It was concluded that the mortars used in this research showed compatible mechanical strength, in addition to superior acoustic performance than conventional solutions, therefore being a sustainable alternative to the sector.

Keywords: civil construction, waste, building performance, sustainable buildings

1. Introdução

Como forma de desenvolvimento tecnológico e sustentável, o setor da construção civil necessita de projetos que viabilizem o desempenho das suas edificações, ou seja, que ofereçam benefícios sociais, econômico e também ambientais. Neste cenário, destaca-se a necessidade da concepção de soluções construtivas com relação ao

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná. UTFPR. Brasil. Email: fernandaa@utfpr.edu.br

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná. UTFPR. Brasil. Email: catai@utfpr.edu.br

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná. UTFPR. Brasil. Email: marciogomes@utfpr.edu.br

⁴Universidade Tecnológica Federal do Paraná. UTFPR. Brasil. Email: valwille@gmail.com

comportamento em uso de uma edificação bem como de seus sistemas, visando o bem-estar e conforto para os usuários.

Não obstante o intenso consumo de recursos naturais em seus processos executivos, salienta-se que os empreendimentos de construção civil resultam na geração de grande quantidade de Resíduos de Construção e de Demolição (RCD), e utilizam-se de enormes quantidades de energia que causam impactos ambientais negativos e significativos, os quais representam um grave problema em muitas cidades. A disposição irregular desses resíduos está associada a problemas de ordem estética, ambiental e de saúde pública, além da sobrecarga dos sistemas de limpeza pública municipais, haja vista que, no Brasil, em 2020, foram coletadas pelos municípios cerca de 47 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e de Demolição(RCD), sendo a construção civil um dos setores que mais produz volume de resíduos (ABRELPE, 2021). Assim, viabiliza-se a possibilidade contribuição para reduzir o impacto ambiental dos resíduos, ao mesmo tempo em que traz benefícios ao aumento do desempenho de uma edificação, onde se busca a qualidade igual ou superior aos materiais convencionais.

Os materiais de construção civil são componentes de diferentes naturezas, os quais exercem funções específicas e previsíveis para compor a existência de um ambiente ou elemento construído, projetado com uso determinado como habitação, transporte, serviços e outros. Podem ser provenientes de matérias-primas naturais e artificiais, sendo que o conhecimento das suas propriedades pelo responsável técnico é fundamental para aplicação adequada dos mesmos e por abrir campo para a inovação tecnológica e criação de soluções para diversos desafios da construção civil (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006; BAUER, 2019).

Além do exposto, Islam *et al.* (2019) ressaltam que a reciclagem de RCDs tem potencial para extrair benefícios econômicos e ambientais desses materiais. A reincorporação de resíduos cerâmicos e de concreto contribuiu em torno de 45 milhões de dólares para a economia nacional de Bangladeshem comparação com o uso de materiais convencionais.

Assim, esta pesquisa busca demonstrar a funcionalidade de materiais alternativos de construção em argamassas para execução de contrapisos especiais de edificações. O seu desenvolvimento consistiu na confecção de contrapisos denominados especiais, utilizando como agregado a areia proveniente de resíduos de construção e de demolição, além da adição de resíduos de borracha oriunda da recapagem de pneus; argila expandida; e, aditivo incorporador de ar, para verificação de suas propriedade mecânicas, e também a sua influencia na análise acústica destes sistemas de contrapisos especiais executados, comparando-os com a sua execução convencional.

Considerando o contexto supracitado, pretende-se responder a seguinte questão: A utilização de materiais alternativos em argamassas para contrapisos especiais pode atender os critérios necessários, de acordo com o que preconizam as normas vigentes brasileiras, em um sistema construtivo?

1.1. Estado da arte

Algumas das pesquisas realizadas nos anos recentes com uso de Resíduos de Construção e Demolição serão detalhadas na sequência. Xiao *et al.* (2018) substituíram parte do cimento por pó reciclado, proveniente de Resíduos de Construção e Demolição, em concretos e analisaram suas propriedades mecânicas e a fissuração nas primeiras idades. Os resultados indicaram que os concretos contendo o pó reciclado tiveram uma maior taxa de hidratação em comparação com as misturas sem o material. As propriedades mecânicas mantiveram-se estáveis com uma substituição de até 30%. A presença do pó reciclado afetou a trabalhabilidade e aumentou a fissuração em primeiras idades, sendo recomendado que medidas para minimizar a fissuração sejam tomadas. Os autores indicam que a substituição do cimento pelo pó reciclado fique entre a faixa de 15% e 30% para um melhor desempenho das misturas.

Sena, Amorim e Ingunza (2019) avaliaram a viabilidade técnica de misturas de concreto asfáltico pré-misturadas a frio compostas com agregados de RCD. Pelas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) os autores identificaram que a aplicação de RCD melhorou a estabilidade e a aderência superficial do concreto asfáltico. Em relação aos parâmetros volumétricos da metodologia Marshall, o concreto contendo os agregados de RCD apresentou desempenho inferior ao concreto com agregados naturais, contudo os parâmetros obtidos são aceitáveis para aplicação da mistura segundo o método. Foi constatado que o uso de RCD na composição de concretos asfálticos a frio, em pavimentos de baixo tráfego, tem expressivo potencial tanto econômico quanto ambiental.

Ibrahim *et al.* (2020) exploraram a produção de concretos permeáveis contendo agregados finos reciclados (RFA) de concreto. A porcentagem de resíduos testada pelos autores foi de 72% em volume do total de componentes do concreto. A incorporação dos resíduos gerou melhora nas propriedades mecânicas do concreto, 7% na resistência à compressão e 37% na resistência à ruptura, respectivamente. Em decorrência do aumento da resistência e de uma argamassa mais aderida pela presença do material fino, o concreto permeável analisado apresentou redução na capacidade de desvio de fissuras em comparação com concretos sem o material fino reciclado.

Yang, Liu e Ma (2020) utilizaram resíduos de tijolos cerâmicos como material cimentício suplementar para a composição de concreto celular. A incorporação do resíduo de tijolos reduziu a retração por secagem do concreto, mantendo uma boa taxa entre retração máxima e substituição. Até o teor de 15% de substituição a propriedade de resistência à compressão do concreto foi mantida. Pelos resultados alcançados, os autores concluíram que a utilização de resíduos de tijolos cerâmicos tem excelente eficiência em reciclagem, além de trazer benefícios ambientais e econômicos na confecção de concretos celulares.

Lima *et al.* (2021) confeccionaram misturas de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) com agregados de RCD nas frações de areia e brita 1. Os concretos asfálticos com material reciclado apresentaram menor densidade aparente, maior absorção e resistência ao desgaste próxima ao concreto asfáltico de comparação, ou seja, as misturas respeitaram os limites para aplicação em pavimentação. Pelos resultados obtidos foi constatada a possibilidade de emprego das misturas de CAUQ com RCD e um trecho experimental na área urbana de Natal, no estado de Rio Grande do Norte, foi confeccionado.

Robalo *et al.* (2021) produziram concretos e coeficientes com Resíduos de Construção e Demolição que continham baixa taxa de cimento, as substituições em volume variaram entre 43 a 80%. As propriedades mecânicas dos concretos com RCD são altamente influenciadas pela composição dos agregados, pela taxa de substituição, pelo teor de material fino compondo o RCD e pela relação água/cimento que gera a pasta ligante da mistura. Apesar da variação, os autores demonstraram que é possível a confecção de concretos contendo baixa dosagem de cimento (até 175 kg/m³) e com uma taxa de substituição significativa por RCD (até 60%) para uso com fins estruturais, apresentando boa trabalhabilidade e elevado desempenho em relação a eco eficiência proposta.

Em relação a melhoria no aspecto de desempenho acústico de materiais da construção civil, diferentes abordagens com utilização de resíduos vêm sendo testadas nos últimos anos. Wang *et al* (2016) confeccionaram placas de cimento com resíduos de madeira de construção para analisar aspectos de resistência, peso e isolamento térmico/acústico. A proporção de madeira para cimento de 3:1 (em volume) garantiu uma estabilidade dimensional aceitável para as placas, com inchamento menor que 2%. Os autores atingiram condições de produção que atendem ao Padrão Internacional de resistência de 9 MPa, permitindo que o material seja utilizado como estrutura leve. Além disso, as placas confeccionadas apresentaram excelente redução do ruído proveniente da estrutura (entre 32 e 100 Hz). Portanto, as placas constituem uma solução de destinação

para os resíduos de madeira de construção com viabilidade econômica e potencial para aplicação como material de isolamento térmico e acústico.

Tutikian *et al.* (2017) desenvolveram argamassas leves a partir da incorporação de resíduos de EVA (etileno acetato de vinila) resultantes da indústria calçadista, para utilização como contrapisos para isolamento acústico. As porcentagens testadas estavam entre 20 e 100% de substituição do agregado miúdo por EVA, sendo analisadas as propriedades de resistência e o nível de pressão sonora de impacto. A incorporação do EVA contribuiu para o isolamento do ruído do impacto em todas as porcentagens. O traço com 100% de substituição apresentou otimização no isolamento acústico e resistência mecânica satisfatória em comparação com o contrapiso sem resíduos. A maior redução de ruído detectada chegou a 9 dB, o que confirmou o potencial do material com EVA para utilização como isolante acústico.

Rodriguez *et al.* (2019) analisaram diferentes tipos de agregados provenientes de resíduos de demolição para moldagem de concretos considerando o seu comportamento acústico e a estrutura de poros formada. O uso dos agregados de resíduos afetou as propriedades de densidade e porosidade dos concretos. Pelos resultados confirmou-se que os concretos com agregados de resíduos são eficazes na absorção sonora, especialmente quando não há compactação desses materiais. Por fim, os autores declaram que a alternativa de inserção dos RCD's no concreto com intuito de melhorar o desempenho acústico é válida e irá aumentar as taxas de reciclagem, evolução exigida pelas legislações atuais.

Em conclusão das pesquisas envolvendo desempenho acústico em combinação com a aplicação de resíduos, Amarilla *et al.* (2021) analisaram o coeficiente de absorção sonora dos ruídos de tráfegos rodoviários por blocos de concreto construídos com RCD. Os resultados mostraram que uma barreira acústica simples constituída dos blocos com RCD consegue reduzir o ruído externo analisado. Sendo assim, o uso dos blocos para construção de barreiras acústicas tem viabilidade como uma aplicação sustentável, mitigando o impacto sonoro e o ambiental. Como proposta final, os autores ressaltam que a tendência atual está em encontrar materiais sustentáveis, principalmente para o concreto, e que a reciclagem de resíduos gerados nos processos construtivos é um dos métodos de adentrar nessa tendência.

2. Metodologia

O aglomerante utilizado para a dosagem das argamassas para a execução de contrapisos foi o cimento CPV-ARI (alta resistência inicial), selecionado por ser um material difundido na confecção de argamassas de regularização e nivelamento, o que aproxima a presente pesquisa com o cenário atual da indústria construtiva. A caracterização física desse material foi realizada pelo fabricante de acordo com normatização nacional Norma Brasileira (NBR) 16697 (2018) contemplando os ensaios de resistência à compressão (NBR 7215, 2019), massa específica (NBR 16605, 2017), expansão (NBR 11582, 2016), determinação de índice de peneiração (NBR 12826, 2014), superfície específica pelo método Blaine (NBR 16372, 2015), presença de água na pasta normal (NBR 16606, 2018) e tempo de pega (NBR 16607, 2018).

O agregado miúdo convencional foi classificado pela NBR NM 248 (2003) como areia média, com módulo de finura entre 2,40 e 3,30. O material teve sua caracterização realizada, previamente a confecção das argamassas, por meio dos ensaios de distribuição granulométrica (NBR NM 248, 2003), massa específica (NBR 16916, 2021), teor de material pulverulento (NBR 16973, 2021) e absorção do agregado (NBR 16.916, 2021).

O resíduo escolhido foi areia oriunda de construção e demolição, adquirida em uma usina de reciclagem localizada na cidade de Campo Largo, no estado do Paraná, Brasil (Figura 1). A seleção desse material beneficiado baseou-se no atendimento dos critérios designados pela normativa referente a agregados reciclados de resíduos

sólidos da construção civil para uso em pavimentação e em misturas sem aplicação estrutural (NBR 15116, 2021) e apresentados em relatório de caracterização.

Figura 1
Processo de reciclagem de resíduos de construção e de demolição, que resulta em areia de RCD



Fonte: Os autores (2022)

Em relação à classificação de resíduos sólidos definida pela NBR 15114 (2004), a areia de RCD está na classe A e pode ser aplicada como agregado em misturas com função não estrutural.

Segundo os dados cedidos pela usina de reciclagem, a areia de RCD selecionada é recomendada para aplicação em terra armada, assentamento de tubulações de esgoto, argamassa de assentamento de alvenaria de vedação, contrapiso, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.

Além da areia de RCD, foram utilizados três materiais resilientes, separadamente, na composição dos sistemas de contrapiso, escolhidos com o intuito de aprimorar o desempenho acústico dos sistemas e atingir uma composição de contrapiso eficiente em resistir ao ruído de impacto.

Os materiais aplicados como adição são raspas de borracha triturada originadas de resíduos de pneus obtidos junto a uma recapadora de pneus, com massa específica de $1,12 \text{ g/cm}^3$ (Figura 2a); argila expandida com diâmetro médio de 20 a 30 mm e massa específica de 650 kg/m^3 (Figura 2b); e aditivo incorporador de ar da marca *Vedacit* com recomendação para uso de 40 mL a 120 mL para cada 100 kg de cimento dependendo do teor de ar desejado (Figura 2c).

Figura 2
Materiais adicionados na argamassa com areia de RCD:
a) Raspas de borracha; b) Argila expandida e; c) Aditivo incorporador de ar.



Fonte: Os autores (2022)

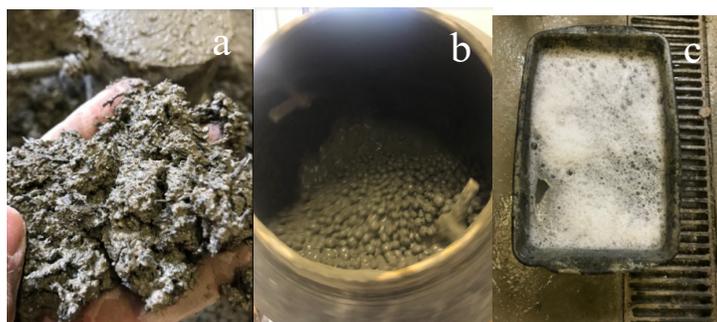
2.1. Definição dos traços de argamassa e confecção de placas para contrapiso

A definição da resistência mínima necessária foi estipulada por meio de uma extensa pesquisa em normas e materiais de especificações técnicas de construção civil. Este valor estipulado mínimo de resistência à compressão axial foi de 8 MPa, e de resistência mínima à aderência de 0,5 MPa. Estes valores estão de acordo com a classificação de argamassas de revestimento do tipo III para contrapiso conforme definido na NBR 13281 (2005), na ABNT NBR 7215 (2019), na ABNT NBR 13528 (2019) e na ABNT 15528 (2021). Também corrobora com a resistência mínima pretendida nesta pesquisa o constante no Cderno de Encargo da Editora PINI onde na composição para serviço de execução de argamassa para contrapiso estipula-se a resistência mínima de 8 MPa, e ainda, com algumas especificações técnicas de argamassas prontas comerciais encontradas no mercado. Além disso, foram executados os ensaios de densidade, índice de absorção de água e índice de vazios nos traços de argamassas selecionados. Na Figura 3, estão demonstradas as amostras com adição de raspas de borracha, argila expandida e aditivo incorporador de ar, respectivamente.

Figura 3

Confecção de argamassa.

- a) Mistura prévia com raspas de borracha de pneu;
- b) Aspecto da argamassa contendo argila expandida;
- c) Aditivo incorporador de ar que será adicionado a argamassa



Fonte: Os autores (2022)

Para a verificação da resistência à compressão axial das misturas de argamassa foram moldados corpos de prova, em conformidade com a NBR 5738 (2015). Para a argamassa de contrapiso convencional, contendo apenas cimento Portland, areia média natural e água, foi utilizado o traço de 1:2,36:0,48 (cimento: areia: relação água/cimento), objetivando a trabalhabilidade da argamassa, o qual apresentou uma resistência mecânica de 19,43 MPa. Na Tabela 1 estão apresentados os valores de resistência à compressão axial obtidos para os traços contendo a areia de RCD em testes preliminares para obtenção das argamassas de contrapiso.

Tabela 1

Resultados preliminares de resistência à compressão axial dos traços de argamassa iniciais da pesquisa contendo areia de RCD.

Argamassas	Traço referência	Traço real ajustado	Tensão média (MPa)
Com 100% de areia de RCD	1 : 4	1 : 2,36 : 0,48	2,846
		1 : 3,84 : 1,79	3,846
		1 : 2,26 : 1,04	7,087
Com 70% de areia de RCD		1 : 1,36 : 0,70 : 0,94	9,086

Fonte: Os autores (2022)

Inicialmente, foram realizados diversos estudos em traços de argamassa para que ocorresse a substituição completa da areia média convencional pela areia oriunda de processos de reciclagem de RCD, porém em razão da trabalhabilidade e das resistências atingidas inicialmente com essas amostras em diversos testes, optou-se pela mistura de 70% de areia de RCD com 30% de areia média natural. Com relação a inserção das raspas de borracha de pneu na mistura, destaca-se ainda que foi necessária uma maior mistura entre a areia de RCD e a areia média normal comercializada, na ordem de 50% de cada uma delas, para se atingir a resistência mecânica e a trabalhabilidade adequada. Nas argamassas com adição de argila expandida e aditivo incorporador de ar, foi possível manter a mesma composição inicial, com uma porcentagem de 70% de areia de RCD na argamassa.

2.2 Sistemas de contrapiso utilizado as argamassas confeccionadas, para análise acústica

Posteriormente à definição do traço que atendesse às exigências de resistência à compressão foram moldadas placas de contrapiso com 5 cm de espessura e 1 m² de área, para viabilizar o estudo comparativo entre as argamassas confeccionadas. Foram realizadas as seguintes misturas: argamassa convencional com areia média natural; argamassa com areia média natural e areia de RCD; argamassa com areia média natural, areia de RCD e adição de raspas de borracha; argamassa com areia média natural, areia de RCD e adição de argila expandida; e, argamassa com areia média natural, areia de RCD e acréscimo de aditivo incorporador de ar.

Para confecção das misturas, os agregados foram inicialmente separados e houve correção de umidade para manter a relação água/cimento definida no traço da argamassa de contrapiso convencional. A montagem das placas está apresentada da Figura 4, sendo importante salientar que foi inserida uma malha de aço com espaçamento de 15x15 cm para impedir que houvesse o aparecimento de trincas na placa durante o processo de cura e para facilitar o posicionamento destas no laboratório de testes.

Figura 4

Moldagem das placas de contrapiso

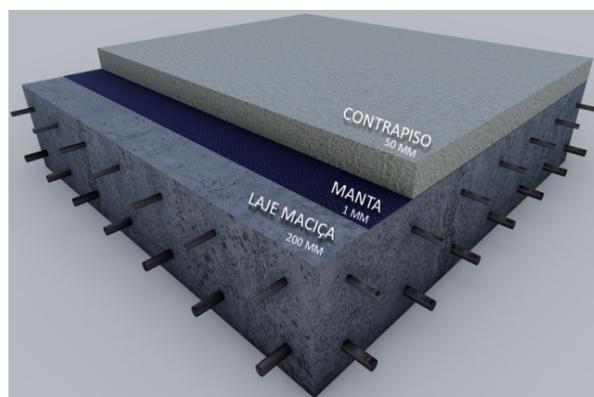


Fonte: Os autores (2022)

Após a moldagem das placas foram realizados os testes de resistência à compressão axial (NBR 5739, 2018) nas amostras retiradas das argamassas, esse procedimento foi realizado para averiguar se a resistência das placas produzidas ficou de acordo com o que havia sido definido previamente na fase de escolha dos traços.

A configuração dos sistemas de contrapiso especiais (Figura 5) consiste em uma base de concreto armado com 200 mm para realização da análise de desempenho acústico (laje), uma manta asfáltica para separar a estrutura de concreto armado da placa de contrapiso confeccionada com as referidas argamassas, e a colocação das placas moldadas anteriormente com 50 mm de altura.

Figura 5
Montagem de contrapiso especial (contrapiso zero)



Fonte: Os autores (2022)

2.3 Análise do desempenho acústico dos sistemas de contrapiso

Para realização da análise acústica dos diferentes sistemas de contrapiso ensaiados na presente pesquisa foram tomados como base de comparação os dados de nível de pressão sonora de impacto normalizados (L'_{n}) definidos pela NBR 15575 (2021), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2
Critério para análise do nível de pressão de impacto sonoro normalizado

Elemento	L'_{n} (dB)
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos.	≤ 80
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas.	≤ 55

Fonte: Adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021)

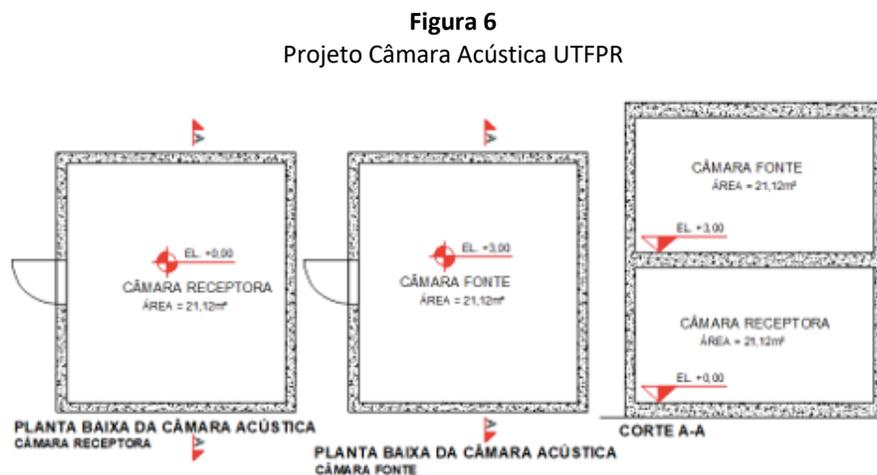
Na Tabela 3 estão discriminados os níveis de pressão sonora de impacto ponderados ($L'_{n,w}$) definidos pela NBR 15575 (2021) considerando os padrões mínimo, intermediário e superior de desempenho.

Tabela 3
Valores de referência de critério e nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado $L'_{n,w}$

Elemento	$L'_{n,w}$ (dB)	Nível de desempenho
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos.	66 a 80	Mínimo
	56 a 65	Intermediário
	≤ 55	Superior
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas.	51 a 55	Mínimo
	46 a 50	Intermediário
	≤ 45	Superior

Fonte: Adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2021)

A metodologia de verificação da redução do ruído de impacto descrita na normativa ISO 10140 (2021) “Acústica - Medição laboratorial de isolamento acústico de elementos de construção - Parte 3: Medição de isolamento acústico de impacto”, requer o uso de câmaras acústicas padrão. Portanto, os ensaios acústicos foram desempenhados na câmara acústica reverberante do Laboratório de Engenharia Acústica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Câmpus Curitiba, representada na Figura 6.



Fonte: Os autores (2022)

É necessário utilizar este tipo de instalação quando se executam os ensaios acústicos, a fim de reduzir ao máximo a interferência de ruídos externos que possam comprometer os resultados. As medições foram efetuadas com o auxílio do equipamento denominado “*Tapping Machine*”, que permite realizar medições de ruídos de impactos conforme as diferentes normas internacionais, e de acordo com o que orienta a NBR 15575-(2021). De acordo com Mojolla (2015), a “*Tapping Machine*” é um equipamento padronizado de acordo com a normativa ISO 10140 (2021), que consiste em uma máquina com cinco cilindros metálicos que impactam sequencialmente a superfície do piso a ser avaliado. Sendo assim, é a única fonte padrão permitida para medição de ruído de impacto.

Para a realização dos ensaios, a fonte emissora do ruído de impacto padronizado foi posicionada na sala superior à sala onde foram feitas as medições por meio do analisador de frequências (sala receptora), conforme esquematizado na Figura 7. Separando ambas as salas, foi posicionado o sistema de contrapiso a ser ensaiado. Acima dele estará posicionada a *Tapping Machine* nas cinco posições pré-estabelecidas.

Figura 7
Posicionamento da *Tapping Machine* para realização do ensaio acústico na câmara de fonte



Fonte: Os autores (2022)

O medidor de nível sonoro (sonômetro) utilizado foi o modelo *B&K 2250 Light*, classe 1, da marca *Brüel&Kjaer*. e o mesmo foi configurado para obter-se a grandeza acústica de valor máximo observado (LZFmax), pois por ser medição de laboratório, é necessária a utilização do espectro “Z” ou espectro linear, que é o nível de pressão sonora pura, sem ponderação.

Após o início da emissão do ruído de impacto, foram realizadas medições na sala receptora (nível inferior) utilizando o analisador de frequências a 1,0 m de altura da laje superior, o qual foi operado por uma pessoa em todo o período de emissão do ruído. Estas medições foram feitas em todos os cantos da sala e em seu centro para cada faixa de frequência situada entre os valores de 100 a 3150 Hz. A análise acústica foi embasada na NBR 15575 (2021) e nas demais normas nela referenciadas para ensaio acústico.

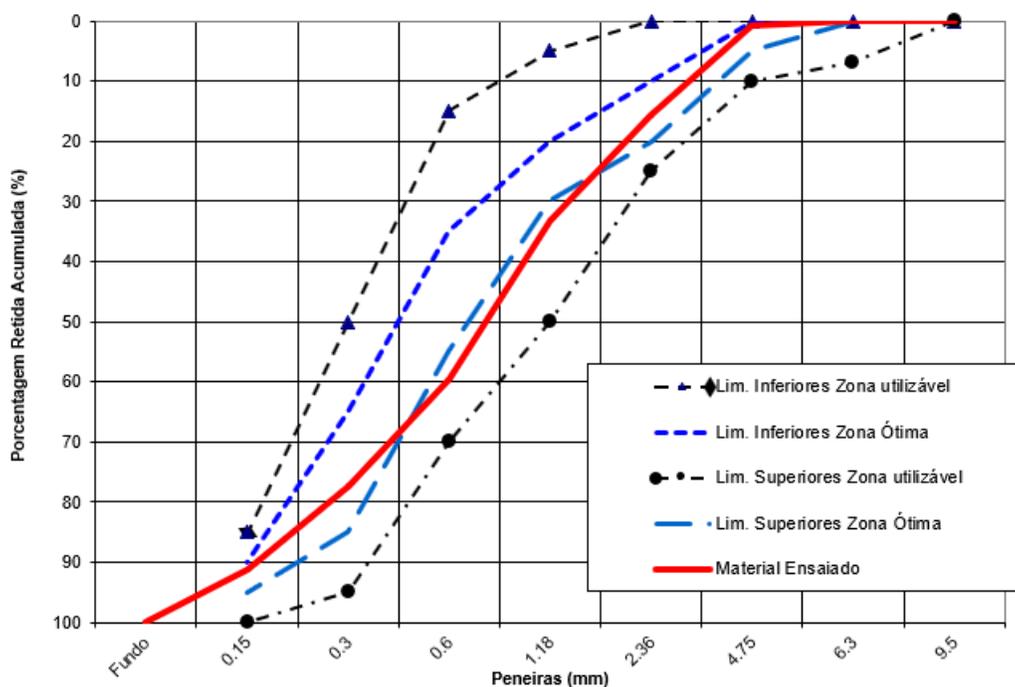
3. Resultados

3.1 Insumos

Na Tabela 3 estão dispostos os resultados de caracterização do cimento CPV-ARI de alta resistência inicial, sendo que os valores atendem os requisitos de cimento Portland presentes na NBR 16697 (2018).

O agregado miúdo natural convencional (areia média) possui uma graduação relativamente contínua, encaixando-se na zona utilizável da NBR 7211 (2009) o que o torna adequado para utilização. Já as características físicas do agregado de areia de RCD empregado no trabalho estão descritas na Tabela 5 e na Figura 8, sendo que este apresentou módulo de finura de 2,78 e diâmetro máximo característico de 4,75 mm.

Figura 8
Curva de distribuição granulométrica
do agregado miúdo de RCD



Fonte: Os autores (2022)

Pela curva granulométrica apresentada na Figura 8, observa-se que o agregado de RCD possui uma graduação contínua, encaixando-se na zona utilizável e quase compoendo a zona ótima da NBR 7211 (2009), sendo este adequado para utilização.

3.2 Caracterização mecânica dos contrapisos

Nas tabelas a seguir estão apresentadas as características das argamassas criadas e os resultados de resistência. Na Tabela 4 apresenta-se a densidade da argamassa, conforme ensaio da NBR 13278 (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, e a absorção de água e o índice de vazios para os traços de argamassas, conforme descrito da NBR 9778 (2005) – Determinação da Absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Tabela 4
Resultados da caracterização da argamassa

Argamassas	Resistência à compressão axial (MPa)	Densidade aparente (kg/m ³)	Absorção (%)	Índice de Vazios (m ³)
Convencional Traço 1:4	19,43	1974,52	14,30	23,43
Com 70% de areia de RCD e 30% de areia média (RCC 1)	12,52	1656,05	26,55	33,59
Com 50% de areia de RCD, 50% de areia média e raspas de borracha (RCC 2)	11,83	1433,12	37,06	38,71
Com 70% de areia de RCD, 30% de areia média, e argila expandida (RCC 3)	14,50	1337,58	48,95	45,35
Com 70% de areia de RCD, 30% de areia média, e aditivo incorporador de ar (RCC 4)	15,50	1592,36	28,78	38,28

Fonte: Os autores (2022)

Analisando-se a Tabela 4, observa-se que a argamassa contendo areia de RCD e argila expandida teve a menor densidade em comparação aos demais sistemas de contrapiso, sendo o valor obtido de 1.337,58 kg/m³. Já a densidade aparente do contrapiso de RCD com raspas de borracha é de 1.433,12 kg/m³; com RCD e aditivo incorporador de ar é de 1.592,36 kg/m³; e, com areia de RCD é de 1.656,08 kg/m³, sendo que o contrapiso convencional teve a maior densidade aparente, com o valor de 1974,52 kg/m³. Observa-se que conforme substituiu a areia natural média pela areia de RCD, se obteve maior absorção e maior índice de vazios nas argamassas. Os valores obtidos mostram que a adição da areia de RCD resultou em redução na resistência à compressão axial aos 28 dias nos traços de RCC1, RCC2, RCC3 e RCC4, quando comparado com a resistência mecânica da argamassa de referência convencional.

Destaca-se que a maior queda de resistência à compressão axial de 40,19% para a argamassa contendo areia de RCD e raspas de borracha pneu (RCC 2) em relação a argamassa convencional. No entanto, mesmo com a redução observada todos os traços contendo a presença da areia de RCD apresentaram uma resistência à compressão acima de 8 MPa, aos 28 dias de envelhecimento, validando a sua utilização como argamassas de revestimento do tipo III.

A queda na resistência mecânica das misturas contendo a areia de RCD corrobora com pesquisas anteriores (LEITE, 2001; POON, 2004; EVANGELISTA; BRITO, 2007; CORINALDESI, 2009; MALTA, SILVA e GONÇALVES, 2013; CARASEK *et al.*, 2018; SENA e MORCELLI, 2018) e pode ser explicada ao levarmos em conta o teor de finos, granulometria e a absorção desse material em comparação com os traços utilizando-se somente da areia média

natural. O elevado teor de finos aumenta a absorção de água demandando mais desse material para a produção de uma mistura trabalhável o que, conseqüentemente, aumenta a sua porosidade.

3.3 Análise ao ruído de impacto das placas para contrapiso com a utilização de argamassas com materiais alternativos

Com o intuito de realizar uma comparação final e definir as melhores configurações de contrapisos especiais, considerando as amostras ensaiadas, para também as mesmas atuarem na redução do ruído de impacto, os valores absolutos de nível de pressão sonora ponderado de impacto normalizados ($L'_{n,w}$), bem como suas respectivas classificações conforme a NBR 15575 (2021) para áreas de uso coletivo em relação a unidades de habitações autônomas, os resultados foram reunidos e apresentados na Tabela 5.

Tabela 5
Valores absolutos de nível de pressão sonora de impacto ($L'_{n,w}$), em decibels (dB), obtidos na análise de desempenho acústico das argamassas de contrapiso contendo diferentes revestimentos superficiais e suas classificações considerando a NBR 15575 (2021)

REVESTIMENTOS	SISTEMAS DE PISOS				
	Convencional	RCC 1 (RCD)	RCC 2 (RCD + Borracha)	RCC 3 (RCD + Argila expandida)	RCC 4 (RCD + Incorporador de ar)
Contrapiso sem Revestimento	55	54	54	53	54
Desempenho acústico de acordo com a NBR 15575 (2021)	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo

Fonte: Os autores (2022)

Na Tabela 5 apresentada, destaca-se que todos os valores estão abaixo de 55 dB, definido pela NBR 15575 (2021) como valor mínimo para desempenho acústico ao ruído de impacto em uma edificação. É importante ressaltar que a placa que teve em sua composição juntamente com a areia de resíduo também a inclusão da argila expandida, obtiveram os melhores desempenhos acústicos, de acordo com o que preconiza a NBR 15575 (2021).

A seguir apresentam-se os resultados de caracterização do isolamento acústico proporcionado por cada sistema de contrapiso especial executado nessa pesquisa. Esses valores são estabelecidos pela redução do nível de ruído de impacto normalizado ($\Delta L'_n$), onde o mesmo se calcula pela diferença entre o nível de ruído de impacto normalizado de cada configuração de sistema de piso estudado com as respectivas argamassas; e o nível de ruído de Impacto normalizado da laje zero, sem acabamento.

Previamente a realização dos ensaios nas placas de contrapiso, foram feitas as medições na laje maciça da câmara acústica, sem acabamento, onde obteve-se como resultado o nível ponderado de pressão de impacto sonoro (L'_{nw}) de 76 dB.

Os resultados da redução ponderada do nível de pressão sonora de impacto, ΔL_w , em cada sistema de piso concebido e testado nesta pesquisa, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6
 Redução do nível sonoro ponderado
 de impacto nos sistemas de pisos

REVESTIMENTOS	ΔL_w (dB) EM SISTEMAS DE PISOS				
	Convencional	RCC 1 (RCD)	RCC 2 (RCD + Borracha)	RCC 3 (RCD + Argila expandida)	RCC 4 (RCD + Incorporador de ar)
Contrapiso sem revestimento	21	22	22	23	22

Fonte: Os autores (2022)

Assim, analisando a Tabela 5 e 6, entre os sistemas de pisos criados e analisados nesta pesquisa, segundo a NBR 15575(2021), ao adicionar um contrapiso confeccionado com as argamassas estudadas na laje estrutural de 200mm de espessura, o isolamento ao ruído de impacto aumentou, sendo portanto uma alternativa viável para a utilização em obras de edificações.

4. Conclusões

Com relação ao controle tecnológico dos materiais desenvolvidos, destaca-se a definição dos traços de argamassas selecionadas, onde o desafio principal foi de manter a consistência e a trabalhabilidade de uma argamassa convencional nas misturas criadas com materiais alternativos reciclados.

Os traços de argamassa apresentados nesta pesquisa resultaram em uma mistura homogênea, com boa trabalhabilidade, consistência adequada, e no processo de cura mais eficaz possível, após os ajustes da relação água/cimento, sendo também importante destacar que a execução *in loco*, nas fases de lançamento e de adensamento das composições de argamassas com materiais alternativos ocorreram sem diferenças técnicas comparadas com a argamassa convencional com os traços demonstrados, sendo as argamassas criadas apropriadas para a execução em obras de edificações.

Com o objetivo de criar traços de argamassa utilizando-se de materiais alternativos com a mesma qualidade e segurança estipuladas por normativas brasileiras de execução quando utilizados insumos convencionais, não foi possível a substituição da areia de RCD em 100% da composição da argamassa, pois com essa mistura não se atingiu a resistência mínima necessária. Assim, após diversas misturas, obteve-se a composição de 70% de areia de RCD e 30% de areia média natural como adequada para a utilização, de acordo com o que preconiza a boa técnica de engenharia, com exceção da argamassa RCC3 com acréscimo de raspas de borracha, onde foi necessária a composição de 50% de RCD e 50% de areia média normal, fato este que se justifica pela redução da rigidez e deformação da argamassa trazida pela presença da borracha.

Salienta-se o cuidado que se fez necessário com o estudo da dosagem de água, devido ao elevado índice de material pulverulento, ou seja, do elevado teor de finos que contêm na areia de RCD em comparação com a areia média natural. Também é importante destacar que esse sequestro de água pelo alto teor de finos do RCD aumenta o índice de vazios da argamassa e diminui a sua densidade, sendo este um dos fatores que diminui a sua resistência mecânica à compressão axial, e que também verificou-se que auxilia na redução do ruído de impacto entre pavimentos.

Com relação às propriedades mecânicas de argamassas produzidas com areia de RCD, raspas de borracha de pneu, argila expandida e aditivo incorporador de ar, todos os traços apresentados nesta pesquisa são tecnicamente adequados para produção de argamassa para pavimentação, atendendo também os critérios de desempenho acústico de acordo com as normas vigentes brasileiras, uma vez que todas as soluções atenderam

pelo menos o nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado mínimo (≤ 55 dB) estabelecido pela NBR 15575 (2021).

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil em 2020. São Paulo, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 3: Requisitos para os Sistemas de Pisos - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15114: Resíduos sólidos na construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção da água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9939: Agregado graúdo - Determinação do teor de umidade total - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9917: Agregado miúdo – Teores de sais cloretos e sulfatos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2005.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 3: Requisitos para os Sistemas de Pisos - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2021.
- BAUER, L. A. F. Materiais de Construção. Editora LTC, 6 ed., v. 1, 2019.
- CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. *Cerâmica*, v. 64, 2018.
- CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, v.23, 2009.
- EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 16, 2007.
- IBRAHIM, H. A. et al. Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. *Construction and building materials*, v. 253, 2020.
- ISLAM, R. et al. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. *Waste Management*, v. 95, 2019.
- LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

- LIMA, C. E. et al. Concreto asfáltico a quente dosado com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) aplicado em pavimento flexível. *Holos*, v. 1, 2021.
- MALTA, J. O.; SILVA V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. *Gesta*, v. 1, 2013.
- RILLA, R. S. D. et al. Acousticbarriersimulationof construction and demolition waste: A sustainable approach to the control of environmental noise. *Applied Acoustics*, v. 182, 2021.
- RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. *Materiais de construção civil*. Editora UFMG, 2 ed., 2006.
- ROBALO, K. et al. Experimental development of low cement content and recycled construction and demolition waste aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, v. 273, 2021.
- RODRÍGUEZ, C. et al. Use of Recycled Aggregates from Demolition Wastes in Concrete: Acoustic Properties. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, v. 124, 2019.
- ROSSI, C. T. Desempenho ao ruído de impacto de laje pré-fabricada nervurada de vigotas protendidas e lajotas cerâmicas com revestimento de pisos vinílicos. *Dissertação (Mestrado)*, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2020.
- SENA, J. S.; MORCELLI, C. P. R. Avaliação da incorporação de resíduos de construção civil na produção de argamassas. *Revista Científica UMC*, v. 3, n. 3, 2018.
- SENA, P. G.; AMORIM, E. F.; INGUNZA, M. P. D. Análises de dosagens de concreto asfáltico do tipo Pré Misturado a Frio (PMF) utilizando Resíduos da Construção e Demolição de obras (RCD). *Matéria*, v. 24, 2019.
- TUTIKIAN, B. F. et al. Uso de agregado leve de EVA em contrapiso argamassado para isolamento ao ruído de impacto em edificações residenciais. *AmbienteConstruído*, v. 17, 2017.
- WANG, L. et al. Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. *Construction and Building materials*, v. 125, 2016.
- XIAO, J. et al. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 188, 2018.
- YANG, D.; LIU, M.; MA, Z. Properties of the foam concrete containing waste brick powder derived from construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering*, v. 32, 2020.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0 Internacional