UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

RODOLFO AUGUSTO CARDOSO RIBEIRO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE PLACAS CIMENTÍCIAS NÃO ESTRUTURAIS INCORPORADAS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

SEROPÉDICA
2026

RODOLFO AUGUSTO CARDOSO RIBEIRO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE PLACAS CIMENTÍCIAS NÃO ESTRUTURAIS INCORPORADAS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada ao PPGCEMat da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Simone Pereira Taguchi Borges.

SEROPÉDICA
2026

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Central de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R484a

Ribeiro, Rodolfo Augusto Cardoso, 1986-
Avaliação do desempenho físico-mecânico de placas cimentícias não estruturais incorporadas com agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil / Rodolfo Augusto Cardoso Ribeiro. - Rio de Janeiro, 2026.
120 f.: il.

Orientador: Simone Pereira Taguchi Borges.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2026.

1. agregado reciclado. 2. resíduos da construção civil. 3. economia circular. 4. sustentabilidade. 5. atenuação sonora. I. Borges, Simone Pereira Taguchi, 1975-, orient. II Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte

O presente Trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEMAT

RODOLFO AUGUSTO CARDOSO RIBEIRO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO DE PLACAS CIMENTÍCIAS NÃO ESTRUTURAIS INCORPORADAS COM AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no PPGCEMat, Área de concentração em Ciência e Engenharia de Materiais.

Dissertação aprovada em 25 de agosto de 2026.

BANCA EXAMINADORA:

gov.br Documento assinado digitalmente
SIMONE PEREIRA TAGUCHI BORGES
Data: 24/09/2026 11:15:26-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Simone Pereira Taguchi Borges - Orientadora – UFRRJ

gov.br Documento assinado digitalmente
TESSIE GOUVEA DA CRUZ LOPES
Data: 24/09/2026 14:51:34-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Tessie Gouvêa da Cruz Lopes - Membro interno – UFRRJ

gov.br Documento assinado digitalmente
ESOLY MADELEINE BENTO DOS SANTOS DIAS
Data: 24/09/2026 12:02:26-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Ésoly Madeleine Bento dos Santos - Membro externo – UFF

À minha esposa, Nathalia, pelo amor incondicional, pela paciência nos momentos de ausência e cansaço, e por ser o meu porto seguro nesta jornada.

Aos meus filhos, Pedro e Daniel, que abriram mão de tantos momentos de conversas e brincadeiras, e cuja simples existência e sorrisos foram o combustível que me impediu de desistir.

Dedico esta conquista a vocês, que são a minha razão de ser.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela realização de um sonho, pela oportunidade de crescimento e pela força para superar os momentos de exaustão.

À minha esposa, Nathalia, minha companheira de vida e de batalhas. Obrigado por compreender minhas ausências físicas e mentais, por segurar a barra nos momentos mais difíceis e por acreditar em mim mais do que eu mesmo. Sem o seu apoio estrutural e emocional, este título seria impossível.

Aos meus filhos, Pedro e Daniel, que trouxeram leveza e alegria aos meus dias mais difíceis de escrita. Vocês são o motivo pelo qual busco ser uma versão melhor de mim mesmo a cada dia. Espero que este trabalho sirva de exemplo sobre a importância de persistir nos próprios sonhos.

À minha orientadora, Profa. Dra. Simone Pereira Taguchi Borges, pela paciência, pelas críticas construtivas e pela condução brilhante ao longo desta pesquisa. Sua mentoria foi fundamental para o meu amadurecimento acadêmico.

Aos colegas do Laboratório de Nanotecnologia, Cerâmicas e Compósitos (LNanoC_2), ao Grupo de Pesquisa e Extensão em Materiais Cerâmicos (GPEMAC) e aos colegas e Professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, pelas discussões enriquecedoras, pelos momentos partilhados e pelo companheirismo na jornada.

Ao Professor Dr. Alexandre Miguel do Nascimento, Coordenador do Laboratório de Química da Madeira da UFRRJ, que disponibilizou a prensa eletromecânica para realização dos ensaios de compressão imprescindíveis a esta pesquisa.

À empresa CSN, pela cessão do laboratório para a execução de ensaios de resistência à compressão que foram fundamentais para esta pesquisa.

À empresa ESM Locações de Máquinas e Equipamentos Ltda, por ceder o material reciclado utilizado nesta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelos incentivos fundamentais para a viabilização desta e de outras pesquisas, que contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Ao Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (Crea-RJ) por me dar o suporte financeiro e o apoio necessário para que eu pudesse prosseguir nesta pesquisa.

Por fim, agradeço à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ pela infraestrutura fornecida e a todos que, direta ou indireta, contribuíram para que este ciclo se encerrasse com sucesso.

"Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância".

(John F. Kennedy)

RESUMO

RIBEIRO, Rodolfo Augusto Cardoso. **Avaliação do Desempenho Físico-Mecânico de Placas Cimentícias Não Estruturais Incorporadas com Agregado Miúdo Reciclado de Resíduos da Construção Civil**. 2026. 120 folhas. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

A indústria da construção civil enfrenta o desafio de mitigar seu impacto socioambiental, sendo responsável pela geração de aproximadamente 44 milhões de toneladas de Resíduos da Construção Civil (RCC) no Brasil apenas em 2023. O objetivo deste trabalho é investigar a viabilidade técnica do desenvolvimento de placas cimentícias para vedação (componentes não estruturais) incorporando agregados reciclados de RCC. O resíduo RCC (obtido por cominuição em britador de mandíbula e selecionado a fração menor que 4 mm) e o agregado miúdo natural (areia) foram caracterizados quanto a granulometria, fases cristalinas (DRX), microestrutura (MEV/EDS) e massa específica (picnometria), para avaliar a substituição parcial na composição. Os traços das argamassas foram desenvolvidos com cimento CP II-E-40 RS e substituições volumétricas de areia por RCC (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Observou-se similaridade física entre os agregados, ambos com diâmetro máximo de 2,36 mm, e módulos de finura de 2,33 (RCC) e 2,73 (areia). A massa específica média da areia (2,541 g/cm³) foi superior em relação ao RCC (2,055 g/cm³). A composição mineralógica identificada por DRX para a areia (Caulinita, Quartzo e Feldspato) e RCC (Pargasita, Melanoflogita e Quartzo) é usual para utilização em argamassas. A areia possui partículas subangulares a subarredondadas com superfícies densas e lisas, enquanto o RCC exibiu aglomerados irregulares e angulosos com textura porosa e rugosa. A composição elementar indicou dominância de silício na areia (74,43% Si) e maior complexidade química no RCC (58,05% Si, 10,46% Al e 8,14% Ca). Foi realizada a mistura das argamassas e efetuado o ensaio de índice de consistência no estado a fresco, evidenciando que maiores teores de RCC exigiram maior fator água/cimento para assegurar a trabalhabilidade (0,7 e 0,9). Corpos de prova cilíndricos (5 x 10cm) e placas retangulares (20 x 20cm) foram moldados e curados em água por 28 dias. No estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, absorção de água e atenuação sonora. Ficou evidenciado que a inserção de RCC provocou redução no peso da placa endurecida em cerca de 5,6%, acréscimo na absorção de água (3,3% até 7,31%) e aumento da atenuação sonora (aproximadamente 7 dB). A resistência à compressão diminuiu com o aumento do teor de resíduo (27,15 MPa para 8,72 MPa com fator

a/c 0,7), mas os valores mantiveram-se perfeitamente compatíveis para componentes de vedação não estrutural (mínimo de 2,0 MPa). A incorporação de agregado miúdo de RCC em substituição à areia natural na produção de placas cimentícias demonstrou-se viável do ponto de vista técnico e ambiental. O compósito resultante possibilita a fabricação de elementos construtivos mais leves, com sensível atenuação sonora e economicamente competitivos, convertendo um passivo ambiental em insumo industrial de valor agregado e promovendo o desenvolvimento sustentável no setor.

Palavras-chave: resíduos da construção civil, agregado reciclado, economia circular, sustentabilidade; atenuação sonora.

ABSTRACT

RIBEIRO, Rodolfo Augusto Cardoso. **Assessment of the Physical and Mechanical Performance of Non-Structural Cementitious Boards Incorporating Recycled Fine Aggregates from Construction and Demolition Waste** 2026. 120 leaves. Dissertation (Master's in Materials Science and Engineering) - Institute of Technology, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

English Translation

The civil construction industry faces the challenge of mitigating its socio-enviroental impact, having been responsible for generating approximately 44 million metric tons of Construction and Demolition Waste (CDW) in Brazil in 2023 alone. The objective of this study is to investigate the technical feasibility of developing non-structural cementitious boards for partition walls incorporating recycled aggregates from CDW. The CDW waste (obtained by crushing in a jaw crusher and selecting the fraction smaller than 4 mm) and natural fine aggregate (sand) were characterized in terms of particle size distribution, crystalline phases (XRD), microstructure (SEM/EDS), and specific gravity (pycnometry) to evaluate partial substitution in the mixture. Mortar mix proportions were developed using CP II-E-40 RS cement with volumetric sand replacements by CDW (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%). Physical similarities were observed between the aggregates, both exhibiting a maximum particle size of 2.36 mm and fineness moduli of 2.33 (CDW) and 2.73 (sand). The average specific gravity of sand (2.5413 g/cm³) was higher than that of CDW (2.0552 g/cm³). The mineralogical composition identified by XRD for sand (kaolinite, quartz, and feldspar) and CDW (pargasite, melanophlogite, and quartz) is typical for mortar applications. Sand presented sub-angular to sub-rounded grains with dense, smooth surfaces, whereas CDW displayed irregular, angular agglomerates with a porous, rough texture. Elemental composition indicated a predominance of silicon in sand (74.43% Si) and greater chemical complexity in CDW (58.05% Si, 10.46% Al, and 8.14% Ca). The mortars were mixed, and consistency index tests were conducted in the fresh state, revealing that higher CDW contents required a higher water-to-cement ratio to ensure workability (0.7 and 0.9). Cylindrical specimens (5 × 10 cm) and rectangular boards (20 × 20 cm) were molded and water-cured for 28 days. In the hardened state, tests were performed for compressive strength, splitting tensile strength, water absorption, and acoustic attenuation. The incorporation of CDW resulted in a weight reduction of the hardened board by approximately 5.6%, an increase in water absorption (3,3% to 7,31%), and enhanced acoustic attenuation (approximately 7 dB). Compressive strength decreased with increasing waste content (from 27.15 MPa to 8.72 MPa with a w/c ratio of 0.7), yet the values remained fully

compatible with non-structural partition components (minimum of 2.0 MPa). The incorporation of fine CDW aggregates as a replacement for natural sand in the production of cementitious boards proved to be technically and environmentally viable. The resulting composite enables the production of lighter, acoustically attenuating, and economically competitive building elements, converting an environmental liability into a value-added industrial raw material while promoting sustainable development in the sector.

Keywords: construction and demolition waste, recycled aggregate, circular economy, sustainability, sound attenuation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma de Classificação dos Resíduos de Construção Civil, segundo ABNT NBR 10.004 (2024) 22
Figura 2 - A produção de RCC dos maiores produtores do mundo- dados de 2018 24
Figura 3 - Produção de RCC por população 24
Figura 4 - Imagem que demonstra a heterogeneidade dos RCC 27
Figura 5 - Classificação do Cimento Portland 29
Figura 6 - Classificação dos agregados utilizados na construção civil 31
Figura 7 - Lavra de areia para obtenção de areia natural 32
Figura 8 - Areal localizado no Município de Seropédica/RJ 33
Figura 9 - Resistência à compressão da argamassa e do concreto com pó reciclado 35
Figura 10 - (A) RCC antes do processo de britagem e (B) RCC após processo de britagem . 44
Figura 11 - RCC ao final do processo de beneficiamento 45
Figura 12 - RCC beneficiado utilizado na pesquisa 45
Figura 13 - Fluxograma dos ensaios realizados no projeto 46
Figura 14 - (A) Agitador mecânico com a série de peneiras e (B) RCC após peneiramento .. 51
Figura 15 - Pesagem do conjunto picnômetro, água e material 52
Figura 16 - (A) peneira com abertura de 0,045mm e (B) almofariz de ágata com RCC sendo preparado para o ensaio de DRX 54
Figura 17 – (A) Prensa eletromecânica da marca Contenco, modelo UMC300, (B) máquina universal de ensaios, modelo PCE100 57
Figura 18 - Esquema construtivo e detalhamento dimensional (vistas externa e interna, em centímetros) da câmara acústica customizada, indicando o posicionamento da fonte emissora, do vão de inserção do corpo de prova e dos transdutores (microfones) de captação. 60
Figura 19 - Arranjo experimental completo em operação, evidenciando a câmara acústica customizada, a bancada com circuitos eletrônicos de amplificação de sinal, e as estações computacionais para síntese e aquisição digital de dados. 62
Figura 20 - Curva Granulométrica obtida por meio do ensaio de granulometria do RCC e Areia 73
Figura 21 - Imagens do Agregado Natural – Areia (A e B) e RCC (C e D) obtidas através de MEV 76
Figura 22 – Fases cristalinas obtidas por difração de raios x da Areia 80
Figura 23 - Fases cristalinas obtidas por difração de raios x do RCC 81
Figura 24 - Fases cristalinas obtidas por difração de raios x do CPII - E - 40 RS 82

Figura 25 - Índice de consistência por traço e fator a/c 84
Figura 26 - Absorção de água por traço 87
Figura 27 - Gráfico da evolução da resistência à compressão para os diferentes teores de substituição (Fator a/c 0,7) 92
Figura 28 - Comparação da resistência à compressão para 28 dias entre ambas as relações a/c 95
Figura 29 - Evolução da resistência à tração por traço 98
Figura 30 - Comparativo de resistência à tração aos 7, 14 e 28 dias 100
Figura 31 - Corpo de prova rompido pela ação da compressão diametral 101
Figura 32 – Média da atenuação acústica líquida por frequência 105
Figura 33 - Gráfico de comparação entre a resistência à compressão e atenuação sonora ... 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critério e nível de desempenho mínimo L'nT,w para ruídos de impactos em sistemas de pisos 15
Tabela 2 - Critério e nível de desempenho mínimo DnT,w para ruídos de impactos em sistemas de pisos 15
Tabela 3 - Critério e nível de desempenho mínimo, $D_{2m,nT,w}$, de isolamento de ruído aéreo das vedações externas (dormitórios) 16
Tabela 4 - Índices de reciclagem do RCC e capacidade produtiva das usinas brasileiras..... 25
Tabela 5 Trabalhos que tratam a utilização de resíduos para a fabricação de pavers 28
Tabela 6 - Valores referenciais de desempenho e atenuação acústica de diferentes materiais e sistemas construtivos. 41
Tabela 7 - Composições dos traços em volume e em massa 48
Tabela 8 - Dados da onda sonora..... 63
Tabela 9 – Valores médios da Massa unitária e índice de vazios da areia e RCC 70
Tabela 10 - Características aferidas no ensaio de granulometria 73
Tabela 11 - Densidade pelo método do picnômetro para o agregado miúdo 74
Tabela 12 - Comparativo da morfologia da Areia e RCC e possível implicação técnica para produção de argamassas ou concretos. 77
Tabela 13 – Composição elementar obtida por meio de EDS das amostras de Areia e RCC . 78
Tabela 14 - Comparativo para a presença de elementos (Areia x RCC) 79
Tabela 15 - Resultados obtidos na ANOVA para absorção de água 86
Tabela 16 - Resultado da resistência à compressão - Fator a/c 0,7 89
Tabela 17 - Resultado da resistência à compressão - Fator a/c 0,9 89
Tabela 18 - Quadro da ANOVA trifatorial para resistência à compressão 94
Tabela 19 - Tabela comparativa entre fatores a/c 96
Tabela 20 - Resultados do ensaio de resistência à tração e os limites do intervalo de confiança 97
Tabela 21 - Análise de confiança (t-Student, 95%) para a atenuação acústica líquida (Alíquida). 102
Tabela 22 - Análise de variância (ANOVA) para o ensaio de atenuação acústica..... 104
Tabela 23 - Comparação entre os diferentes teores de substituição quanto à resistência à compressão e a atenuação sonora 107

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 14
Objetivo Geral 18
Objetivos Específicos 18
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
1.1. Resíduos da Construção Civil (RCC) 20
1.1.1. Normatização e classificação dos RCC 20
1.1.2. Geração e manejo de RCC no Brasil e no mundo 22
1.1.3. Técnicas de beneficiamento e processamento de RCC 25
1.1.4. Aplicações de RCC em materiais de construção 27
1.2. Materiais Cimentícios e Agregados 29
1.2.1. Cimento Portland: Tipos, composição e reações de hidratação 29
1.2.2. Agregados naturais: Classificação e funções em concretos e argamassas 31
1.3. Placas Cimentícias 33
1.4. Incorporação de RCC nas propriedades de concretos e argamassas 34
1.5. Atenuação sonora 39
2. MATERIAIS E MÉTODOS 43
2.1. Materiais 43
2.2. Metodologia 46
2.2.1. Preparação das Amostras 47
2.2.2. Definição dos Traços 47
2.2.3. Caracterização Física 48
2.2.3.1. Massa Unitária 48
2.2.3.2. Análise Granulométrica 50
2.2.3.3. Densidade 51
2.2.4. Caracterização Microestrutural 52
2.2.4.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 52
2.2.5. Caracterização Físico-química 53
2.2.5.1. Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS) 53
2.2.5.2. Difração de Raios X (DRX) 53
2.2.6. Ensaios de Desempenho dos Materiais 54
2.2.6.1. Consistência da Argamassa Fresca 54
2.2.6.2. Absorção de água 56
2.2.6.3. Resistência à Compressão 56
2.2.6.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral 58
2.2.6.5. Atenuação Sonora 59
2.2.7. Análises Estatísticas 65
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 70
3.1. Caracterização Física 70
3.1.1. Massa Unitária 70

3.1.2. Análise Granulométrica 72
3.1.3. Densidade 74
3.2. Caracterização Microestrutural 75
3.2.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 75
3.3. Caracterização Físico-química 78
3.3.1. Espectroscopia de Dispersão de Raios X (EDS) 78
3.3.2. Difração de Raios X (DRX) 79
3.4. Ensaios de Desempenho dos Materiais 83
3.4.1. Consistência da Argamassa Fresca 83
3.4.2. Absorção de água 85
3.4.3. Resistência à Compressão 88
3.4.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral 96
3.4.5. Atenuação Acústica 101
3.4.6. Compromisso entre resistência mecânica e atenuação sonora 107
4. CONCLUSÕES 111
REFERÊNCIAS 113

INTRODUÇÃO

A construção civil figura como uma das atividades que mais geram impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das edificações, desde a execução até a demolição (Gobbe; Vanderlei, 2022). O setor é responsável por um volume massivo de Resíduos da Construção Civil (RCC) originados em obras de infraestrutura, reformas e novas construções (Souza; Silva, 2023), alcançando a marca de aproximadamente 44 milhões de toneladas geradas no Brasil em 2023 (ABREMA, 2024). Esse expressivo volume de descarte evidencia que o desenvolvimento sustentável não será alcançado sem transformar significativamente a maneira como os espaços urbanos são construídos e gerenciados (Delmondes, 2022).

Essa realidade confronta as diretrizes do ODS 11 da ONU (meta 11.6), no qual o Brasil assumiu o compromisso de reduzir o impacto ambiental negativo *per capita* das cidades até 2030, focando na gestão de resíduos (Nações Unidas Brasil, 2025). No plano nacional, a Resolução nº 448/2012 do Conama (2012) impõe aos geradores a não geração como meta prioritária, seguida pela redução, reutilização e reciclagem do entulho. Assim, a reinserção do RCC na cadeia produtiva — seja como agregados para concreto ou argamassas — torna-se indispensável para aumentar o ciclo de vida dos materiais, preservar reservas naturais de agregados e atenuar a sobrecarga sobre os aterros (Gomes; Poggiali; Azevedo, 2019).

Como resposta a esse desafio, a própria indústria oferece alternativas promissoras de economia circular, destacando-se o aproveitamento do RCC na fabricação de placas cimentícias. Por apresentarem dimensões avantajadas e alta funcionalidade em edificações, esses elementos construtivos tornam-se receptores ideais para o entulho. A incorporação do resíduo como substituto parcial do cimento Portland ou de outros componentes do concreto constitui uma abordagem sustentável de elevado potencial, convertendo um passivo ambiental em um produto de alto valor agregado (Gobbe; Vanderlei, 2022).

O aumento da população mundial, atrelado aos acelerados processos de urbanização e industrialização, tem contribuído significativamente para o aumento da poluição sonora. O excesso de ruído no ambiente construído afeta de forma direta a qualidade de vida das pessoas, podendo elevar os níveis de estresse e prejudicar a saúde humana, consolidando-se como uma séria preocupação de saúde pública e ambiental (Criado *et al.*, 2024). Na construção civil, a transmissão de ruídos entre unidades habitacionais pode ocorrer pelo ar (ruído aéreo) ou ser transmitida pela própria estrutura da edificação (ruído de impacto) através de superfícies rígidas (Silva *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2021).

Nesse contexto, Silva Júnior, Rêgo Silva e Pinheiro (2015) falam que o isolamento

sonoro de vedações e sistemas de piso passou a ser uma das características mais exigidas por projetistas e construtores. Com a entrada em vigor da norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais - ABNT NBR 15575 (2025), tornaram-se obrigatórios os requisitos mínimos de isolamento acústico entre cômodos, visando garantir o conforto do usuário e a valorização do imóvel. A adequação a esses parâmetros normativos impulsionou o desenvolvimento de novas soluções voltadas à atenuação acústica (Silva *et al.*, 2023).

Segundo a ABNT NBR 15575 (2025), quanto ao desempenho acústico, piso e parede são tratados separadamente, cada um por uma parte da norma. A parte 3 impõe critérios de desempenho acústico para pisos, conforme a Tabelas 1 e 2 e a parte 4 trata do desempenho para vedações verticais, com critérios estabelecidos conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 1 - Critério e nível de desempenho mínimo L'nT,w para ruídos de impactos em sistemas de pisos

Elemento de separação	**$L'_{nT,w}$ (dB)**
Sistema de piso de unidades habitacionais autônomas sobre dormitório	≤ 80
Sistema de piso de áreas de uso coletivo sobre dormitórios de unidades habitacionais autônomas	≤ 55

(Fonte: ABNT 15575, 2025)

Tabela 2 - Critério e nível de desempenho mínimo DnT,w para ruídos de impactos em sistemas de pisos

Elemento de separação	**$D_{nT,w}$ (dB)**
Sistema de piso entre unidades habitacionais autônomas, no caso de pelo menos um dos ambientes ser dormitório	≥ 45
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria situados em pavimentos distintos	≥ 40
Sistema de piso entre unidades habitacionais autônomas, nas situações em que não haja ambiente dormitório	≥ 40
Sistema de piso separando dormitório de unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de uso coletivo para atividades de lazer e esportivas.	≥ 45

(Fonte: ABNT 15575, 2025)

Em que:

$L'_{nT,w}$ – nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado

$D_{nT,w}$ – Diferença de nível padronizada ponderada

Tabela 3 - Critério e nível de desempenho mínimo, $D_{2m,nT,w}$, de isolamento de ruído aéreo das vedações externas (dormitórios)

Classe de ruído	**L_{inc} (dB)**	**$D_{2m,nT,w}$ dormitório (dB)**
I	≤ 60	≥ 20
II	61 a 65	≥ 25
III	66 a 70	≥ 30

(Fonte: ABNT 15575, 2025)

Em que:

L_{inc} – nível de pressão sonora incidente na fachada do ambiente

$D_{2m,nT,w}$ – Diferença de nível padronizada ponderada a 2 m de distância da fachada

Segundo Silva *et al.* (2023), os materiais amplamente utilizados nas estruturas e vedações, como os concretos e as argamassas convencionais, caracterizam-se por possuírem alta densidade e elevada rigidez mecânica. Do ponto de vista acústico, essas propriedades promovem um aumento na velocidade de propagação da onda sonora pelo meio sólido, dificultando a mitigação de ruídos de impacto e resultando em um baixo coeficiente de absorção sonora.

Situação semelhante ocorre em sistemas de piso não homogêneos, como as lajes pré-fabricadas executadas com vigotas de concreto e lajotas cerâmicas, onde o meio de propagação do ruído se torna mais complexo em razão de suas características ortotrópicas (Oliveira *et al.,* 2021). Oliveira *et al.* (2021) explicam que, nessas lajes, a transmissão acústica é intensificada nos espaços vazios das lajotas, que permitem a reverberação interna do som e amplificam as ondas sonoras em faixas específicas de frequência. Para compensar o menor isolamento acústico desses sistemas em comparação às lajes de concreto maciço, é frequente a necessidade de intervenções, como a aplicação de contrapisos (que elevam a massa do sistema) ou a instalação de forros suspensos para combater a transmissão de ruído aéreo e de impacto.

Para atender aos desafios normativos sem comprometer a eficiência estrutural, pesquisas recentes têm se concentrado no desenvolvimento de materiais leves e flexíveis para matrizes cimentícias. A utilização de agregados alternativos, além de diminuir a densidade da argamassa, influencia positivamente em suas propriedades acústicas (Silva *et al.*, 2023). Ainda segundo Silva *et al.* (2023), é comprovado que a substituição parcial da areia por materiais como pó de borracha de pneu ou vermiculita resulta em uma considerável diminuição na velocidade de propagação de ondas sonoras na argamassa. A argamassa contendo pó de borracha (um resíduo

industrial) demonstra um potencial ainda maior na redução dessa velocidade quando comparada ao uso da vermiculita (um mineral natural), unindo conforto acústico à sustentabilidade.

Adicionalmente, conforme apontam Criado *et al.* (2024), os sistemas construtivos a seco têm se beneficiado do uso de placas cimentícias como elemento de vedação externa e interna. Embora as placas cimentícias ofereçam um bom fechamento, seu desempenho isolante pode ser otimizado através do preenchimento dos vazios internos (como em painéis de *Wood Frame*) com materiais não convencionais. A aplicação de lã de rocha, lã de vidro e lã de PET em conjunto com as placas cimentícias demonstra elevada eficiência na absorção de ruídos e na atenuação do som vindo do ambiente externo. Entre essas opções, a lã de rocha tem se mostrado a mais eficaz tanto em absorção quanto em atenuação acústica para esse tipo de sistema.

Ao pesquisar por estudos sobre a aplicação de placas fabricadas com argamassas de cimento Portland e incorporação de resíduos de construção civil, houve dificuldade de encontrar resultados específicos sobre esse tema, havendo vasto estudo sobre a utilização de RCC, porém sem que houvesse aplicação específica em placas cimentícias, pois sua utilização é comumente vinculada à produção de concretos para blocos ou na utilização como agregado para argamassas de revestimento. Deste modo, há um potencial significativo ao explorar a utilização desses resíduos como um recurso valioso na fabricação de painéis cimentícios, o que poderia levar ao desenvolvimento de novas soluções sustentáveis na indústria da construção.

A pesquisa contribuirá significativamente para uma compreensão mais aprofundada das propriedades físico-mecânicas e da durabilidade de materiais cimentícios modificados com resíduos da construção civil. Os resultados obtidos podem levar ao desenvolvimento de novas formulações e metodologias para o uso de materiais alternativos, expandindo, assim, o corpo de conhecimento sobre materiais de construção sustentáveis e a economia circular.

Do ponto de vista tecnológico, a pesquisa tem o potencial de desenvolver um produto inovador: placas cimentícias mais sustentáveis e com desempenho comprovadamente indicado para aplicações específicas. Ao caracterizar os resíduos e otimizar os traços de argamassa, o estudo fornecerá dados cruciais para a produção em escala industrial desses novos materiais. Isso pode resultar em avanços significativos nas técnicas de fabricação e na diversificação da oferta de produtos no mercado da construção civil, oferecendo alternativas de alto valor agregado e com um impacto ambiental muito menor.

A relevância ambiental é, sem dúvida, um dos pilares centrais desta pesquisa. Resíduos da construção civil podem representar mais de 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos de uma cidade brasileira (Souza; Silva, 2023). A incorporação desses resíduos em novos produtos, como as placas cimentícias, contribui diretamente para a redução drástica da

quantidade de entulho descartado em aterros. Além disso, ao utilizar materiais reciclados, esta pesquisa evidencia uma oportunidade de diminuição da demanda por matérias-primas virgens, o que pode resultar na economia de recursos naturais e na redução da energia consumida nos processos de extração e beneficiamento desses materiais.

Economicamente, a pesquisa pode gerar benefícios substanciais. A utilização de resíduos da construção civil como matéria-prima para placas cimentícias pode reduzir significativamente os custos de produção. Os resíduos, que de outra forma teriam custos associados ao seu descarte, transformam-se em um insumo de baixo custo. Essa redução de custos pode tornar o produto final mais competitivo no mercado, incentivando sua adoção em larga escala. Além disso, a pesquisa tem o potencial de impulsionar a criação de novas cadeias de valor e fomentar a inovação em toda a indústria da construção, gerando, consequentemente, novas oportunidades de negócios e empregos relacionados à reciclagem de resíduos e à produção de materiais sustentáveis.

Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a viabilidade técnica e ambiental da produção de placas cimentícias com diferentes teores de resíduos da construção civil, analisando suas propriedades físicas para propor uma destinação sustentável a esses materiais.

Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, a pesquisa tem como objetivos específicos:

a) Caracterizar física e quimicamente os resíduos de construção civil (RCC) e a areia utilizada como padrão de referência (por meio de análise granulométrica, densidade, MEV, EDS e DRX);

b) Dosar os traços de argamassa para placas cimentícias com variados percentuais de substituição do agregado convencional por RCC e além de diferentes fatores água/cimento; avaliar as propriedades do estado fresco, focando na trabalhabilidade e consistência;

c) Determinar o desempenho do material endurecido em corpos de prova cilíndricos e placas, mensurando a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água e atenuação sonora.

CAPÍTULO I

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Resíduos da Construção Civil (RCC)

Os Resíduos da Construção Civil (RCC) são, de forma geral, considerados de baixa periculosidade, sendo o grande volume gerado o seu principal impacto ambiental. No entanto, é importante ressaltar que os RCC podem conter diversos outros materiais, como orgânicos, produtos perigosos e embalagens variadas. Esses componentes podem, ao acumular água, favorecer a proliferação de insetos e outros vetores de doenças, o que representa um risco à saúde pública (Cardoso; Galatto; Guadagnin, 2014).

1.1.1. Normatização e classificação dos RCC

A utilização segura e adequada dos resíduos, em conformidade com os padrões de qualidade exigidos, é um pilar fundamental para a sustentabilidade e a eficiência na gestão de materiais. No Brasil, diversas legislações estabelecem as diretrizes para a gestão, transporte e utilização desses resíduos, garantindo que seu manuseio e sua aplicação sigam normas técnicas e ambientais rigorosas, buscando padronizar as atividades pertinentes a este setor.

Entre as principais regulamentações que norteiam essas práticas, destacam-se:

d) Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010): Esta é a legislação mais abrangente no que tange à gestão de resíduos no país. Ela institui a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, define a hierarquia de gestão de resíduos (não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos) e estabelece instrumentos para a implementação da gestão integrada de resíduos sólidos. A PNRS é crucial para a valorização de resíduos como matéria-prima e para a prevenção da poluição ambiental.

e) Resolução CONAMA nº 307 (2002): Especificamente voltada para os Resíduos da Construção Civil (RCC), esta resolução estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão desses resíduos. Ela define a classificação dos RCC (Classes A, B, C e D), detalha as responsabilidades dos geradores e transportadores, e incentiva a reciclagem e a reutilização, visando a redução do descarte inadequado e a promoção do reaproveitamento de materiais.

f) Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): Diversas normas da ABNT são essenciais para a segurança e a qualidade na utilização de resíduos. Entre elas, a ABNT NBR 10004 (2024) - Resíduos Sólidos – Classificação, que categoriza os resíduos em perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II), é fundamental para determinar o manuseio

e a destinação adequados. Outras normas específicas, como aquelas que tratam da utilização de agregados reciclados em concretos e argamassas, também são cruciais para garantir a conformidade técnica dos produtos gerados a partir de resíduos.

Essas e outras leis e normas vigentes no Brasil são fundamentais para garantir que os resíduos produzidos na construção civil sejam transportados, separados, acondicionados e, finalmente, reutilizados na fabricação de novos produtos para a própria construção civil ou para outras finalidades. Esse arcabouço legal incentiva a economia circular e a valorização dos resíduos como recursos, contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável.

A Resolução CONAMA nº 307, de 2002, estabelece uma definição clara para os resíduos da construção civil. Segundo a norma, são considerados RCC aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, bem como os resultantes da preparação e escavação de terrenos. Exemplos comuns incluem: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações e fiação elétrica. Esses materiais são popularmente conhecidos como entulhos de obras, caliça ou metralha. Os RCC são categorizados nas seguintes classes (CONAMA, 2002):

a) Classe A: Engloba os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados. Nesta classe, encontram-se: Resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e outras obras de infraestrutura, incluindo solos provenientes de terraplanagem; Resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, como componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto; Resíduos de processos de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios, etc.) produzidas nos próprios canteiros de obras.

b) Classe B: Compreende os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.

c) Classe C: Destina-se aos resíduos para os quais ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem ou recuperação.

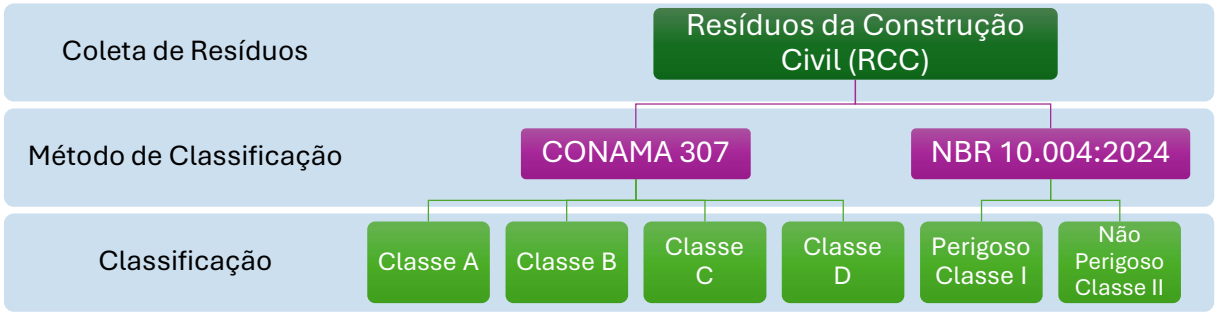
d) Classe D: Abrange os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, como tintas, solventes, óleos e outros. Inclui também aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, provenientes de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros locais, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

A Norma Brasileira ABNT NBR 10004 (2024), que foi atualizada em 2024, é complementar à Resolução do Conama e estabelece diretrizes para a classificação de resíduos sólidos, dividindo em duas categorias principais. Essa classificação é essencial para o correto gerenciamento e destinação dos materiais, garantindo a proteção do meio ambiente e da saúde pública. A norma divide os resíduos em duas categorias principais: Classe I – Perigosos e Classe II – Não Perigosos.

Ainda de acordo com a mesma norma, as características que conferem periculosidade ao resíduo são as seguintes: Inflamabilidade, Corrosividade, Reatividade, Patogenicidade, Toxidade.

Considerando as classificações apresentadas, é possível adotar um fluxograma específico para a correta classificação dos resíduos, visando uma gestão mais eficaz e segura, conforme Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de Classificação dos Resíduos de Construção Civil, segundo ABNT NBR 10.004 (2024)



(Fonte: Elaborado pelo próprio autor)

Para fins de enquadramento regulatório e viabilidade ambiental, o resíduo misto (concreto, argamassa, tijolos e outros constituintes) utilizado nesta pesquisa foi classificado como Resíduo Classe II (não perigoso) conforme a ABNT NBR 10004 (2024) e como Classe A nos termos da Resolução CONAMA nº 307/2002. Esta dupla classificação fundamenta-se no fato de o material não apresentar características de periculosidade, enquadrando-se perfeitamente entre os resíduos reutilizáveis e recicláveis da construção civil destinados ao aproveitamento como agregados alternativos.

1.1.2. Geração e manejo de RCC no Brasil e no mundo

A construção civil desempenha um papel fundamental no panorama econômico global, atuando como um vetor direto para o crescimento e o desenvolvimento das nações. No contexto

brasileiro, essa relevância é expressiva: o setor responde por aproximadamente 3,6% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, segundo dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) (ABRECON, 2020). Somada à sua contribuição macroeconômica, a cadeia construtiva consolida-se como uma expressiva geradora de postos de trabalho. Em 2021, a CBIC registrou que o setor foi responsável por 7,87% da população ocupada no Brasil, evidenciando sua ampla capilaridade e impacto econômico em todo o território nacional (CBIC, 2025).

Contudo, a magnitude da atuação do setor traz consigo um desafio ambiental intrínseco: a expressiva geração de resíduos. O contínuo crescimento e a modernização urbana vêm acompanhados por um volume vertiginoso de rejeitos oriundos de obras e demolições, denominados Resíduos da Construção Civil (RCC). Tais resíduos representam uma parcela expressiva da totalidade de resíduos sólidos urbanos produzidos, oscilando entre 30% e 50% desse volume (Delmondes, 2022).

Nesse contexto, a gestão dos RCC exige atenção e estratégias específicas, tanto por suas particularidades físicas quanto pelos severos impactos ambientais decorrentes de sua disposição inadequada. Embora uma fração menor desses resíduos seja constituída por materiais recicláveis como plástico, papel, papelão e madeira, sua maior parte engloba entulhos minerais. Estes materiais, contudo, apresentam elevado potencial de processamento e reutilização na forma de agregados para a produção de novos concretos e argamassas, o que reforça a relevância de práticas eficientes de reciclagem e gestão (Delmondes, 2022).

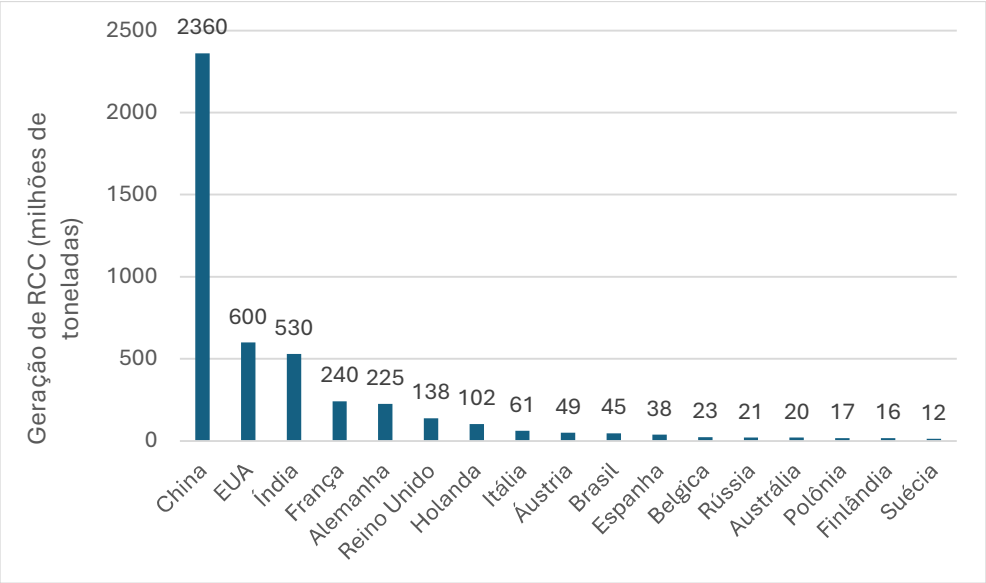
Nos últimos anos, o uso de materiais reciclados no setor da construção civil tem atraído interesse crescente. Alguns pesquisadores têm enfatizado os potenciais benefícios econômicos e ambientais e as excelentes propriedades físicas e mecânicas derivadas do uso de agregados artificiais leves para a produção de concreto (Fagundes *et al.*, 2023)

Apesar do potencial de reaproveitamento, o aumento exponencial na massa de rejeitos tem impulsionado, em diversos países, a prática recorrente do despejo ilegal de RCC em aterros sem qualquer tipo de pré-tratamento (Wang *et al*., 2021). A ausência de critérios e controle na destinação final desses resíduos configura um desafio socioeconômico e ambiental urgente (Wang *et al*., 2021), cuja escala e magnitude global podem ser dimensionadas a partir dos volumes totais e per capita expostos nas Figuras 2 e 3.

Paralelamente à geração de resíduos, a alta demanda da construção civil por recursos naturais primários via mineração causa graves desequilíbrios ecológicos (Gobbe; Vanderlei, 2022). Diante desse cenário, a incorporação dos princípios de redução, reutilização e reciclagem firma-se como pilar indispensável para uma gestão sustentável (Cunha *et al*., 2023). Especificamente, a reciclagem de Resíduos da Construção Civil (RCC) — para substituição do

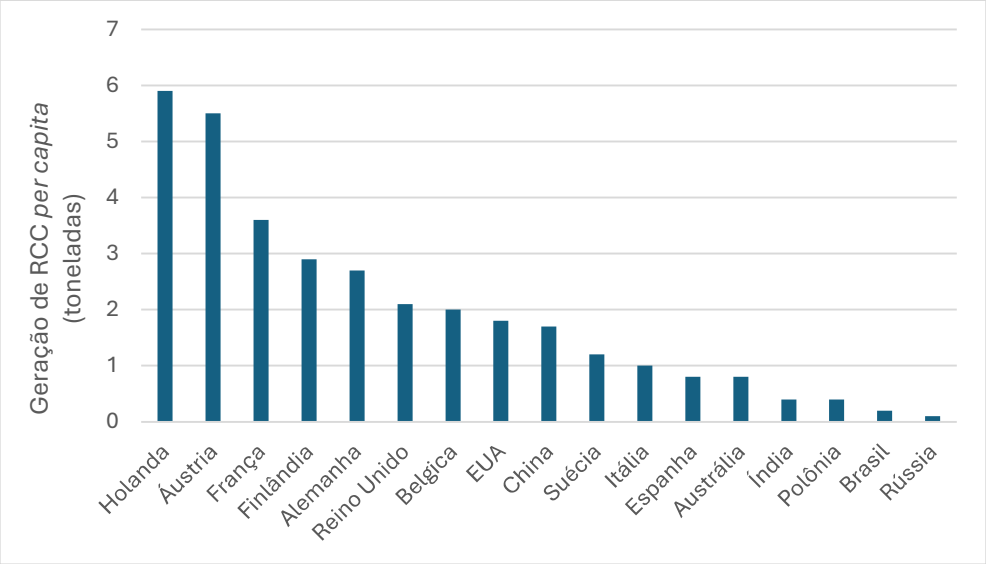
cimento Portland ou produção de agregados — destaca-se por mitigar os impactos ambientais em todas as etapas do ciclo de vida das edificações (Gobbe; Vanderlei, 2022).

Figura 2 - A produção de RCC dos maiores produtores do mundo- dados de 2018



(Fonte: Wang *et al*.,2021)

Figura 3 - Produção de RCC por população



(Fonte: Wang *et al*., 2021)

O manejo e o beneficiamento do RCC ocorrem em obras ou usinas recicladoras, cujas estruturas variam em complexidade segundo o volume recebido, a demanda de mercado e as especificações do produto final (Tenório, 2007). No entanto, no Brasil, a produção efetiva de

agregados reciclados (AR) atua consistentemente abaixo da capacidade máxima instalada (ABRECON, 2020). A Tabela 4 evidencia essa subutilização e demonstra a evolução da reciclagem do setor entre 2013 e 2020.

Tabela 4 - Índices de reciclagem do RCC e capacidade produtiva das usinas brasileiras.

Índice	2013	2014/2015	2017/2018	2019/2020
Geração de Resíduo Anual (mi de t)	100,52	102,23	103,83	105,07
Produção de AR extrapolada (mi de t/ano)	19,83	20,71	15,68	16,94
Índice de reciclagem (AR produzido/RCC gerado) – Extrapolado (%)	19,7	20,3	15,1	16,1
Capacidade máxima de produção de AR - extrapolada (mi de t/ano)	42,19	46,03	44,80	50,49
Capacidade máxima de reciclagem (cap. Máx/geração RCC) – Extrapolada (%)	42,0	45,0	43,1	48,0

(Fonte: ABRECON,2020)

Para reverter essa defasagem, a economia circular propõe otimizar os processos produtivos ao priorizar insumos reciclados e diminuir a dependência de matérias-primas virgens, destacando-se políticas como a Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) (Cunha *et al*., 2023). Contudo, uma gestão verdadeiramente eficiente exige considerar também os custos ambientais, que envolvem investimentos em conformidade normativa, recuperação ecossistêmica e compensação de danos causados à sociedade (Dezordi; Vieira; Sausen, 2017).

1.1.3. Técnicas de beneficiamento e processamento de RCC

A reciclagem de Resíduos da Construção Civil (RCC) é um processo multifacetado que abrange desde a coleta até a estocagem final do material reciclado. O cerne dessa reciclagem reside em etapas fundamentais como a triagem, britagem, peneiramento e estocagem (Tabosa *et al.*, 2021).

É importante notar que a composição dos RCC varia significativamente em função das características específicas de cada cidade ou região, incluindo fatores como geologia, morfologia, disponibilidade de materiais de construção e desenvolvimento tecnológico. Essa heterogeneidade nos resíduos gerados em uma obra ressalta a importância de um gerenciamento adaptado a cada contexto (Lima; Lima, 2012).

A transformação dos Resíduos de Construção Civil em agregados nas usinas de reciclagem guarda muitas semelhanças com o processo de obtenção de agregados naturais.

Dessa forma, os equipamentos tradicionalmente utilizados na produção de agregados naturais podem ser diretamente empregados, ou adaptados, para a reciclagem de RCC. A linha de produção de agregados reciclados consiste em operações unitárias comuns à engenharia de minas no tratamento de minérios, que podem incluir processos de cominuição (fragmentação), separação de tamanho (peneiramento e classificação) e concentração (Tenório, 2007).

Dentro do processo de beneficiamento, a cominuição é uma etapa muito importante que envolve a fragmentação do material em partículas menores. Esse processo visa facilitar a separação dos minerais desejados, aumentar a área específica dos materiais, adequá-los para transporte ou, em alguns casos, possibilitar sua comercialização direta (Bezerra;Ferreira, 2025).

Para a separação dos materiais por tamanho, o peneiramento é o método mais frequentemente empregado, sendo o material separado com base no tamanho geométrico de suas partículas. Já no método de classificação, a separação é realizada considerando a velocidade com que as partículas atravessam um meio fluido (Correia; Couto, 2018).

Em se tratando da seleção de agregados eficazes, no caso dos resíduos de construção civil que possui diferentes tipos de materiais misturados (Figura 4), é fundamental que o material seja segregado de maneira adequada já na origem, ou, de forma alternativa, submetido a um eficiente processo de triagem nas usinas de reciclagem, como por meio de separação das partículas utilizando a operação de concentração, que tem como objetivo aumentar a concentração da espécie de material de interesse, através da remoção de materiais não aproveitados. Essa separação seletiva dos materiais baseia-se nas diferenças entre suas propriedades físicas e químicas, das quais se destacam o peso específico, a suscetibilidade magnética, a condutividade elétrica, as propriedades químicas de superfície, a cor, a radioatividade, a forma e outras características intrínsecas (Tenório, 2007; Angulo; Figueiredo, 2022).

Apesar das vantagens econômicas e ambientais, a consolidação desse mercado enfrenta entraves operacionais nas usinas — como infraestrutura logística precária, processos manuais e baixa qualificação técnica —, o que limita a aceitação comercial do agregado reciclado mesmo diante de seu menor custo (Cunha *et al*., 2023).

Figura 4 - Imagem que demonstra a heterogeneidade dos RCC



(Fonte: Elaborado pelo próprio autor)

1.1.4. Aplicações de RCC em materiais de construção

O uso de agregados reciclados de Resíduos da Construção Civil (RCC) consolida-se como uma necessidade premente para o setor construtivo, maior consumidor de matérias-primas entre as indústrias (Angulo; Figueiredo, 2022). No entanto, no Brasil, a reciclagem ainda é vista como uma sobrecarga de trabalho e entrave ao cumprimento de prazos, em vez de ser integrada ao planejamento das obras (Lima; Lima, 2012). Essa resistência reflete também limitações técnicas: a heterogeneidade da composição, a menor resistência mecânica e a variabilidade das propriedades físicas do agregado reciclado comprometem sua confiabilidade em aplicações de maior valor e responsabilidade, como nos concretos estruturais (Tenório, 2007).

Para superar tais limitações e viabilizar o reaproveitamento, a caracterização rigorosa do RCC é indispensável para definir o tratamento e a destinação adequados (Dutra *et al*., 2023). Após as etapas de britagem, peneiramento e descontaminação, esses materiais encontram diversas finalidades, incluindo aterros, sistemas de drenagem, sub-bases viárias e novos concretos ou argamassas (Bazuco, 1999) — aplicação cujos primeiros registros históricos remetem ao aproveitamento de escombros no pós-Segunda Guerra Mundial (Wang *et al*., 2021).

Do ponto de vista socioeconômico, a valorização do RCC reduz custos operacionais, impulsiona a economia local e gera emprego e renda na cadeia de edificação, reforma e

demolição (Cunha *et al*., 2023). Sob o aspecto ambiental, embora o uso do agregado reciclado não reduza expressivamente as emissões de CO_2 quando o cimento permanece como ligante exclusivo, sua utilização maximizada diminui a pressão sobre as reservas minerais naturais e previne a contaminação ambiental (Farooq *et al*., 2023). Nesse contexto, pesquisas vêm explorando a viabilidade de incorporar o RCC em componentes específicos, como blocos de pavimentação (Tabela 5), buscando aliar a destinação sustentável de resíduos ao desempenho técnico adequado dos materiais (Farooq *et al*., 2023).

Tabela 5 - Trabalhos que tratam da utilização de resíduos para a fabricação de pavers

Trabalho / Autores	Tipo de Bloco / Pavimento	Materiais / Adições Utilizadas	Parâmetros Avaliados	Resultados Principais
Farooq *et al*. (2023)	*Paver* rígido intertravado	100% RCA (miúdo e graúdo) + 15–20% cimento	Resistência à compressão, flexão, absorção de água, retração e ataque químico	Alcançou 35 MPa (7d) e ~55 MPa (28d) com prensagem de 20 MPa; absorção de água de 6,34%; alta resistência a sais e ácidos.
Pereira Neto *et al*. (2026)	*Paver* permeável modular com furos	Concreto com furos (design sextavado, 6 furos D=20mm)	Permeabilidade/infiltração, resistência mecânica e manutenção	Boa permeabilidade k = 10^{-3} m/s hidrológico; resistência adequada para calçadas e tráfego leve (20 a 11 MPa).
Tavares & Kazmierczak (2016)	Concreto permeável para pavimentação	Agregado Reciclado de Concreto (ARC) + Fibras de vidro	Coeficiente de permeabilidade, resistência à compressão e microestrutura	Permeabilidade de k > 10^{-4} m/s; a adição de fibras elevou a resistência para 20–22 MPa.
Wang *et al*. (2021)	Revisão sobre blocos e pavimentos	Agregados reciclados de RCD (ARC, tijolos e mistos)	Propriedades mecânicas, durabilidade e viabilidade econômica	Valida a aplicação de RCD para pavimentação não estrutural, reduzindo a extração de agregados naturais.

(Fonte: Elaborado pelo próprio autor)

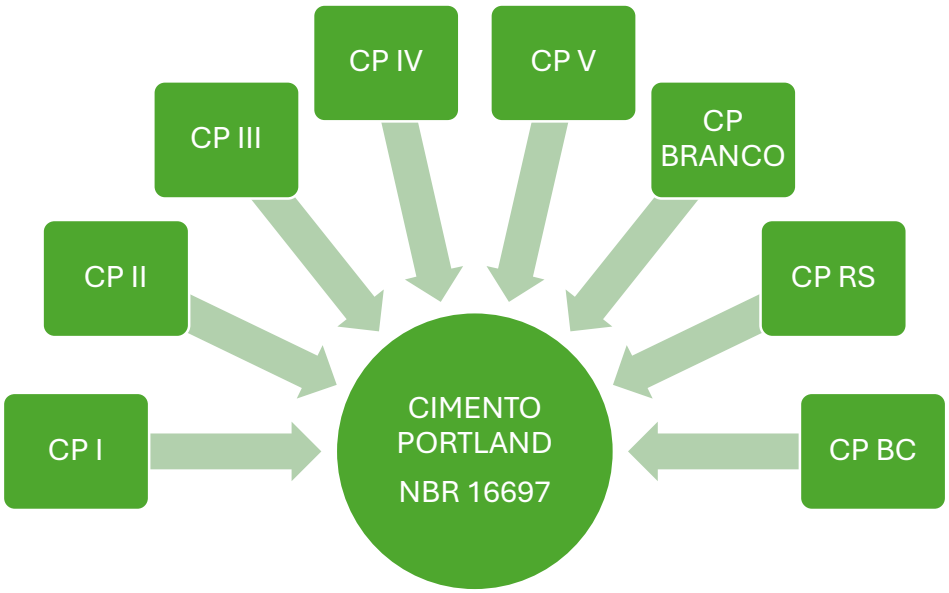
Conforme pode ser observado nos trabalhos indicados, entre os materiais investigados, destacam-se os RCC (tanto finos quanto grossos, compostos somente por concreto, tijolos ou mistos) e a fibra de vidro. O objetivo desses estudos é compreender como a incorporação desses resíduos afeta as características físicas, mecânicas e de durabilidade dos blocos, buscando a otimização de suas propriedades e a promoção da economia circular na construção civil.

1.2. Materiais Cimentícios e Agregados

1.2.1. Cimento Portland: Tipos, composição e reações de hidratação

De acordo com a norma ABNT NBR 16697 (2018), o Cimento Portland é classificado em oito classes distintas (Figura 5), baseadas principalmente em sua composição e nas adições minerais que podem ser incorporadas durante o processo de fabricação. Essas adições conferem características específicas a cada tipo de cimento, influenciando propriedades como resistência inicial, calor de hidratação, durabilidade e resistência a ambientes agressivos.

Figura 5 - Classificação do Cimento Portland



(Fonte: Elaborado pelo próprio autor)

Conforme descrito por Ribeiro *et al.* (2021), as classificações determinadas pela NBR 16697 (2018) podem ser descritas da seguinte forma:

a) CPI – Cimento Portland Comum - É um ligante hidráulico composto basicamente por argila e calcário, ao qual se adiciona 5% de sulfato de cálcio (gipsita), podendo apresentar até 5% de material pozolânico. Essa classe de cimento é considerada a mais simples, sendo indicada para obras usuais, que não possuam qualquer exigência especial para o cimento.

b) CPII – Cimento Portland Composto - É um ligante hidráulico que, além de sua composição básica (clinquer + gipsita), apresenta a adição de outros materiais, tornando-se um cimento com menor calor de hidratação e teor de clínquer. A norma subdivide essa classe de

cimento em CP II-E, CP II-F e CP II-Z, aos quais foram adicionadas à composição básica escória de alto-forno, filer de calcário e pozolana, respectivamente.

c) CPIII – Cimento Portland de Alto-forno - Essa classe de cimento diferencia-se do CP II-E por apresentar adição de escória de alto-forno em teores mais elevados (35 a 75%), além de até 10% de material carbonático. Esse tipo de cimento apresenta baixo calor de hidratação, além de maior durabilidade, com alta resistência à expansão devido à reação álcali agregado.

d) CP IV – Cimento Portland Pozolânico - Os materiais pozolânicos, ao contrário das escorias granuladas de alto-forno, não reagem com a água e, quando finalmente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água, possibilitando a formação de compostos com propriedades aglomerantes. Essa classe se diferencia do CP II-Z por apresentar adição de pozolanas em teores mais elevados (15 a 50%), além de até 10% de material carbonático.

e) CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - O cimento Portland de alta resistência inicial tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da reação. O desenvolvimento de alta resistência inicial é consequência de uma dosagem diferente de calcário e argila, o que permite produzir um clínquer com alto teor de aluminatos. Esta classe não contém adições, porém pode conter até 10% de material carbonático.

f) CP Branco – Cimento Portland Branco - O cimento branco é produzido a partir de um clínquer dosado com menor quantidade de ferro. Os teores de óxido de ferro e manganês desse cimento devem ser inferiores a 0,5%, em massas, o que é possível usando argila e rochas com menor teor desses óxidos em sua composição.

g) CP RS – Cimento Portland Resistente à Sulfatos - Os cimentos Portland resistentes aos sulfatos são aqueles que podem oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados, tais como os encontrados nas redes de esgotos de águas servidas ou industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos. A princípio, qualquer tipo de cimento pode ser RS, desde que obedeçam a algumas condições específicas em sua composição

h) CP BC – Cimento Portland com baixo calor de hidratação - O aumento da temperatura no interior de grandes estruturas de concreto devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento pode levar ao aparecimento de fissuras de origem térmica, que podem ser evitadas se forem usados cimentos com taxas lentas de evolução de calor, os chamados cimentos Portland de baixo calor de hidratação.

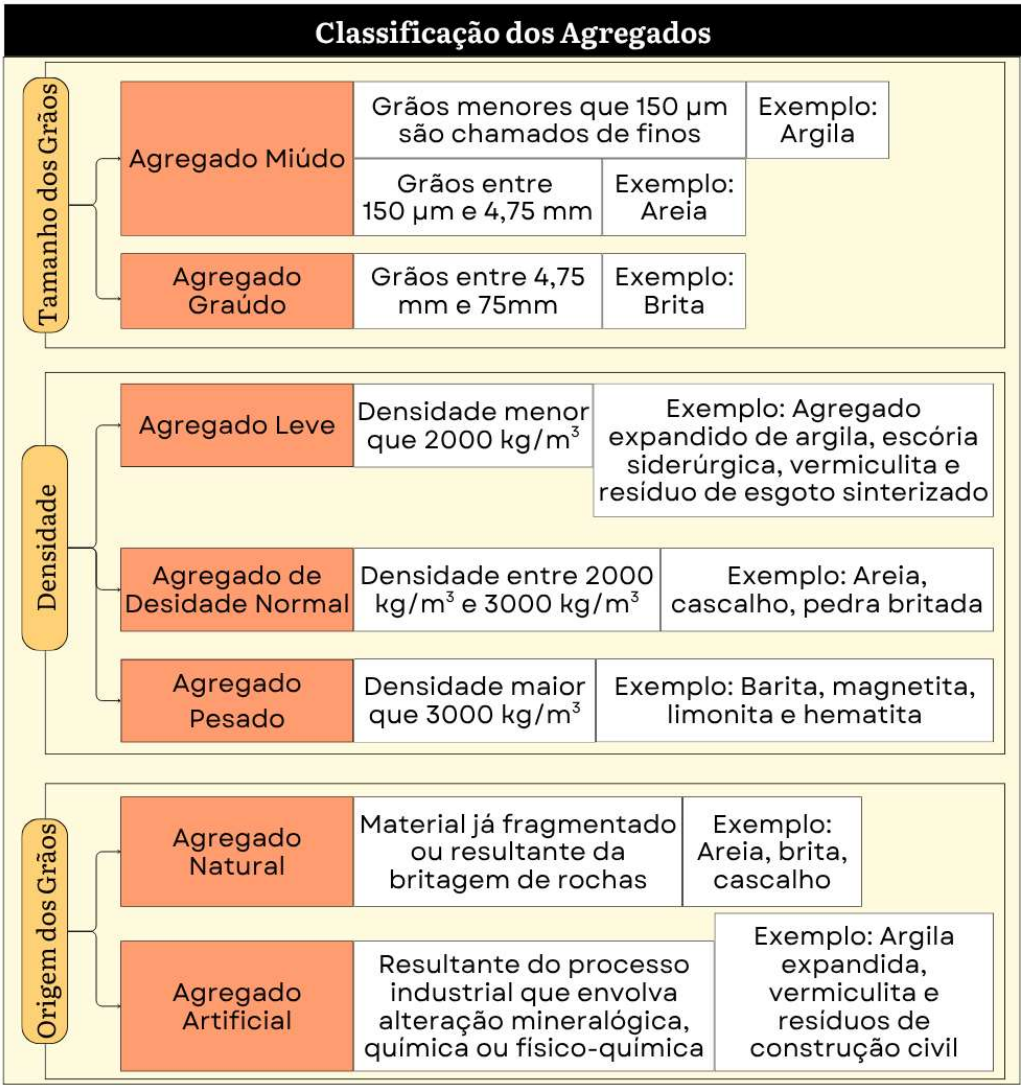
Dessa forma, a NBR 16697 (2018) propõe a fabricação de cimentos com baixo calor de hidratação, isto é, que gerem até 260 J/g e 300 J/g aos três e sete dias de hidratação, respectivamente, podendo se enquadrar em qualquer um dos tipos básicos. Assim, o cimento

Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) é designado por siglas e classes de seu tipo, acrescidas de BC (por exemplo, CP II- E BC), tendo seu uso recomendado para obras que utilizem um volume elevado de concreto, tais como blocos de fundações e barragens.

1.2.2. Agregados naturais: Classificação e funções em concretos e argamassas

A NBR 9935 (2024) diz que o agregado pode ser classificado segundo os tamanhos de suas partículas como graúdos ou miúdos, quanto à sua densidade como leves, de densidade normal ou pesados, e de acordo com a origem de suas partículas como naturais ou artificiais, conforme sumarizado na Figura 6.

Figura 6 - Classificação dos agregados utilizados na construção civil



(Fonte: Elaborado pelo próprio autor)

Para fins de comparação e validação do desempenho da mistura que incorpora agregado reciclado, torna-se imperativa a realização de uma amostra de referência, por este motivo a areia média lavada, material comumente utilizado na produção de argamassas e de fácil obtenção no mercado, foi escolhido para a mistura padrão.

Os agregados naturais são insumos importantes para a construção civil. Estima-se que este setor brasileiro consuma cerca de 210 milhões de toneladas por ano de agregados naturais somente para a produção de concretos e argamassas, e que o volume de recursos naturais utilizados pela construção civil, muitos deles não renováveis, corresponde a pelo menos um terço do total consumido anualmente por toda a sociedade e que, dos 40% da energia consumida mundialmente pela construção civil, aproximadamente 80% concentra-se no beneficiamento, produção e transporte de materiais, alguns deles também geradores de emissões que provocam o aquecimento global, chuva ácida e poluição do ar (Dezordi; Vieira; Sausen, 2017).

O agregado natural pode se apresentar menos lamelar que o agregado reciclado. Partículas finas e achatadas podem reduzir a resistência do concreto quando o agregado tem uma carga aplicada no seu lado achatado. Partículas mais angulares e mais lamelares tendem a prejudicar a consistência do concreto, exigindo, então, mais água ou teor de pasta para que os concretos reciclados alcancem consistência adequada (Tenório, 2007).

Segundo (Bauer, 2025) os agregados influenciam em diversas características dos concretos e argamassas, sendo elas: resistência à compressão, retração, durabilidade, trabalhabilidade, permeabilidade e higroscopia.

A Norma ABNT NBR 9935 (2024) descreve o agregado natural como material granular de origem natural, já encontrado fragmentado ou resultante da britagem de rochas, classificado em função da dimensão granulométrica conforme a ABNT NBR 7211 (2024). A Figura 7 mostra um método de extração de areia natural chamado de lavra de areia.

Figura 7 - Lavra de areia para obtenção de areia natural



(Fonte: Neossolu Engenharia e Meio Ambiente, 2025)

A dependência sistêmica da areia lavada convencional tem gerado uma pressão imensa sobre as reservas naturais. A extração desses materiais, realizada majoritariamente em leitos de rios e em cavas de areais, é um processo classificado como altamente agressivo ao meio ambiente. A mineração e a exploração de jazidas de areia exigem a remoção de grandes volumes de terra e causam danos ambientais severos, que incluem a degradação e alteração da paisagem, a erosão do solo, o desmatamento e até mesmo o desequilíbrio completo do ecossistema das regiões exploradas (Gobbe; Vanderlei, 2022;). Além disso, a intensa atividade exploratória tem levado as jazidas mais acessíveis à rápida exaustão, evidenciando que a velocidade de produção natural desses recursos geológicos é incompatível e muito menor do que a demanda atual do mercado (Gobbe; Vanderlei, 2022). A Figura 8 mostra a grande quantidade de cavas realizadas para a lavra de areia lavada em areal localizado no Município de Seropédica/RJ.

Figura 8 - Areal localizado no Município de Seropédica/RJ



(Fonte: ACCAMTAS, 2026)

Diante deste cenário de esgotamento das jazidas e dos impactos provenientes da extração em areais, torna-se insustentável manter o atual modelo produtivo de exploração mineral. Desta forma, o gerenciamento e a reciclagem de resíduos sólidos despontam não apenas como uma alternativa de descarte correto, mas como uma necessidade latente para a preservação ambiental.

1.3. Placas Cimentícias

As placas cimentícias são peças pré-fabricadas utilizadas principalmente para vedação

de construções e apresentam determinadas características superiores em relação a outros materiais com a mesma função, como os blocos (Pilz *et al.*, 2020).

No contexto da produção de placas de cimento para aplicação em paredes na construção civil, grande parte dos estudos aborda placas fabricadas com cimento Portland e areia ou com cimento oxicloreto de magnésio (Soares *et al.*, 2024).

Existem vários estudos que tratam do reaproveitamento de RCC para a produção de concretos e argamassas, porém existem poucos registros de estudos que investiguem, de forma aprofundada, a utilização de resíduos provenientes da construção civil como substituição parcial ou total de agregados tradicionais em argamassas destinadas à fabricação especificamente de placas cimentícias para revestimento. Deste modo, aspectos como propriedades mecânicas, desempenho físico-químico e viabilidade técnica/econômica para aplicação de placas cimentícias não foram encontrados na literatura.

Ao analisar a Norma NBR 15498 (2026), foi possível observar que as chapas cimentícias são classificadas em três categorias distintas, de acordo com sua utilização. A Categoria A engloba as chapas destinadas a aplicações externas que estarão diretamente expostas a intempéries como sol, chuva, congelamento ou neve. Já a Categoria B refere-se às chapas para uso externo que, embora não expostas diretamente à ação de intempéries, podem suportar umidade, calor e congelamento ocasional. Por fim, a Categoria C abrange as chapas para aplicações internas, como paredes, pisos, forros e substratos, as quais podem ser expostas ao calor e à umidade, mas não ao congelamento.

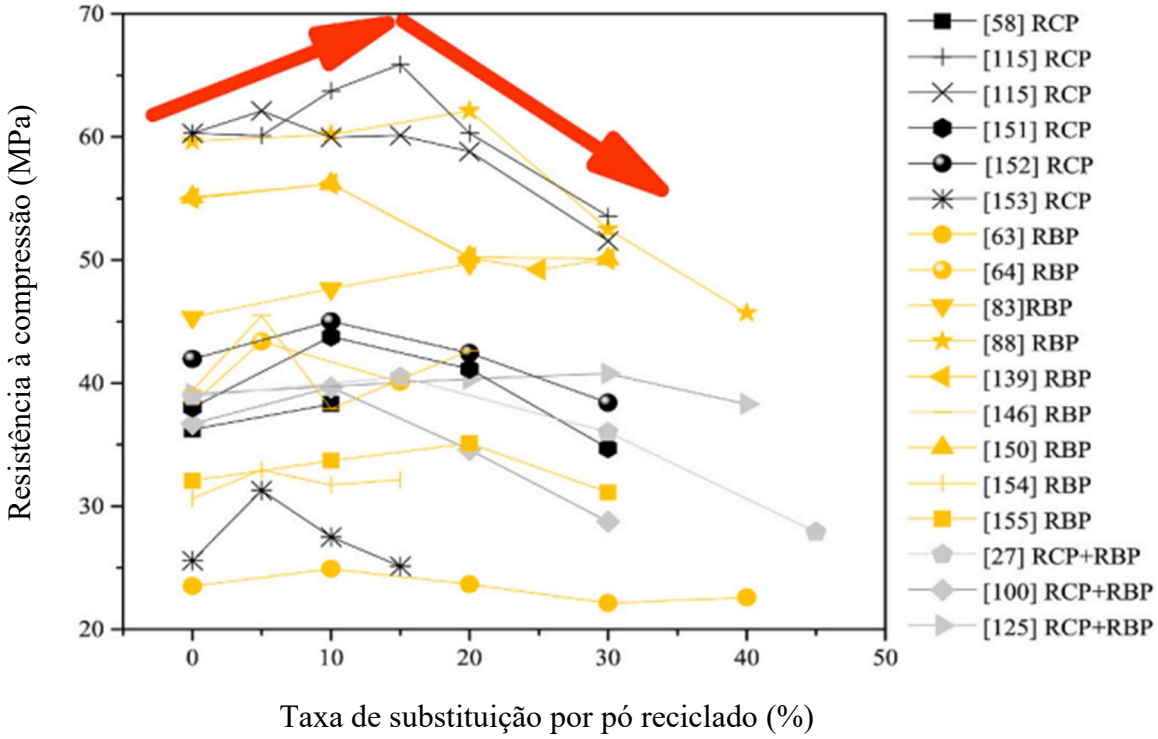
1.4. Incorporação de RCC nas propriedades de concretos e argamassas

De forma geral, a resistência à compressão tende a diminuir à medida que a taxa de inserção dos resíduos de concreto e tijolo aumentam. Porém, esse efeito negativo pode ser amenizado com o aumento do tempo de cura, uma moagem mais intensa das partículas e a incorporação de um conteúdo apropriado (Gobbe; Vanderlei, 2022).

Tang *et al.* (2020) observa que em experimentos observados após 28 dias, quando há uma substituição, na ordem de 15%, de agregado natural por pó de agregado reciclado com finura superior à finura do cimento, ocorre o aumento da resistência à compressão. Este incremento ocorre, pois o pó de material reciclado melhora a estrutura dos poros, inclusive atuando como núcleo de formação de C-S-H (Hidratos de Silicato de Cálcio), ajudando significativamente na resistência à compressão do concreto reciclado. Com o aumento da idade de cura a água livre absorvida pelo pó reciclado pode ser liberada para o material cimentício

mais próximo, o que promove a reação de hidratação e melhora a resistência do concreto, conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Resistência à compressão da argamassa e do concreto com pó reciclado



(Fonte: Tang *et al*., 2020)

Ainda sobre a Figura 9, é possível observar traços com diferentes proporções de agregados reciclados, os traços compostos somente por pó de concreto reciclado (RCP – curva preta) possuem comportamento mais homogêneo em comparação com traços constituídos de agregados compostos somente por pó de tijolo reciclado (RBP – curva amarela) ou traços com pó resultante da mistura entre concreto e tijolo reciclados (RCP+RBP – curva cinza). Esta análise é fruto da comparação realizada por Tang *et al.* (2020) entre diversos trabalhos que utilizam pó de concreto reciclado e pó de tijolo reciclado em traços que produzem concretos ou argamassas com resistências à compressão diferentes.

Por se tratar de uma revisão bibliográfica, Tang *et al.* (2020) identificaram cada referência com uma numeração ao lado do conjunto de composições avaliado por cada um dos estudos, podendo ser observado que a variação presente nos resultados de resistência à compressão para misturas contendo o mesmo tipo de pó reciclado (seja RCP, RBP ou RCP+RBP) ocorre porque a resistência mecânica final depende de um conjunto de fatores físicos, químicos, de dosagem e de processamento que variam entre as diferentes pesquisas

analisadas.

O uso de grandes quantidades de agregados reciclados graúdos em concretos pode ser viabilizado por meio do uso de adições minerais, como: sílica ativa, escória granulada de alto forno, cinza volante, metacaulim e as cinzas de bagaço de cana, casca de arros e casca de eucalipto. O aproveitamento desses materiais, de acordo com a disponibilidade de cada região, pode tornar o concreto um material mais sustentável, reduzindo os impactos da extração de matéria prima e do descarte de resíduos (Gomes; Poggiali; Azevedo, 2019). Neste sentido, a adição desse tipo de material em argamassas compostas por agregados reciclados também pode provocar a melhoria de sua resistência mecânicas.

No estudo em que foram produzidas placas cimentícias com adição de RCC e lama de mármores e granitos, elas apresentaram resultados satisfatórios em sua estabilização, porém seu acabamento superficial ainda apresentou-se poroso, esta característica da superfície pode ser explicada por conta do empacotamento das partículas, já que o formato irregular dessas partículas pode impedir o preenchimento completo das lacunas e um empacotamento adequado, além do método de produção que, utilizando-se de compactação manual da mistura não obteve a homogeneização esperada (Marques *et al.*, 2017).

Ao analisar a estrutura de concretos com agregados reciclados, Aragão, *et al.* (2007) observaram que, no estudo de peças estruturais moldadas com concreto reciclado, apesar da matriz cimentícia e da zona de transição do concreto terem sido melhoradas, houve a percepção de que a partícula do agregado tornou a mistura mais frágil, reduzindo, consequentemente, a resistência da peça estrutural com o aumento da substituição de agregados naturais por agregados reciclados.

No caso de concretos permeáveis, houve a redução significativa da resistência a compressão quando foi experimentada a substituição de agregado natural por agregado reciclado, podendo ter como causa desse decréscimo a existência de microfissuras na região de interface entre o agregado reciclado e a matriz de cimentícia. Porém foi observado que houve boa aderência entre a argamassa antiga e a nova argamassa, o que pode ser explicado por uma provável penetração da pasta de cimento nos poros e fissuras existentes no material reciclado (Tavares; Kazmierczak, 2016).

No trabalho de Yang *et al*. (2023), o desempenho do agregado de concreto reciclado foi inferior ao do agregado natural, podendo ser explicado pela existência de camada de argamassa antiga porosa e solta aderida à superfície do material reciclado. Consequentemente, o desempenho do concreto constituído por agregados reciclados diminui com o aumento da proporção de material reciclado, e sua aplicação prática na engenharia permanece limitada a

usos onde a resistência da peça de concreto não precisa ser tão elevada.

Para melhorar o desempenho dos concretos produzidos com Resíduos de Construção Civil, Yang *et al*. (2023) sugerem que um pré-tratamento desse material é crucial, especialmente para reforçar ou remover a argamassa antiga aderida aos agregados. Essa camada porosa e frágil de argamassa velha pode comprometer a interface entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento, e o seu fortalecimento ou eliminação melhora significativamente qualidade do agregado. O resultado é a obtenção de produtos com resistência mecânica superior em comparação com materiais não tratados, o que é fundamental para expandir a aplicação do concreto com RCC em projetos de engenharia que demandam alta performance e durabilidade.

A incorporação de resíduos de construção civil em concretos introduz uma complexidade significativa no que tange à reação álcali-agregado. Isso se deve, principalmente, à reatividade do agregado reciclado quando exposto a um ambiente alcalino, como o proporcionado pela pasta de cimento. Diferente dos agregados naturais, o RCC pode conter sílica reativa proveniente de argamassas antigas ou de certos tipos de agregados que foram utilizados no concreto original. Quando essa sílica reage com os hidróxidos alcalinos presentes na solução dos poros do concreto, forma-se um gel expansivo que pode gerar tensões internas consideráveis, levando à fissuração e à degradação precoce da estrutura. Portanto, a análise e o controle do potencial de reatividade do RCC são etapas críticas no projeto e na produção de concretos duráveis que utilizem esses materiais (Leemann; Sanchez, 2023).

É necessário ter um bom entendimento das propriedades dos materiais reciclados utilizados a fim de controlar o impacto nas propriedades do concreto e da argamassa. Uma vez que o entulho de demolição é um material altamente variável e difícil de controlar, pode ser necessário desenvolver novos sistemas de controle de qualidade para esses materiais. Um melhor controle dos testes que medem o teor de argamassa residual pode ser usado para implementar o controle de qualidade de agregados reciclados de acordo com seu teor de argamassa residual. Esse teor de argamassa residual tem uma correlação direta com a qualidade do agregado reciclado, a partir da qual é possível avaliar rapidamente sua qualidade (Amer *et al.*, 2024).

Para Cabral (2007), a substituição do agregado natural pelo reciclado resultou em redução da resistência à compressão dos concretos, exceto no caso da utilização do agregado miúdo reciclado de cerâmica vermelha, que mesmo apresentando pouca influência atuou no aumento da resistência à compressão. A troca do agregado graúdo natural pelos agregados graúdos reciclados teve um impacto mais significativo na resistência à compressão do que a substituição do agregado miúdo. Já o agregado miúdo reciclado de concreto teve influência

negativa mínima sobre a resistência à compressão, seguido pelo agregado miúdo reciclado de argamassa

O concreto reciclado pode ser utilizado na produção de elementos estruturais tais como: pisos, contramarcos de janelas, painéis e lajes pré-moldadas, desde que observada suas particularidades (sua menor resistência, maior capacidade de deformação e maior permeabilidade), as quais podem vir a ser fatores limitantes em alguns casos (Santana *et al.*, 2011).

Os aditivos plastificantes exercem uma função técnica essencial no aprimoramento e no controle das propriedades dos materiais cimentícios, motivo pelo qual são extensamente investigados no desenvolvimento de argamassas e concretos. Na formulação de argamassas, por exemplo, esses compostos são incorporados às misturas com o objetivo de promover ganhos significativos de desempenho, beneficiando o material tanto em seu estado fresco quanto endurecido (Azevedo, 2018).

Na tecnologia do concreto, especificamente naqueles que utilizam agregados reciclados, a eficiência dos aditivos plastificantes e redutores de água é plenamente preservada. Evidências apontam que a atuação e os resultados proporcionados por esses produtos em matrizes recicladas são equivalentes aos verificados em concretos convencionais formulados com agregados naturais (Morel, 1993 *apud* Bazuco, 1999).

Entretanto, é importante destacar que os concretos com agregados reciclados geralmente exigem dosagens mais elevadas de plastificantes em comparação aos concretos de referência para alcançarem uma consistência plástica adequada. Essa particularidade evidencia a necessidade de se realizarem ajustes cuidadosos nos traços, a fim de assegurar a trabalhabilidade ideal da mistura (Tenório, 2007).

Além disso, esses concretos tendem a apresentar níveis de porosidade e permeabilidade superiores aos dos concretos tradicionais, tornando-se mais suscetíveis à entrada de agentes agressivos, como a umidade e compostos químicos presentes no ambiente, que podem comprometer a durabilidade, especialmente em aplicações estruturais onde a proteção das armaduras é essencial. A maior porosidade pode impactar negativamente a vida útil das estruturas, favorecendo processos de degradação mais acelerados. No entanto, a seleção criteriosa dos tipos e dos teores de agregados reciclados, bem como o controle preciso da mistura, pode contribuir significativamente para mitigar algumas das limitações tradicionalmente associadas ao uso de resíduos em concretos e ampliar suas possibilidades de aplicação na construção civil (Tenório, 2007).

Quando não se obtém uma melhoria substancial na qualidade do agregado reciclado por

meio do processamento, torna-se imprescindível controlar a porosidade do agregado composto, o que pode ser realizado promovendo uma mistura criteriosa entre agregados reciclados e agregados naturais, como por exemplo somente utilizar material reciclável que possua absorção de água entre 3,0 e 7,0%, a fim de equilibrar as características físicas e mecânicas do concreto produzido (Angulo; Figueiredo, 2022).

1.5. Atenuação sonora

Segundo Setlik *et al.* (2023), houve um aumento gradual no nível de poluição sonora devido à urbanização, industrialização, aumento do uso de veículos, aparelhos elétricos e mecânicos em residências e na indústria, tornando-se uma grande preocupação de saúde e meio ambiente e podendo afetar negativamente a qualidade de vida da população.

Desta forma, conforto ambiental configura-se como eixo essencial na avaliação da habitabilidade e do desempenho de edificações. Dentre seus diferentes aspectos, o conforto acústico assume caráter imprescindível, visto que impacta diretamente não apenas no bem-estar psicofisiológico dos ocupantes, mas também a preservação de sua saúde. Setlik *et al*. (2023) menciona que o ruído constante pode causar distúrbios no sono, desconforto, risco de doença cardiovascular, interferência nas atividades de vida diária, raiva desprazer, exaustão e estresse. Diante desse cenário, a mensuração e a análise da atenuação sonora tornam-se fundamentais no desenvolvimento do projeto de edificações.

Para que os resultados de atenuação sonora sejam alcançados, devem ser utilizados materiais que possam atuar como absorvedores som, pois, conforme Silva, *et al.* (2023), quando a onda sonora incide em um material, parte dela é transmitida, outra parte é absorvida pelo material e uma parte final é refletida. Desta forma, a escolha dos materiais impacta diretamente na eficiência e na qualidade ambiental do edifício.

A atenuação sonora em elementos construtivos varia significativamente em função da natureza do material, do arranjo estrutural e dos mecanismos físicos de absorção e isolamento envolvidos. Para quantificar essa eficiência, as pesquisas na área utilizam metodologias experimentais distintas, adaptadas à escala e ao tipo de componente analisado:

a) Medição direta em protótipos/células-teste: Emprega dois medidores de nível sonoro (decibelímetros) dispostos simultaneamente nas áreas externa e interna de um protótipo simulado (como vedações em *Wood Frame*), determinando a atenuação a partir da diferença direta do nível de pressão sonora entre os ambientes (Murari , 2018).

b) Ensaios por frequência acústica específica: Utilizam fontes sonoras controladas para

emitir frequências discretas (como 250 Hz, 1000 Hz e 4000 Hz) através de amostras e painéis compósitos, medindo a perda de transmissão e a taxa de atenuação para cada faixa do espectro audível (Criado *et al*., 2024).

c) Propagação de ondas ultrassônicas: Trata-se de um ensaio não destrutivo em que transdutores piezelétricos acoplados às superfícies de corpos de prova (como argamassas) medem o tempo de trânsito e a velocidade de pulso ultrassônico (VPU). Menores velocidades indicam maior amortecimento e absorção da energia vibracional na matriz (Silva *et al*., 2023).

d) Ensaios normatizados de som aéreo e impacto: Realizados em campos de ensaio ou câmaras de transmissão acopladas (conforme diretrizes da ISO/NBR), utilizando fontes sonoras omnidirecionais (ruído rosa – som com todas as frequências audíveis, porém com potência reduzida nas frequências mais altas) para a avaliação do isolamento ao som aéreo (R_w) e máquinas de impacto padronizadas para a medição do ruído de impacto ($L_{n,w}$) transmitido através de pisos e lajes (Oliveira *et al*., 2021).

Para promover uma análise comparativa e consolidada dessas soluções e de suas respectivas metodologias, é apresentada uma síntese dos valores referenciais de desempenho e atenuação acústica identificados na literatura técnica (Tabela 6). Observa-se que a inserção de materiais fibrosos e porosos (como as lãs mineral e de PET) em sistemas leves do tipo *Wood Frame* promove um aumento expressivo na atenuação média de ruídos em comparação com vedações cimentícias sem isolamento (Murari, 2018). No que tange aos painéis compósitos de cimento e madeira, os dados apontam que o tratamento térmico prévio das fibras vegetais atua como fator determinante para o ganho de atenuação, atingindo reduções de até 42,2 dB em frequências agudas (Criado *et al*., 2024).

Adicionalmente, no escopo do comportamento dinâmico de argamassas e lajes, nota-se a relevância da introdução de agregados leves e camadas resilientes. A incorporação de pó de borracha na matriz cimentícia reduz a velocidade de propagação da onda ultrassônica em até 32,8%, sinalizando maior capacidade de dissipação de energia (Silva *et al*., 2023). Por sua vez, a aplicação do conceito massa-mola-massa em lajes compostas (associação de forro de gesso e piso laminado com manta) resulta na elevação do índice de redução sonora (R_w) para 50 dB e em uma atenuação drástica no nível de ruído de impacto ponderado ($L_{n,w}$ reduzido de 93 dB para 54 dB) (Oliveira *et al*., 2021).

Tabela 6 - Valores referenciais de desempenho e atenuação acústica de diferentes materiais e sistemas construtivos.

Material / Sistema Construtivo	Parâmetro Avaliado	Valor Referencial	Referência
Placas Cimentícias (Wood Frame)			
Placa Cimentícia (sem isolamento extra)	Redução Média de Ruído	1,07 dB	Setlik *et al.* (2023)
Placa Cimentícia + Lã de Rocha	Redução Média de Ruído	4,22 dB	Setlik *et al.* (2023)
Placa Cimentícia + Lã de Vidro	Redução Média de Ruído	4,17 dB	Setlik *et al.* (2023)
Placa Cimentícia + Lã de PET	Redução Média de Ruído	3,58 dB	Setlik *et al.* (2023)
Madeira *Eucalyptus grandis*	Atenuação	25,7 dB(A)	Loschi Neto *et al.* (2008)
Madeira *Pinus*	Atenuação	15,0 dB(A)	Loschi Neto *et al.* (2008)
Painéis Compósitos (Cimento-Madeira)			
Compósito s/ tratamento térmico (Fibras finas)	Atenuação Sonora (250Hz a 4000Hz)	18,6 a 26,9 dB	Criado *et al.* (2024)
Compósito s/ tratamento térmico (Fibras grossas)	Atenuação Sonora (250Hz a 4000Hz)	11,1 a 32,3 dB	Criado *et al.* (2024)
Compósito c/ tratamento térmico (Fibras finas)	Atenuação Sonora (250Hz a 4000Hz)	24,5 a 39,6 dB	Criado *et al.* (2024)
Compósito c/ tratamento térmico (Fibras grossas)	Atenuação Sonora (250Hz a 4000Hz)	31,1 a 42,2 dB	Criado *et al.* (2024)
Argamassas Modificadas			
Argamassa de Referência (Areia quartzosa)	Vel. Propagação Ultrassônica	3547 m/s	Silva *et al.* (2023)
Argamassa com 30% de Vermiculita	Vel. Propagação Ultrassônica	2080 até 2309 m/s	Silva *et al. (2023)*
Argamassa com 30% de Borracha	Vel. Propagação Ultrassônica	2063 até 2515 m/s	Koksal; Gencel; Kaya (2015)
Sistemas de Lajes e Pisos			
Laje Vigota/Lajota Cerâmica Simples	Isolamento Aéreo (Rw) Ruído Impacto (Ln,w)	Rw = 42 dB Ln,w = 93 dB	Oliveira *et al.* (2021)
Laje Vigota/Lajota + Forro Gesso + Contrapiso	Isolamento Aéreo (Rw) Ruído Impacto (Ln,w)	Rw = 49 dB Ln,w = 80 dB	Oliveira *et al.* (2021)
Laje Vigota/Lajota + Forro + Piso Laminado	Isolamento Aéreo (Rw) Ruído Impacto (Ln,w)	Rw = 50 dB Ln,w = 54 dB	Oliveira *et al.* (2021)
Laje de Concreto Maciço (120 mm)	Isolamento Aéreo (Rw) Ruído Impacto (Ln,w)	Rw = 47 dB Ln,w = 77 dB	Proacústica (2022)

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

CAPÍTULO II

MATERIAIS E MÉTODOS

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Para a confecção da matriz cimentícia das placas, o Cimento Portland Tipo CPII – E – 40 RS da marca Votoran foi a escolha principal. Essa decisão se justifica por sua boa resistência inicial, que acelera o processo de desmoldagem em relação ao Cimento Portland de Alto-Forno - CPIII, e por seu menor valor de mercado, tornando a produção mais economicamente favorável.

Em ensaios experimentais conduzidos por Oliveira (2018), o cimento CP II E 32 apresentou um tempo de início de pega de 175 minutos e o fim de pega aos 245 minutos. Por outro lado, o cimento CP III 40 RS registrou tempos mais elevados, com início de pega aos 200 minutos e fim de pega aos 265 minutos. Esse tempo de pega mais longo do CP III está diretamente relacionado à sua composição, que conta com uma proporção elevada de escória de alto-forno, o que torna as suas reações de hidratação e o ganho de resistência iniciais mais lentos (Kihara e Visedo, 2015). Corroborando essa dinâmica mais lenta do CP III, Damas (2024) destaca que a temperatura de hidratação do CP III (51 °C) é consideravelmente inferior à do CP II (79 °C), refletindo uma menor reatividade inicial que explica o consequente retardo no tempo de pega deste material.

O agregado natural utilizado foi a areia média lavada comercial da empresa Arckom Minerais Ltda, do município de Japeri/RJ, para compor os traços de argamassa de composição padrão, garantindo a consistência e o desempenho desejados. A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento local.

A presente pesquisa focou na utilização de Resíduos da Construção Civil (RCC) para a produção de placas cimentícias. A origem desses resíduos é a empresa ESM Locações de Máquinas e Equipamentos, localizada em Saquarema, RJ. Esta empresa é especializada na remoção de entulhos e emprega um britador específico para o processamento desse material, garantindo a sua adequação para o uso na pesquisa. O material antes e depois do processo de britagem pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - (A) RCC antes do processo de britagem e (B) RCC após processo de britagem



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

Uma vez que os materiais recicláveis estão no depósito da usina para armazenamento primário, eles são submetidos à primeira triagem, uma etapa crucial para a remoção de quaisquer materiais não aproveitáveis que possam comprometer a qualidade do agregado reciclado. Os resíduos passam por uma segunda triagem, focada na adequação dimensional, assegurando que apenas peças com tamanhos apropriados sigam para as próximas fases. A terceira triagem ocorre manualmente na esteira de alimentação, antecedendo o direcionamento do material ao britador mecânico, nessa etapa, eliminam-se os resíduos remanescentes passíveis de identificação visual que possam comprometer a qualidade do processo.

Este britador do tipo mandíbula pode receber fragmentos de RCC com dimensões máximas de até 60 cm por 40 cm, havendo mais de uma mandíbula para a britagem do material. A distância mínima entre as mandíbulas na saída do equipamento é precisamente regulada para 1 polegada (equivalente a 2,54 cm), garantindo que as partículas resultantes da britagem não excedam significativamente essa dimensão.

A faixa granulométrica, do material obtido após a britagem é definida por um processo de peneiramento. Quatro telas com aberturas específicas são utilizadas: a primeira com 32 mm, a segunda com 22 mm, a terceira com 10 mm e a quarta com 4 mm. Essas peneiras separam o material em diferentes frações, cada uma com sua designação específica:

a) Cascalho: Compreende as partículas retidas na peneira de 32 milímetros.
b) Brita 2: Inclui as partículas retidas na peneira de 22 milímetros.
c) Brita 1: Corresponde às partículas retidas na peneira de 10 milímetros.
d) Brita 0: Engloba as partículas retidas na peneira de 4 milímetros.
e) Pó de Pedra: Refere-se às partículas finas que conseguem passar pela peneira de 4 milímetros.

Após a realização de todo o processo de beneficiamento, é obtido o material em formato que permite sua utilização em misturas de concreto e argamassas, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - RCC ao final do processo de beneficiamento
(A) Brita 2, (B) Brita 1, (C) Brita 0, (D) Pó de Pedra



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

Dentre as diferentes frações granulométricas obtidas ao final do processo de beneficiamento, para o desenvolvimento da presente pesquisa foi utilizado exclusivamente o pó de pedra reciclado. Trata-se do material fino não retido na peneira de abertura de 4 mm, o qual apresentou as características dimensionais necessárias para a dosagem e confecção das placas cimentícias avaliadas neste estudo, conforme pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - RCC beneficiado utilizado na pesquisa



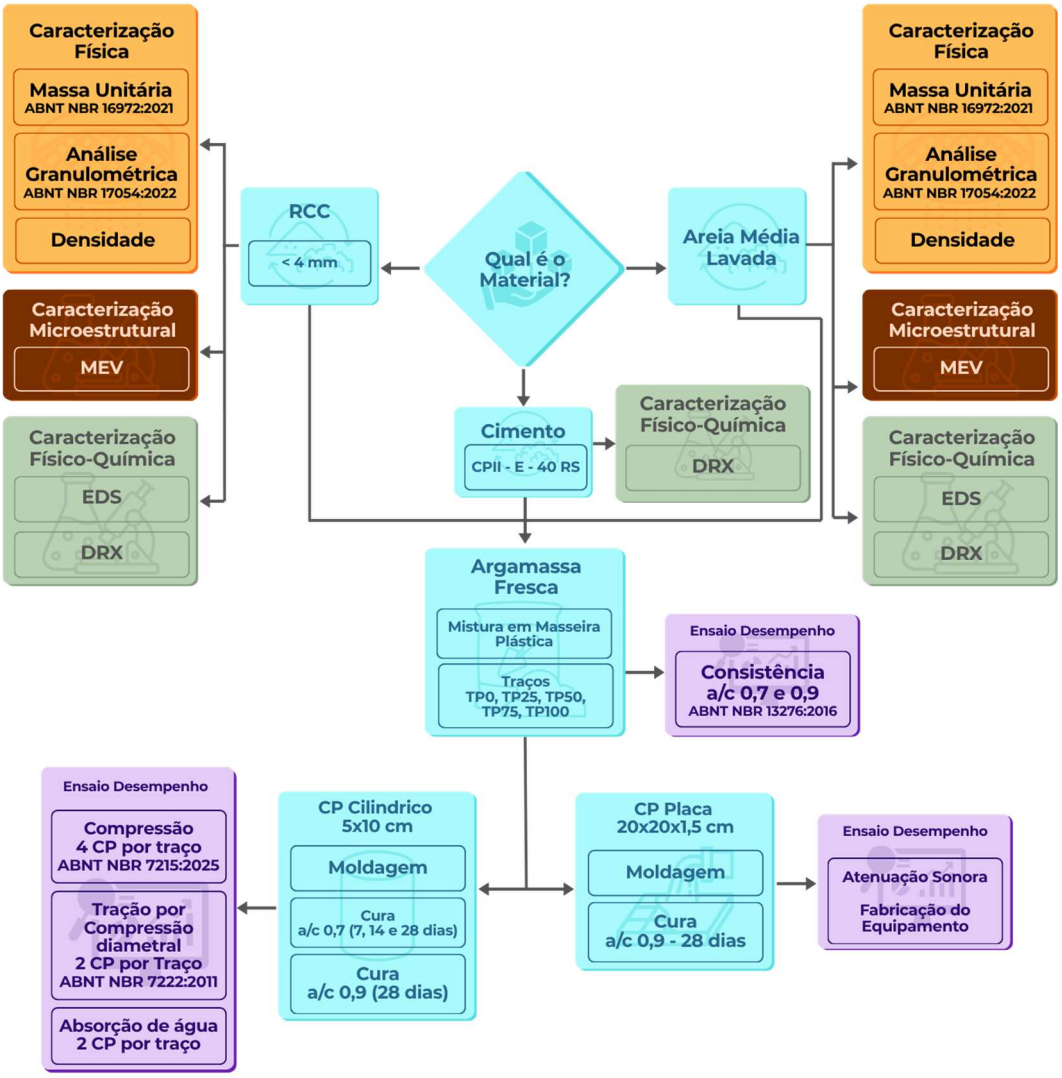
(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

2.2. Metodologia

Esta seção apresenta o programa experimental estabelecido para a execução da pesquisa, detalhando os procedimentos que compreendem a caracterização preliminar das matérias-primas até as etapas de dosagem, moldagem e cura dos corpos de prova. O escopo dos ensaios propostos visa à caracterização tecnológica da argamassa confeccionada com agregado miúdo reciclado de resíduos de construção civil (RCC) e corpos de prova no estado endurecido.

Essa avaliação sistemática fundamentou a análise da viabilidade técnica e o potencial de aplicabilidade do material desenvolvido no âmbito da construção civil, buscando identificar características que atendam a critérios tanto de qualidade quanto de desempenho das placas cimentícias, abrangendo tanto análises físicas quanto químicas e seguindo as normas técnicas pertinentes. Esses ensaios estão listados na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma dos ensaios realizados no projeto



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

2.2.1. Preparação das Amostras

A caracterização tecnológica dos materiais constituintes da matriz cimentícia foi realizada em consonância com as diretrizes fixadas pelas normas técnicas vigentes e aplicáveis para os materiais utilizados na pesquisa, conforme indicado na metodologia dos ensaios. Os procedimentos específicos de amostragem e preparação prévia dos insumos são pormenorizados individualmente nas seções correspondentes a cada ensaio executado.

O procedimento de dosagem da argamassa para a confecção dos corpos de prova foi conduzido por meio de mistura manual em masseira plástica de 20 L da marca momfort indicada para este tipo de preparo. O protocolo adotado consistiu na pré-homogeneização a seco dos materiais particulados (cimento, agregado miúdo natural e RCC), seguida pela adição gradual da água de amassamento, conforme as proporções preestabelecidas para os traços em estudo.

Os corpos de prova cilíndricos foram confeccionados com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, em observância aos preceitos da ABNT NBR 7215 (2025). Para a avaliação do desempenho acústico, as placas cimentícias foram moldadas utilizando-se fôrmas poliméricas padrão com dimensões nominais padronizadas de 20 cm × 20 cm × 1,5 cm.

A cura dos corpos de prova foi realizada em um recipiente, onde os corpos de prova permaneceram submersos em água durante todo o processo.

2.2.2. Definição dos Traços

O traço de referência de 1:3 (cimento e areia) para as placas sem a adição de resíduos foi escolhido por ser amplamente utilizada na indústria de revestimentos cimentícios (Freitas *et al.*, 2019; Pilz *et al.*, 2020; Marques *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2024).

Foram definidos quatro teores de substituição da areia por RCC: 25%, 50%, 75% e 100%. A escolha desses percentuais é estratégica, pois permite uma avaliação do impacto do RCC nas propriedades da mistura. Os teores utilizados são comumente empregados em pesquisas sobre o uso de resíduos (Pilz *et al.*, 2020; Marques *et al*, 2017; Cabral, 2007), tornando possível comparar os resultados com a literatura e analisar o comportamento do material em diferentes níveis de substituição. Na Tabela 7 é possível observar os traços em volume e em massa utilizados no estudo após a realização do ensaio de massa unitária.

Tabela 7 - Composições dos traços em volume e em massa

Traço	Proporção RCC (%)	Traço em Volume			Traço em Massa (g)				
		Cimento	Areia	RCC	Cimento	Areia	RCC	Fator a/c 0,7	Fator a/c 0,9
TP0	0	1	3	0	1000	0	4153,94	700	900
TP25	25	1	2,25	0,75	1000	1056,39	3115,46	700	900
TP50	50	1	1,5	1,5	1000	2112,78	2076,97	700	900
TP75	75	1	0,75	2,25	1000	3169,17	1038,49	700	900
TP100	100	1	0	3	1000	4225,56	0	700	900

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

O delineamento experimental contemplou, inicialmente, a adoção de uma relação água/cimento (a/c) fixa em 0,7 para a moldagem dos corpos de prova. Essa estratégia visou viabilizar a comparação direta entre as diferentes dosagens sob um parâmetro de hidratação constante, permitindo isolar e avaliar o impacto da variação da trabalhabilidade sobre as propriedades físicas resultantes. Em uma etapa subsequente, confeccionaram-se novas amostras com a relação a/c incrementada para 0,9. Esse ajuste justificou-se pela necessidade de elevar a consistência e a fluidez das misturas, condição imprescindível para viabilizar a correta moldagem e o adensamento das placas cimentícias.

2.2.3. Caracterização Física

2.2.3.1. Massa Unitária

A definição das proporções dos constituintes em massa foi estabelecida a partir da conversão do traço em volume, correlacionando-se as frações volumétricas às respectivas massas unitárias dos materiais. A determinação da massa unitária, tanto para o agregado miúdo natural (areia) quanto para o agregado miúdo reciclado (RCC), fundamentou-se nas diretrizes normativas da ABNT NBR 16972 (2021), empregando-se o método do recipiente de volume conhecido para a mensuração da massa das amostras em estado solto, que é o nome dado pela norma para o material que não foi compactado e o que determina o método de cálculo (neste caso por ser o material no estado solto é utilizado o Método C). O ensaio foi conduzido nas dependências do Laboratório de Materiais da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

A massa unitária de cada material foi obtida utilizando a Equação 1.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (1)$$

Em que:

ρap – massa unitária do agregado (kg/m3)

mar – massa do recipiente com agregado (kg)

mr – massa do recipiente vazio (kg)

V – volume do recipiente

O índice de vazios para esses materiais foi obtido pela Equação 2.

$$E_v = \frac{100[(d_1\rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1\rho_w} \quad (2)$$

Em que:

Ev – índice de vazios dos agregados (%)

d1 – densidade do agregado seco (kg/m3)

ρw – densidade da água (kg/m3)

ρap – densidade média do agregado (kg/m3)

Ao encontrar a massa unitária de cada material, foi utilizada a Equação 3 para obter o traço em massa.

$$M = V \times J \quad (3)$$

Em que:

M – massa do agregado (kg)

V – traço em volume do material (dm3)

J – massa unitária de cada material (kg/dm3)

Visando garantir a reprodutibilidade, a precisão e a confiabilidade dos resultados experimentais, a determinação da massa unitária e do índice de vazios tanto da areia quanto do RCC foram realizadas em triplicata, compreendendo três determinações independentes para cada condição ensaiada. A realização das medições em triplicata busca que a média aritmética reportada possa representar o comportamento físico do material, além de permitir a detecção de eventuais inconsistências operacionais ou discrepâncias acentuadas nos dados coletados.

Os resultados obtidos nas três determinações foram submetidos a um tratamento

estatístico descritivo, que compreende a determinação da média aritmética, do desvio padrão amostral e do coeficiente de variação. A média aritmética, calculada pela razão entre a soma das medições individuais e o número total de repetições ($n = 3$), estabelece o valor central e representativo do parâmetro físico em análise. Para quantificar a dispersão das leituras individuais em relação a esta média e atestar o grau de precisão do ensaio, adotou-se o desvio padrão amostral.

Por fim, a avaliação da variabilidade relativa do processo foi realizada mediante a extração do Coeficiente de Variação (CV), expresso percentualmente como a razão entre o desvio padrão e a média aritmética. Estabeleceu-se como critério de aceitabilidade metrológica um limite máximo de 5% para o Coeficiente de Variação entre as três repetições. Essa margem restrita de tolerância tem o propósito de referendar a homogeneidade no preenchimento do recipiente, a constância do operador ao longo do procedimento, bem como a precisão das balanças utilizadas.

2.2.3.2. Análise Granulométrica

A distribuição das frações granulométricas exerce influência direta sobre a reologia e a trabalhabilidade da mistura no estado fresco, bem como sobre o empacotamento de partículas, a densidade aparente e a resistência mecânica final do compósito no estado endurecido (Antoniazzi, 2019; Cabral, 2007; Romano, 2013).

Para a separação dos materiais por tamanho, o peneiramento é o método mais frequentemente empregado, sendo o material separado com base no tamanho geométrico de suas partículas (Correia e Couto, 2018).

O ensaio para a determinação da composição granulométrica do agregado miúdo natural (areia) e do agregado miúdo reciclado (RCC) foi conduzido conforme a ABNT NBR 17054 (2022).

O procedimento experimental consistiu no fracionamento mecânico das amostras por meio da utilização da série de peneiras normal (4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 µm, 300µm e 150 µm) sobrepostas com aberturas de malha decrescentes, acopladas a um agitador mecânico, onde o material seco é depositado e agitado por cerca de 5min, no Laboratório de Materiais da UFRRJ.

Ao término do ciclo de agitação, foi pesada e quantificada a porcentagem retida acumulada em cada peneira, sendo esse material retido correspondente às partículas com dimensões superiores à abertura nominal da respectiva malha. Esses valores foram utilizados

na montagem das curvas granulométricas. O aspecto visual das frações segregadas de areia e RCC após o ensaio pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - (A) Agitador mecânico com a série de peneiras e (B) RCC após peneiramento



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

O Módulo de Finura (MF) expressa a proporção média entre as partículas mais grossas e mais finas da amostra. Quanto maior o valor do módulo de finura, maior é a dimensão média das partículas do material analisado. O valor do MF é obtido a partir da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado nas peneiras da Série Normal, dividida por 100, conforme a ABNT NBR 17054 (2022).

2.2.3.3. Densidade

A determinação da massa específica dos sólidos, tanto para a areia quanto para o RCC, foi realizada por meio do ensaio de picnometria com líquido, utilizando água destilada como fluido de imersão, em triplicata. O ensaio experimental foi conduzido no LNanoC_2 da UFRRJ sendo utilizado um picnômetro com tampa hermética, balança calibrada e termômetro. O procedimento consistiu na mensuração da massa da amostra em estado seco e, posteriormente, na determinação da massa do sistema contendo o material imerso em água no interior do picnômetro com termômetro, também sendo medida a temperatura indicada no termômetro. Após a massa seca ser inserida no picnômetro todo esse conjunto foi pesado (como pode ser observado na Figura 15). Conhecidas essas grandezas, a massa específica dos materiais foi calculada analiticamente por meio da Equação 4, correlacionando os valores obtidos com a

densidade da água na temperatura do ensaio.

$$Dp = \frac{m_{mat}}{\left[\left(m_{pic+água}\right) + m_{mat}\right] - \left(m_{pic+água+mat}\right)} \times \frac{1}{D_{água}} \qquad (4)$$

Em que:

Dp – densidade das partículas

mmat – massa da amostra seca

mpic+água – massa do picnômetro com água

mpic+água+mat – massa do picnômetro com água e material

Dágua – densidade da água

Figura 15 - Pesagem do conjunto picnômetro, água e material



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

2.2.4. Caracterização Microestrutural

2.2.4.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização microestrutural e morfológica dos Resíduos de Construção Civil (RCC) foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando-se o microscópio eletrônico modelo LEO 1450VP, da Escola de Engenharia de Lorena da

Universidade de São Paulo (EEL-USP).

Tendo em vista a natureza porosa, friável e não condutora das matrizes de RCC, adotou-se o protocolo descrito a seguir para a preparação das amostras, a fim de preservar a estrutura dos poros, garantir a condutividade elétrica necessária e evitar o acúmulo de cargas elétricas durante a incidência do feixe de elétrons. As amostras foram submetidas ao embutimento em resina epóxi de baixa viscosidade, e após a cura completa da resina, foi realizado o lixamento e polimento, obtendo-se uma superfície plana, lisa e isenta de riscos.

Em seguida, o conjunto foi conduzido ao equipamento de metalização, sob condições de vácuo controlado, promoveu-se o recobrimento da amostra mediante a deposição de uma camada de ouro com espessura de 5 nm. Esse revestimento metálico ultra-fino garantiu a condutividade superficial necessária e a dissipação eficiente dos elétrons incidentes, viabilizando a aquisição de micrografias de alta resolução.

2.2.5. Caracterização Físico-química

2.2.5.1. Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS)

A determinação da composição química elementar da areia natural e do RCC foi realizada por meio de Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS) em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV, modelo LEO 1450VP), localizado na EEL-USP.

2.2.5.2. Difração de Raios X (DRX)

A análise da composição mineralógica dos materiais utilizados nesta pesquisa (Areia, RCC e Cimento CPII – E – 40 RS) foi realizada por meio da técnica de Difração de Raios X (DRX). Os difratogramas foram obtidos em um intervalo de varredura angular 2θ entre 10° e 80°. O princípio fundamental do ensaio baseia-se na Lei de Bragg, conforme a Equação 5.

$$2d\ sen\theta = n\lambda \qquad (5)$$

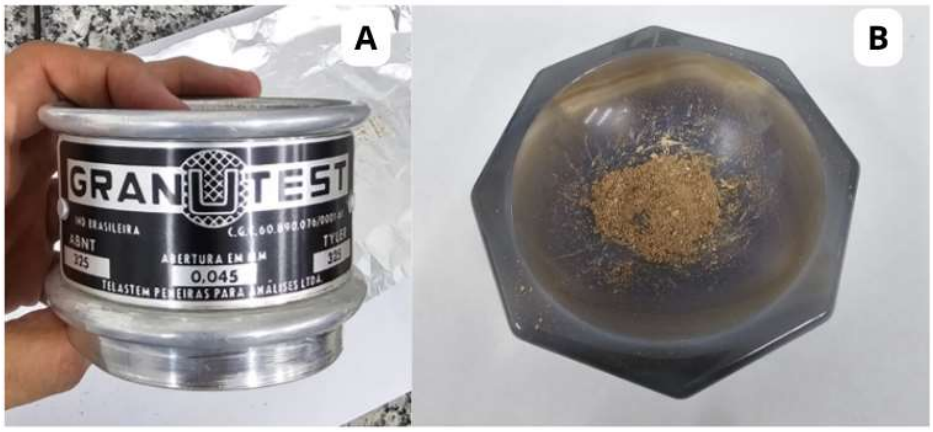
A identificação das fases cristalinas foi realizada por comparação com as fichas cristalográficas dos bancos de dados JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) e ICDD (International Centre for Diffraction Data).

A técnica consiste na incidência de um feixe de raios X monocromáticos sobre a

amostra, gerando fenômenos de (difração) em ângulos específicos (θ) que correspondem aos espaçamentos (d) entre os planos da estrutura atômica. A análise do padrão de difração resultante permite o mapeamento qualitativo dos constituintes mineralógicos presentes.

O ensaio de DRX foi conduzido no Laboratório de Catálise da UFRRJ. Como etapa de preparação, as amostras foram pulverizadas manualmente com o auxílio de almofariz e pistilo de ágata em meio de acetona e, subsequentemente, passadas em peneira com abertura de malha de 0,045 mm (Figura 16). Este processo de cominuição e padronização granulométrica é necessário para garantir a aleatoriedade na orientação dos cristalitos e mitigar efeitos de orientação preferencial, assegurando a obtenção de difratogramas com adequada resolução de pico para a indexação das fases.

Figura 16 - (A) peneira com abertura de 0,045mm e (B) almofariz de ágata com RCC sendo preparado para o ensaio de DRX



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

2.2.6. Ensaios de Desempenho dos Materiais

2.2.6.1. Consistência da Argamassa Fresca

A consistência é uma propriedade que afeta diretamente a trabalhabilidade, ou seja, indica que a argamassa se distribui facilmente quando assentada em um molde, sem apresentar segregação durante o transporte, sem aderir excessivamente nas ferramentas durante a aplicação, não apresentando endurecimento precoce quando em contato com superfícies com alto grau de absorção, permanecendo plástica até o fim de sua aplicação (Azevedo, 2018).

Considerando a importância da trabalhabilidade para a utilização da argamassa fresca, essa condição foi verificada por meio do ensaio de consistência, seguindo os preceitos da NBR 13276:2016. Conforme a pesquisa de Pasoti (2020), um índice de consistência próximo de 23

cm é o ponto de referência ideal para essa aplicação, assegurando que a mistura tenha a fluidez necessária e o mínimo comprometimento da resistência final.

A avaliação da trabalhabilidade e do comportamento no estado fresco dos traços propostos neste estudo foi realizada por meio do ensaio de Índice de Consistência, conduzido de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 13276 (2016) no laboratório de materiais do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU/IT/UFRRJ).

O objetivo do ensaio é parametrizar a fluidez e a reologia da mistura recém-preparada, permitindo aferir a manutenção da trabalhabilidade proposta e avaliar o impacto da substituição dos insumos na demanda de água de amassamento.

Para a caracterização das argamassas no estado fresco, empregou-se um conjunto de equipamentos normatizados composto por uma mesa de consistência (*flow table*) acionada manualmente e dotada de altura de queda padronizada, um molde tronco-cônico com superfície interna lisa e não absorvente, um soquete metálico para adensamento padronizado da amostra e um paquímetro com precisão de 1 mm para medição do espalhamento. O ensaio foi executado imediatamente após o término do processo de mistura para cada um dos fatores água/cimento avaliados (0,7 e 0,9).

O procedimento experimental iniciou-se com a limpeza e o leve umedecimento do tampo da mesa de consistência e da parede interna do molde tronco-cônico, o qual foi sequencialmente posicionado e centralizado sobre a mesa. O preenchimento do molde ocorreu em três camadas sucessivas de alturas aproximadamente iguais. Cada camada foi adensada com o soquete metálico por meio de golpes distribuídos uniformemente, aplicando-se 15 golpes na primeira camada, 10 na segunda e 5 na terceira. Finalizado o adensamento, realizou-se o rasamento do topo do molde utilizando uma espátula metálica em movimentos alternados para remover o excesso de material e nivelar a superfície superior.

Na sequência, o molde foi retirado verticalmente em um movimento suave e contínuo. Imediatamente após a remoção do tronco de cone, a mesa de consistência foi acionada para submeter a amostra a 30 quedas consecutivas ao longo de 30 segundos, correspondendo a uma frequência constante de 1 queda por segundo. Após a estabilização do material sobre o tampo, procedeu-se à medição do espalhamento com o auxílio do paquímetro, registrando-se três diâmetros do bolo de argamassa estendido em ângulos equidistantes.

O Índice de Consistência (I_c), expresso em milímetros (mm), foi obtido pela média aritmética simples dos três diâmetros medidos na base do espalhamento, conforme expresso na Equação 6.

$$I_c = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \quad (6)$$

Em que:
Ic - índice de consistência da mistura (mm);
d1, d2, d3 - diâmetros medidos na base da argamassa espalhada (mm).

2.2.6.2. Absorção de água

O ensaio de absorção de água quantifica indiretamente a porosidade aberta do material, servindo como um indicador preditivo de sua durabilidade e desempenho em ambientes saturados ou sob ação da umidade. O procedimento experimental consistiu na utilização de três corpos de prova cilíndricos, após a cura em água por 28 dias conforme a norma ABNT NBR 9778 (2005), realizada no LNanoC$_2$ da UFRRJ. Inicialmente, foi removido o excesso de líquido superficial, realizou-se a aferição da massa saturada (m_{sat}) por meio de medidas consecutivas em intervalos de duas em duas horas até que a diferença entre as massas fosse inferior a 0,5%. Na sequência, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa mantida à temperatura de (105 ± 5) °C para a eliminação da água interna. Pesagens consecutivas foram efetuadas em intervalos de duas horas, interrompendo-se o processo quando a variação de massa entre medições subsequentes foi inferior a 0,5%, caracterizando a constância de massa seca (m_s). Por fim, a absorção de água dos corpos de prova foi calculada analiticamente com o auxílio da Equação 7, sendo utilizada a análise ANOVA para uma avaliação estatística dos resultados obtidos.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (7)$$

Em que:
A – Absorção de água (%)
msat – massa da amostra saturada (g)
ms – massa da amostra seca (g)

2.2.6.3. Resistência à Compressão

No que diz respeito ao desempenho da argamassa utilizada, a Resistência à Compressão é um ensaio fundamental para medir a capacidade do material de suportar cargas de compressão,

seguindo a ABNT NBR 5739 (2018).

Neste ensaio, foram utilizados os corpos de prova cilíndricos, que foram submetidos à compressão em prensa eletromecânica.

Para a realização dos ensaios de rompimento, utilizaram-se duas prensas distintas. A mudança de equipamento, ainda que não tenha interferido nos resultados, ocorreu devido à indisponibilidade do laboratório da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) nas datas programadas para as etapas finais, tendo este sido empregado apenas nos ensaios iniciais. No rompimento dos corpos de prova com fator a/c de 0,7 foi utilizada prensa da marca Contenco, modelo UMC300 (Figura 17) no Laboratório de Química da Madeira da UFRRJ, sendo utilizado prato de aço com disco de Neoprene na base e topo do corpo de prova como forma de capeamento. Já para os corpos de prova com fator a/c de 0,9 foi utilizada uma máquina universal de ensaios, devidamente calibrada (Equipamento: PCE100/TEMP241025; Site ID: BR0155-M01; capacidade de 1000 KN em compressão), do laboratório do Terminal Marechal Hermes (CSN), sendo utilizada retífica própria para este fim que desgastou o topo irregular do corpo de prova, até torná-lo plano, liso e perpendicular ao eixo.

Figura 17 – (A) Prensa eletromecânica da marca Contenco, modelo UMC300, (B) máquina universal de ensaios, modelo PCE100



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Após o preparo dos corpos de prova e o posicionamento na prensa de ensaios, através de

prensagem controlada e velocidade de carregamento constante (0,25 +- 0,05 MPa) conforme determina a ABNT NBR 7215 (2025), o carregamento foi registrado até o rompimento do corpo de prova, obtendo assim qual a carga máxima suportada pela argamassa produzida.

Em conformidade com a ABNT NBR 7215 (2025), moldaram-se quatro corpos de prova para cada um dos cinco traços avaliados (TP0, TP25, TP50, TP75 e TP100), totalizando 20 amostras por idade de rompimento. Para a relação água/cimento (a/c) de 0,7, realizaram-se ensaios de compressão axial aos 7, 14 e 28 dias. Já para a relação a/c de 0,9, a resistência foi avaliada exclusivamente aos 28 dias. Essa limitação visou otimizar o quantitativo de ensaios, uma vez que a curva de evolução mecânica ao longo do tempo já havia sido mapeada na etapa com o fator a/c mais baixo (a/c 0,7).

A adoção de dois diferentes fatores água/cimento (a/c) no programa experimental visou compreender, em um primeiro momento, a evolução do desempenho mecânico das misturas em função dos gradativos teores de substituição da areia natural por Resíduo de Construção Civil (RCC). Complementarmente, essa estratégia permitiu isolar e avaliar a influência direta da relação a/c na resposta mecânica de cada traço formulado, identificando a sensibilidade das propriedades da matriz cimentícia frente às variações do agregado reciclado.

2.2.6.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Outro aspecto importante a ser verificado sobre o desempenho da argamassa utilizada é a Resistência à Tração por Compressão Diametral, pois este ensaio verifica a capacidade do material de suportar esforços de tração gerados por meio de compressão no sentido longitudinal do corpo de prova, conforme indicado na NBR 7222 (2011).

O ensaio de compressão diametral (também conhecido internacionalmente como Brazilian Test) é fundamental por três motivos técnicos principais:

a) Argamassas e concretos falham sob tração muito antes de falharem por compressão. A resistência à tração indireta é governada pela qualidade da pasta de cimento e, principalmente, pela Zona de Transição Interfacial (ZTI) entre a pasta e o agregado. Agregados reciclados possuem uma argamassa velha aderida, criando uma "dupla ZTI" que costuma ser o elo mais fraco do material. O ensaio de tração é altamente sensível a essa fraqueza, servindo como o melhor indicativo da compatibilidade e aderência entre a nova matriz cimentícia e o resíduo.

b) As argamassas estão sujeitas a grandes tensões de cisalhamento e tração oriundas da movimentação térmica, ação do vento e retração. Como os resíduos (RCC) alteram drasticamente a reologia e a demanda de água da mistura, a tendência à retração plástica é

maior. Conhecer o limite de tração da argamassa permite prever se ela conseguirá suportar essas tensões internas sem desenvolver fissuras patológicas que comprometeriam a estanqueidade da edificação.

c) Sob o ensaio de compressão axial, os vazios e microfissuras presentes na porosidade do agregado reciclado tendem a se "fechar" no início da aplicação da carga. No entanto, no ensaio de tração por compressão diametral, as tensões de tração ortogonais ao eixo de aplicação da carga "abrem" imediatamente as microfissuras pré-existentes. Logo, este ensaio é o mais rigoroso para atestar a verdadeira integridade estrutural e a ausência de danos internos severos causados pela inserção de agregados de alta absorção.

Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos à compressão na prensa eletromecânica também do Laboratório de Química da Madeira da UFRRJ, onde após a aplicação de carga contínua de 0,05 MPa/s (ABNT NBR 7222) (2011), foi registrado o carregamento até o rompimento do corpo de prova.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela Equação 8:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \times 100 \qquad (8)$$

Em que:

fct,sp - Resistência à tração por compressão diametral (em MPa ou N/mm²).

F - Carga máxima de ruptura aplicada no corpo de prova (em N).

π - Constante pi (≈ 3,1416).

d - Diâmetro do corpo de prova cilíndrico (em mm ou cm, compatível com a unidade da força).

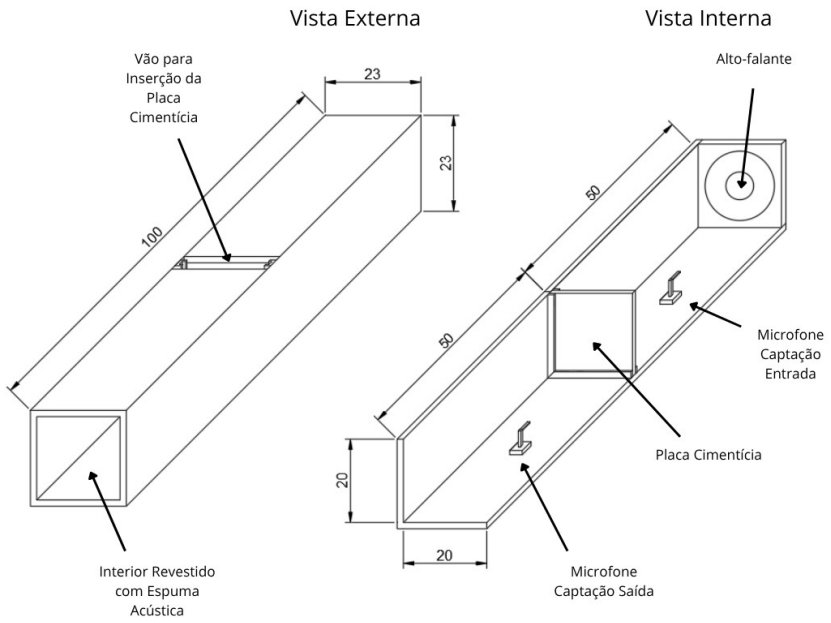
l - Comprimento ou altura do corpo de prova cilíndrico (na mesma unidade de d).

2.2.6.5. Atenuação Sonora

Para a viabilização da análise instrumental, considerando as limitações impostas pela indisponibilidade de equipamentos acessíveis que atendessem às especificidades geométricas dos corpos de prova e ao nível de sensibilidade exigido por este estudo, foi imprescindível a concepção e a fabricação de um sistema experimental próprio, dimensionado a partir dos parâmetros físicos e operacionais levantados no decorrer desta pesquisa e utilizando os padrões presentes na norma ISO 266 (ISO 266, 1997). A decisão de projetar e construir uma câmara acústica dedicada reflete o compromisso metodológico com a obtenção de dados experimentais, superando gargalos operacionais por meio do desenvolvimento autônomo de infraestrutura sob medida para a caracterização da atenuação sonora das placas cimentícias.

O arranjo geométrico, a distribuição dos transdutores (microfones) e os detalhes construtivos internos e externos do equipamento projetado encontram-se detalhados no esquema técnico da Figura 18.

Figura 18 - Esquema construtivo e detalhamento dimensional (vistas externa e interna, em centímetros) da câmara acústica customizada, indicando o posicionamento da fonte emissora, do vão de inserção do corpo de prova e dos transdutores (microfones) de captação.



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

A estruturação do equipamento exigiu seu dimensionamento preliminar, para garantir o isolamento acústico adequado e mitigar fontes de erro sistemático. O protótipo foi construído na forma de um duto retilíneo de seção transversal retangular, apresentando comprimento total de 100 cm, dimensões externas de 23 cm × 23 cm e uma seção interna livre útil de 20 cm × 20 cm. Para a estrutura envolvente, optou-se pela utilização de painéis de fibra de madeira de média densidade (*Medium Density Fiberboard* – MDF). Essa escolha fundamentou-se na necessidade de prover massa suficiente para atenuar a transmissão pelas paredes da câmara e suportar a carga estática da amostra, eliminando vibrações e o flanqueamento acústico.

Internamente, o duto foi revestido com espuma acústica de poliuretano expandido perfilado do tipo "caixa de ovo". A utilização desse material absorvedor teve como objetivo técnico atenuar reflexões secundárias nas superfícies internas, atenuar a formação de ondas estacionárias e conter o desenvolvimento de campos reverberantes, favorecendo um comportamento de propagação predominantemente unidirecional do campo sonoro no interior

do duto.

O arranjo interno e a distribuição dos transdutores foram configurados da seguinte forma:

a) Fonte Emissora: Um alto-falante acoplado à extremidade de entrada da câmara, responsável pela geração do sinal acústico sob frequências controladas;

b) Transdutor de Entrada (Pressão Incidente): Um microfone de medição posicionado no ponto médio do primeiro segmento da câmara (câmara de emissão), dedicado ao registro contínuo do nível de pressão sonora incidente ($NPS_{entrada}$);

c) Transdutor de Saída (Pressão Transmitida): Um microfone de medição instalado na câmara de recepção, posicionado após a amostra, encarregado da captação do nível de pressão sonora transmitido ($NPS_{saída}$).

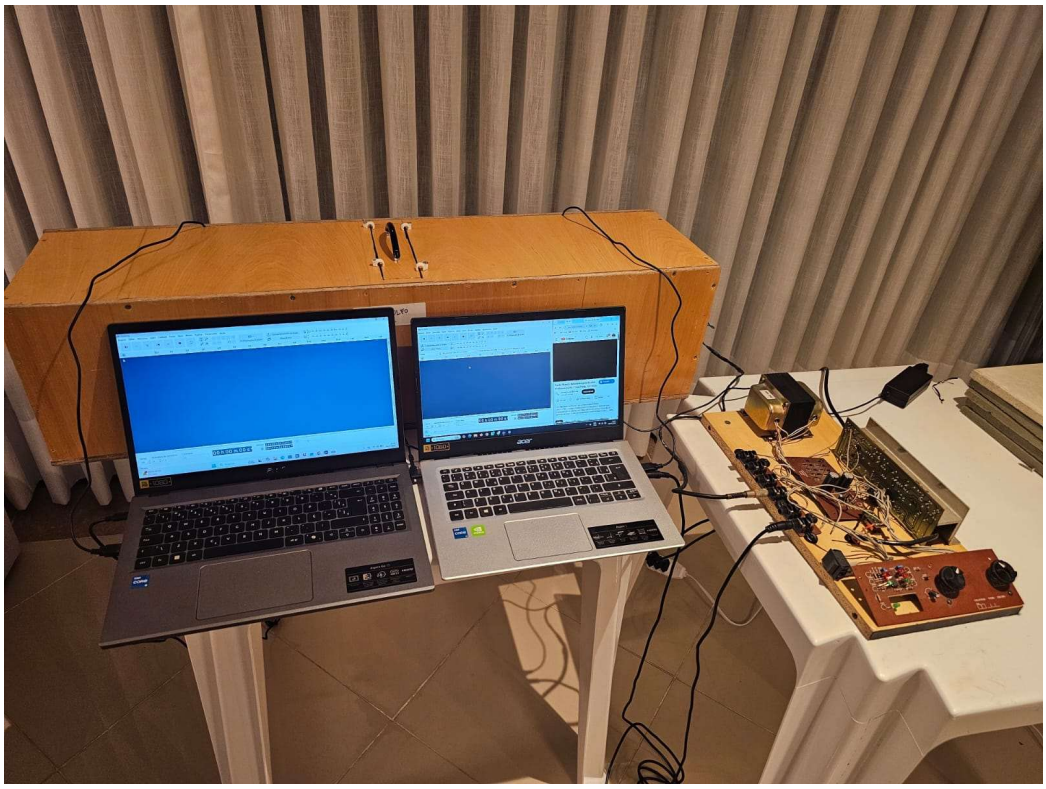
No centro geométrico exato do duto (a 50 cm de ambas as extremidades), projetou-se um vão específico para a inserção vertical do corpo de prova cimentício. O compartimento foi dotado de guias de encaixe que buscam o alinhamento ortogonal e a vedação estanque do perímetro da amostra, possibilitando que a atenuação registrada seja decorrente, em sua maior parte, da resposta acústica do material sob teste.

A concretização e a operacionalização do sistema experimental projetado são apresentadas na Figura 19. A viabilização dos ensaios demandou a interligação da câmara com uma bancada eletroacústica customizada, desenvolvida especificamente para este propósito. O circuito eletrônico, montado sobre um painel dedicado, compreende estágios de amplificação de potência para possibilitar o acionamento do transdutor de emissão (alto-falante).

O controle operacional e o processamento de dados em tempo real foram viabilizados por meio de duas estações computacionais. A primeira unidade atua na emissão controlada dos sinais de teste, além da análise e descrição dos níveis de pressão sonora de entrada, enquanto a segunda executa a análise e descrição dos níveis de pressão sonora de saída. Este esforço de concepção e montagem proporcionou a obtenção dos resultados do ensaio, minimizando a interferência do ruído de fundo ambiental e conferindo rigor científico, repetibilidade e boa confiabilidade dos resultados obtidos.

Bistafa (2011) menciona que é explicitamente estabelecido que o ouvido humano saudável percebe sons que variam, entre 20 Hz e 20.000 Hz, porém Silva Júnior, Rêgo Silva e Pinheiro (2015) identificaram que o ouvido humano não percebe todas as frequências da mesma maneira e que a faixa de 1000 Hz é caracterizada como a região de "frequência média" para a nossa audição.

Figura 19 - Arranjo experimental completo em operação, evidenciando a câmara acústica customizada, a bancada com circuitos eletrônicos de amplificação de sinal, e as estações computacionais para síntese e aquisição digital de dados.



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

Buscando atender um intervalo de frequências que pudesse retratar a maioria dos sons ouvidos pelo ser humano, adotou-se para este estudo um intervalo de frequência entre 500 Hz e 2000Hz. Utilizando a Equação 9 e considerando a velocidade do som sendo 343 m/s, foi possível obter o intervalo do comprimento de ondas que verificado na câmara acústica construída (Tabela 8).

$$\lambda = \frac{v}{f} \qquad (9)$$

Em que:

λ – comprimento da onda (m)

v – velocidade da onda (m/s)

f – frequência da onda (Hz)

Tabela 8 - Dados da onda sonora

Frequência Central (Hz)	Velocidade (m/s)	Comprimento (m)
500	343	0,69
1000	343	0,34
2000	343	0,17

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

A avaliação do desempenho acústico das matrizes cimentícias consistiu na mensuração do potencial de atenuação sonora frente às frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz (frequências centrais de bandas de oitava), que se encontram dentro das frequências centrais indicadas na norma ISO 266 (ISO 266, 1997) (Azevedo, 2018; Criado *et al*., 2024). Foi realizado ensaio em quatro placas de cada composição de argamassa e realizada uma análise comparativa do comportamento do material em função tanto do incremento do resíduo quanto da faixa espectral avaliada (Criado *et al*., 2024). A determinação da dimensão longitudinal da câmara acústica foi balizada pelo critério de propagação do comprimento de onda (λ) intrínseco às frequências analisadas. Com o intuito de garantir o pleno desenvolvimento da onda senoidal e permitir a estabilização do campo sonoro antes da interação com instrumento de captação de saída, o aparato foi desenvolvido com um comprimento linear total de 100 cm. Sabendo que a velocidade de propagação do som no ar a 20ºC é de aproximadamente 343 m/s, a menor frequência avaliada (500 Hz) estabelece o limitante físico do ensaio por apresentar o maior comprimento de onda, calculado em 68,6 cm (Bistafa, 2011). A extensão adotada confere uma margem geométrica segura, sendo plenamente capaz de englobar a totalidade dos ciclos de onda de todas as frequências centrais estudadas (500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz), mitigando efeitos de campo próximo e assegurando a confiabilidade física das medições de atenuação (Bistafa, 2011). Consequentemente, os critérios de propagação ondulatória subsidiaram também a determinação do posicionamento espacial dos transdutores de recepção (microfones de medição) (Criado *et al*., 2024). Com o propósito de mitigar a influência de flutuações de pressão no campo próximo imediato da fonte, os pontos de captação foram fixados de forma estratégica ao longo do eixo longitudinal do aparato. O primeiro transdutor, responsável pela amostragem do nível de pressão sonora incidente (entrada), foi instalado a uma distância linear de aproximadamente 25 cm em relação ao plano da fonte eletroacústica (alto-falante). Por sua vez, o segundo transdutor, incumbido de registrar o sinal após a interação com a barreira, foi posicionado a aproximadamente 75 cm da fonte emissora (saída). Essa configuração

estabeleceu um espaçamento entre microfones de aproximadamente 50 cm, delimitando com precisão as zonas de medição a montante e a jusante do corpo de prova cimentício (Criado *et al*., 2024).

A avaliação do desempenho acústico das matrizes cimentícias consistiu na mensuração do potencial de atenuação sonora frente às frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz (frequências centrais de bandas de oitava), que se encontram dentro das frequências centrais indicadas na norma ISO 266:1997 (ISO, 1997).

Durante a avaliação das placas, o sinal sonoro na entrada foi padronizado em 71 dB (500 Hz), 68 dB (1000 Hz) e 65 dB (2000 Hz). A propriedade de interesse – a Atenuação Acústica Bruta (A_{Bruta}) – foi determinada matematicamente pela diferença entre os Níveis de Pressão Sonora de entrada e saída para cada corpo de prova, fornecendo o poder de isolamento real do material desenvolvido, conforme Equação 10.

$$A_{Bruta} = NPS_{entrada} - NPS_{saída} \quad (10)$$

Em que:

A_{Bruta} – Atenuação bruta (em dB).

$NPS_{entrada}$ – Nível de pressão sonora de entrada (em dB).

$NPS_{saída}$ – Nível de pressão sonora de saída (em dB).

Na caracterização acústica de materiais, a atenuação bruta contempla tanto o bloqueio exercido pela placa cimentícia quanto as perdas geométricas, vazamentos laterais e acoplamento inerentes ao aparato experimental. Para isolar estritamente a contribuição intrínseca do compósito cimentício, aplica-se o desconto do sinal "sem placa" ($A_{Bruta,\ sem\ placa}$), definindo a Atenuação Líquida ($A_{líquida}$) conforme a Equação 11.

$$A_{líquida} = \left(NPS_{entrada,\ placa} - NPS_{saída,\ placa}\right) - \left(NPS_{entrada,\ sem\ placa} - NPS_{saída,\ sem\ placa}\right) \quad (11)$$

Em que:

$A_{líquida}$ – Atenuação Líquida (em dB).

$NPS_{entrada,placa}$ – Nível de pressão sonora de entrada com placa (em dB).

$NPS_{saída,\ placa}$ – Nível de pressão sonora de saída com placa (em dB).

$NPS_{entrada,sem\ placa}$ – Nível de pressão sonora de entrada sem placa (em dB).

$NPS_{saída,\ sem\ placa}$ – Nível de pressão sonora de saída sem placa (em dB).

2.2.7. Análises Estatísticas

Para assegurar o rigor inferencial diante do tamanho das amostragens, amostragem (quantidades de corpos de prova), os dados de resistência à compressão, tração por compressão diametral absorção de água e atenuação sonora foram submetidos a uma análise de confiabilidade baseada na distribuição t de Student a um nível de confiança de 95% (α = 0,05). Do ponto de vista estatístico, a escolha desse nível de confiança estabelece um ponto de equilíbrio ótimo entre o rigor no controle do Erro (minimizando a 5% o risco de conclusões falso-positivas) e o poder estatístico do teste diante da dimensão amostragem. Níveis de confiança superiores (como 99%) resultariam em um conservadorismo excessivo na distribuição t de Student (t_{crit} muito elevado), inflacionando as margens de erro e reduzindo a sensibilidade analítica para a detecção de variações microestruturais reais. Por outro lado, níveis de confiança inferiores (como 90%) comprometeriam a confiabilidade requerida para a estimativa dos resultados.

Sendo assim, para cada resultado devem ser identificados os seguintes dados:

a) Número de Amostras (n): número de corpos de prova (CPs).

b) Graus de Liberdade (gl): representa a quantidade de informações independentes e "livres para variar" disponíveis em um conjunto de dados durante o cálculo de uma estimativa estatística. Calculado pela Equação 12, gl = n-1 = 4-1 = 3

$$gl = n - 1 \qquad (12)$$

a) Nível de Confiança (1-α): Adotou-se 95% (α = 5%)

b) Valor Crítico de t (t_{crit}): Consultado na Tabela de Student a partir dos valores de grau de liberdade (gl) e nível de confiança (α)

A fim de complementar a análise, também foi calculado o Coeficiente de Variação (CV%), que é uma medida de dispersão relativa utilizada para estimar a variabilidade de um conjunto de dados em relação à sua média. Ele expressa o desvio padrão como uma porcentagem da média, o que o torna ideal para comparar a precisão ou a heterogeneidade entre diferentes grupos de dados, independentemente de suas unidades de medida. O cálculo é realizado por meio da Equação 13.

$$CV = \left(\frac{S}{\overline{X}}\right) \times 100\% \qquad (13)$$

Em que:

S - Desvio padrão da amostra.

$\bar{X}$ - Média aritmética dos dados.

A margem de erro (ME) também foi calculada, pois mede a extensão da incerteza de uma estimativa amostral em relação ao valor real da amostragem. Ela é calculada multiplicando o valor crítico (que depende do nível de confiança desejado) pelo erro padrão da estimativa, conforme Equação 14.

$$ME = t_{crit} \times \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) \quad (14)$$

Em que:

t_{crit} – Valor crítico extraído da Tabela t de Student em função do nível de confiança escolhido e do grau de liberdade.

s - Desvio-padrão amostral.

n – Número de amostras.

$\frac{s}{\sqrt{n}}$ - Erro Padrão da Média (SEM).

A partir desses valores é possível obter o intervalo de confiança que é uma estimativa por amplitude que estabelece uma faixa de valores plausíveis dentro da qual se espera encontrar o verdadeiro parâmetro populacional, com um determinado nível de certeza estatística (geralmente 95%).

A fórmula matemática utilizada para deduzir o Intervalo de Confiança (IC) da média é dada pela Equação 15.

$$IC = \bar{X} \pm t_{crit} \cdot \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) \quad (15)$$

Em que:

$\overline{\text{X}}$ - Média amostral

s - Desvio padrão amostral

n – Número de amostras.

Para avaliar o efeito simultâneo de mais de um critério sobre o resultado obtido, utilizou-

se a Análise de Variância com Interação (ANOVA), também adotando-se o nível de significância de 5% ($\alpha = 0{,}05$). A análise Bifatorial ou Trifatorial ocorrem de acordo com a quantidade de fatores a serem analisados (2 ou 3 respectivamente).

O método fundamenta-se na decomposição da variação total dos dados (SQ_{Total}) em parcelas atribuíveis aos fatores isolados (SQ_{FatorA}; $SQ_{FatorB;}$ SQ_{FatorC}) somadas à interação entre eles (SQ_{AxB}; SQ_{AxC}; SQ_{BxC}; SQ_{AxBxC}) e ao erro experimental aleatório (SQ_{Erro}), conforme pode ser observado na Equação 16.

$$SQ_{Total} = SQ_{FatorA} + SQ_{FatorB} + SQ_{Fator\,C} + SQ_{AxB} + SQ_{AxC} + SQ_{BxC} + SQ_{AxBxC} + SQ_{Erro} \qquad (16)$$

Matematicamente, a Soma dos Quadrados Total e os Quadrados Médios (MQ) são calculados pelas Equações 17 e 18.

$$SQ_{Total} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} Y_{ijk}^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N} \qquad (17)$$

$$MQ_x = \frac{SQ_x}{gl_x} \qquad (18)$$

Em que:

Y_{ijk} - resultado observada na replicação k

N - número total de observações: ($N = a \cdot b \cdot c \cdot n$)

SQ_x - soma dos quadrados da fonte de variação analisada

gl_x - respectivos graus de liberdade:

a) $gl_{\text{Total}} = N - 1$

b) $gl_{FatorA} = a - 1$

c) $gl_{\text{FatorB}} = b - 1$

d) $gl_{FatorC} = c - 1$

e) $gl_{AxB} = (a-1)(b-1)$

f) $gl_{AxC} = (a-1)(c-1)$

g) $gl_{BxC} = (b-1)(c-1)$

h) $gl_{AxBxC} = (a-1)(b-1)(c-1)$

i) $gl_{Erro} = gl_{\text{Total}} - (gl_A + gl_B + gl_C + gl_{AB} + gl_{AC} + gl_{BC} + gl_{ABC})$

A significância estatística de cada efeito foi testada pela razão de variâncias (Estatística F), dividindo-se o Quadrado Médio do efeito (MQ_x) pelo Quadrado Médio do Erro Residual (MQ_{Erro}), conforme Equação 19.

$$F_{calc} = \frac{MQ_x}{MQ_{Erro}} \tag{19}$$

A hipótese nula (H0) de igualdade entre as médias (onde considera-se que não existe diferença significativa entre os resultados) é rejeitada sempre que $F_{\text{calc}} > F_{\text{crit}}$ (extraído da tabela de distribuição F de Fisher-Snedecor para gl_x e gl_{Erro} a 95% de confiança).

A magnitude prática de cada fonte de variação foi quantificada pelo Tamanho do Efeito (η^2 — Eta-quadrado), conforme Equação 20, definida pela razão entre a Soma dos Quadrados da fonte (SQ_{Efeito}) e a Soma dos Quadrados Total (SQ_{Total}).

$$\eta^2 = \frac{SQ_{Efeito}}{SQ_{Total}} \times 100\% \tag{20}$$

CAPÍTULO III

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este item apresenta os resultados experimentais obtidos, viabilizando a avaliação técnica e ambiental da incorporação de Resíduos de Construção Civil (RCC) na produção de placas cimentícias.

3.1. Caracterização Física

3.1.1. Massa Unitária

Com a finalização da etapa experimental realizada em conformidade com a descrição do capítulo de metodologia, foram aplicados os modelos matemáticos expressos pelas Equações 1 e 2, os parâmetros analisados (Massa unitária e Índice de Vazios) foram determinados e encontram-se sintetizados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores médios da Massa unitária e índice de vazios da areia e RCC

Categoria	Parâmetro	Unidade	RCC	Areia
Dados experimentais	Diâmetro interno	cm	4,00	4,00
	Altura	cm	2,00	2,00
	Área da seção transversal	cm^2	12,57	12,57
	Volume do recipiente	cm^3	25,13	25,13
	Massa do agregado com o recipiente (m_{ar}) – média	g	41,70	42,30
	Massa do recipiente (m_r)	g	6,90	6,90
	Densidade do RCC	g/cm^3	2,05	2,54
	Densidade da água	g/cm^3	0,99	0,99
Resultados (médias)	Massa unitária (Método C)	g/cm^3	1,38	1,41
	Índice de vazios (%)	–	32,45	44,43

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Para o RCC, a análise estatística das três determinações da massa unitária resultou em um valor médio de 1,38 g/cm^3. A dispersão dos dados obtidos nas triplicatas experimentais revelou um desvio padrão amostral de ±0,019 g/cm^3 o que resulta em um coeficiente de variação (CV) de 1,44%. O fato de a variabilidade relativa apresentar-se inferior ao limite aceitável de 5% atesta a reprodutibilidade do método, demonstrando boa precisão operacional no processo de preenchimento e adensamento da amostra no recipiente.

No que tange à avaliação do índice de vazios (E_v), obteve-se o índice de vazios médio

real de 32,45%. Analisando as variações das triplicatas da massa, as determinações individuais de índice de vazios oscilaram em 33,48%, 32,58% e 31,3%. Estatisticamente, esse conjunto expressa um desvio padrão de ±1,09% e um coeficiente de variação de 3,38%, confirmando a estabilidade das medições laboratoriais.

A avaliação do material de referência (Areia), submetido à mesma sistemática de ensaios em triplicata, apresentou uma massa unitária média de 1,41 g/cm^3. A análise estatística desse parâmetro revelou um desvio padrão amostral de ±0,019 g/cm^3, o que resultou em um Coeficiente de Variação (CV) de 1,41%. Assim como observado no RCC, a reduzida amplitude do desvio padrão e o CV abaixo do teto de 5% ratificam a reprodutibilidade no manuseio e adensamento da areia.

Quanto ao índice de vazios, com base na densidade absoluta aferida de 2,54 g/cm^3, estabeleceu a porcentagem de 44,43%, representando a média para as determinações de 45,18%, 44,51% e 43,61%, obtendo-se um desvio padrão amostral de ±0,79% e um CV de 1,77%. Esses índices estatísticos confirmam a homogeneidade do lote e a confiabilidade das medições efetuadas.

Conclui-se que o controle estatístico embasado em triplicatas ratificou a precisão dos ensaios por meio de baixos coeficientes de variação, assegurando que os resultados desta pesquisa reflitam de forma bastante confiável o comportamento físico dos agregados.

Ao analisar os resultados obtidos para a massa unitária, o RCC apresentou o menor valor (1,38 g/cm^3) em comparação à areia natural (1,41 g/cm^3), configurando um incremento de aproximadamente 1,72%, também apresentando menor índice de vazios (32,45%) em relação ao agregado natural (44,43%) o que representa uma diferença de 11,98% no volume de vazios. Esse comportamento é típico de agregados reciclados (Angulo; Figueiredo, 2022; Bernardon *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2019).

Do ponto de vista físico e morfológico, essa menor quantidade de vazios pode ser atribuída à provável heterogeneidade granulométrica inerente aos resíduos de construção civil (Angulo; Figueiredo, 2022). A presença de diferentes formatos de partículas associada a uma fração maior de finos no RCC promove um melhor empacotamento das partículas intergranulares (efeito de preenchimento) (Ulsen *et al*., 2010). Consequentemente, há uma diminuição do volume de poros livres no sistema (menor índice de vazios). Tal constatação é fundamental, pois o comportamento físico diferenciado do RCC, caracterizado por uma menor densidade e um maior índice de vazios e porosidade intrínseca, impactará diretamente nas propriedades no estado fresco e endurecido de misturas que venham a utilizá-lo como agregado alternativo (Angulo; Figueiredo, 2022; Silva Júnior; Rêgo Silva; Pinheiro, 2015).

No estado fresco, a maior taxa de absorção de água e a presença acentuada de materiais finos pulverulentos reduzem a consistência e a trabalhabilidade da mistura (Bernardon *et al*., 2020; Ferreira *et al*., 2019), demandando frequentemente um acréscimo expressivo no fator água/cimento para manter o espalhamento adequado (Aguiar *et al*., 2018). Consequentemente, no estado endurecido, esse aumento de porosidade e a fragilidade estrutural desencadeiam reduções significativas na densidade de massa e nas resistências mecânicas à compressão axial e à tração na flexão, além de elevar os índices de absorção de água por capilaridade e imersão (Bernardon *et al*., 2020; Ferreira *et al*., 2019). Dessa forma, o controle do teor de substituição e a otimização das proporções tornam-se indispensáveis para viabilizar o desempenho técnico das misturas com agregados reciclados (Ferreira *et al*., 2019; Silva Júnior; Rêgo Silva; Pinheiro, 2015).

3.1.2. Análise Granulométrica

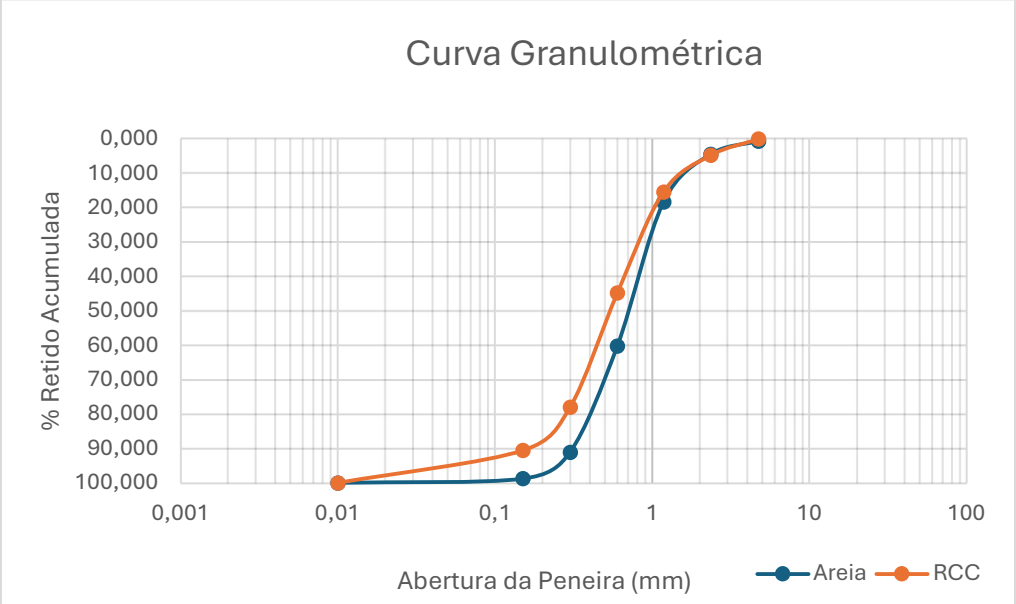
A análise da distribuição do tamanho das partículas é fundamental para compreender o comportamento de empacotamento dos materiais previamente discutido. A distribuição do tamanho das partículas e a presença de frações finas afetam significativamente a consistência, a densidade de massa e a perda de fluidez ao longo do tempo (Casali *et al*., 2024). Adicionalmente, o formato das partículas altera o coeficiente de uniformidade do agregado, o que impacta a trabalhabilidade e a demanda por água da mistura (Fabro *et al*., 2011). Embora modificações granulométricas possam reduzir ligeiramente a fluidez, o controle rigoroso dessas frações e o uso de teores apropriados de finos possibilitam a obtenção de desempenhos mecânicos aceitáveis em ensaios de resistência mecânica, além de regular a absorção de água (Ferreira *et al*., 2019; Ulsen *et al*., 2010)

A Figura 20 ilustra as curvas granulométricas dos agregados miúdos estudados (Areia natural e RCC). Observando o gráfico, nota-se que nas frações mais grossas (aberturas superiores a 1,18 mm), ambas as curvas apresentam um comportamento semelhante e quase sobreposto, com baixos percentuais de retenção. No entanto, o distanciamento entre as curvas torna-se evidente nas frações intermediárias e finas (aberturas entre 0,15 mm e 0,6 mm). O Resíduo de Construção Civil (RCC) apresenta menores porcentagens de material retido acumulado nestas peneiras em comparação à areia.

A título de exemplo, na malha de 0,3 mm, a areia apresenta 91% de retenção acumulada, enquanto o RCC retém 78%. Na peneira de 150 μm, a areia atinge praticamente a totalidade de retenção, demonstrando ausência significativa de finos passantes, ao passo que o RCC ainda

permite a passagem de cerca de 10% de sua massa. Esses dados indicam que o RCC possui um Módulo de Finura inferior e uma curva mais suave e contínua em direção às frações menores, caracterizando-o como um material que contém uma proporção notavelmente maior de finos em sua composição.

Figura 20 - Curva Granulométrica obtida por meio do ensaio de granulometria do RCC e Areia



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Esta caracterização granulométrica justifica e corrobora diretamente os resultados físicos obtidos de massa unitária e índice de vazios. A maior presença de partículas finas no RCC atua em um processo de micro-preenchimento, onde as partículas de menor diâmetro se alojam nos interstícios (vazios) deixados pelas partículas maiores. Esse fenômeno, conhecido como efeito de empacotamento, é o mecanismo físico responsável pela redução do índice de vazios, ainda que a massa unitária observada no RCC permaneça menor, quando comparado à areia natural, que possui uma distribuição granulométrica mais uniforme e carente de finos (Tenório, 2007; Ulsen *et al.*, 2010). A análise granulométrica dos agregados encontra-se sintetizada na Tabela 10.

Tabela 10 - Características aferidas no ensaio de granulometria

Característica Aferida	RCC	Areia
Dimensão Máxima	2,36	2,36
Módulo de Finura	2,33	2,73

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Por fim, os resultados da análise granulométrica via peneiramento indicam que, embora o agregado miúdo natural e o RCC possuam origens e constituições distintas, em termos de distribuição granulométrica são bastante semelhantes. Sob a ótica tecnológica, essa conformidade granulométrica é um indicativo de que as argamassas produzidas com esses insumos poderão apresentar demandas de água e propriedades de consistência bastante aproximadas (Ferreira *et al*., 2019; Silva Júnior; Rêgo Silva; Pinheiro, 2015).

3.1.3. Densidade

A massa específica da areia e do RCC são apresentadas na

Tabela 11, considerando a temperatura de medição 25ºC e densidade da água igual a 0,997 g/cm^3, por meio da aplicação da Equação 4.

Tabela 11 - Densidade pelo método do picnômetro para o agregado miúdo

Dados	**Areia**			**RCC**		
	1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
$m_{pic+água+mat}$	159,070	159,117	159,092	158,654	158,803	158,665
$m_{pic+água}$	157,865	157,891	157,885	157,625	157,782	157,633
m_{mat}	2,002	2,008	2,007	2,006	2,008	2,006
Densidade (g/cm^3)	2,541	±	0,031	2,055	±	0,013

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

A determinação desta propriedade é fundamental para discernir a porosidade intrínseca das partículas em relação ao arranjo espacial do conjunto de partículas.

Os resultados obtidos indicam que a areia natural apresentou uma densidade de 2,541 g/cm^3, valor característico para agregados quartzosos convencionais (Silva Júnior; Rêgo Silva; Pinheiro, 2015). Em contrapartida, o RCC registrou o valor de 2,055 g/cm^3 que representa uma redução de 19,13% na densidade em relação ao material natural. Conforme descrito por Bazuco (1999), a densidade da argamassa aderida às partículas do concreto original é menor, provocando a diminuição da densidade do resíduo, levando a resultados menores que os observados em agregados naturais.

Essa redução significativa na densidade do RCC é justificável pela constituição mineralógica e pela natureza do processo de reciclagem do resíduo (Bazuco, 1999; Tenório, 2007). Diferentemente da areia natural, cujas partículas são predominantemente rochosas e

maciças, o RCC possui em sua composição parcelas relevantes de argamassa acoplada, pasta de cimento hidratado e materiais cerâmicos (Ulsen *et al*., 2010). Tais constituintes apresentam elevada porosidade intra-granular (poros internos presentes na própria estrutura da partícula), o que reduz sensivelmente a massa específica do material como um todo (Bazuco, 1999; Tenório, 2007). A inter-relação entre a densidade, a granulometria e a massa unitária previamente analisadas reafirma aspecto físico relevante: embora o RCC possua partículas intrinsecamente menos densas e mais porosas do que as da areia natural, sua curva granulométrica mais contínua e rica em finos permitiu um empacotamento inter-granular mais eficiente (Ulsen *et al*., 2010). Isso explica o motivo pelo qual o RCC apresentou uma massa unitária superior e um índice de vazios inferior aos da areia, mesmo sendo constituído por um material individualmente mais leve.

A massa específica do resíduo e da areia são parâmetros essenciais para o ajuste preciso da dosagem da mistura, garantindo a sua homogeneidade e desempenho. Segundo Pasoti (2020), estes parâmetros podem contribuir para o aumento da resistência à compressão, no sentido de quanto maior a massa específica do agregado, maior será a resistência à compressão. Portanto a diferença na densidade dos agregados miúdos poderá afetar a proporção da mistura (Sonawane; Pimplikar, 2023).

3.2. Caracterização Microestrutural

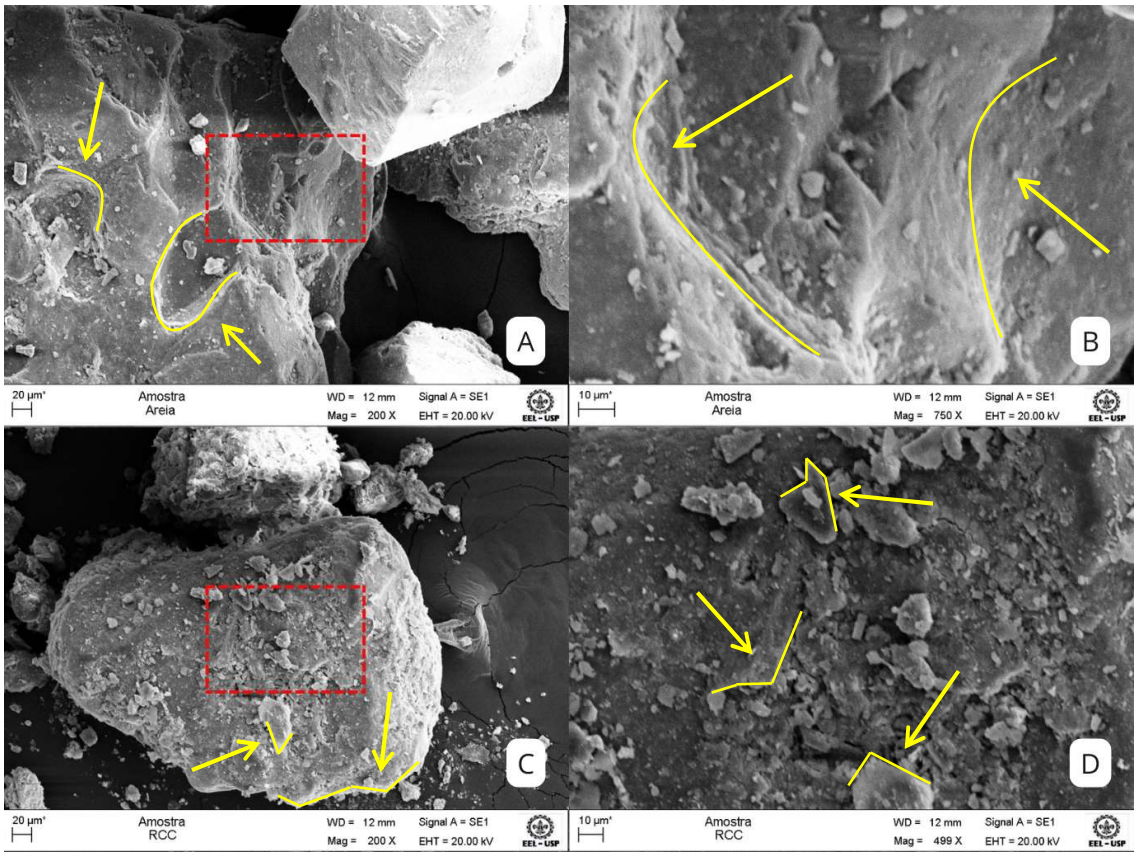
3.2.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias obtidas por MEV do agregado natural (areia) e do RCC, que evidenciam os aspectos texturais e a topografia superficial dos materiais, encontram-se apresentadas na Figura 21. A Figura 21 B é uma ampliação da Figura 21 A, ambas tratando da Areia, e a Figura 21 D é uma ampliação da Figura 21 C, ambas tratando do RCC, referentes às regiões circundadas em vermelho.

As imagens da Figura 21 (A-B) apresentam características típicas de agregado natural processado, com partículas nas formas subangulares e subarredondadas – setas e linhas amarelas (Fabro *et al.*, 2011; Neville; Brooks, 2010). Ulsen *et al*. (2010) indica que existe algum nível de transporte geológico ou desgaste natural antes da extração, pois são bem definidos e individuais. Não apresenta grandes aglomerados de partículas finas, o que é consistente com o processo de "lavagem" que remove o material pulverulento. A superfície das partículas aparece relativamente lisa e densa, com fraturas concoidais (superfícies curvas e lisas) típicas do mineral Quartzo (SiO_2), onde também é possível observar uma superfície com pouca porosidade

intrínseca e poucas microfissuras (Tenório, 2007; Ulsen *et al.*, 2010). Nas imagens da Figura 21 (C-D) referentes ao RCC é possível observar uma microestrutura típica de materiais compósitos e reciclados, o que pode ser corroborado pelo trabalho de Tenório (2007). De acordo com Bazuco (1999), ao contrário da areia, as partículas de RCC não são independentes, são aglomerados irregulares e as arestas são mais angulares e rugosas – setas e linhas amarelas, característico do processo de britagem do material reciclado. A característica mais marcante é a textura superficial rugosa com microtextura porosa e irregular, identificada pelas cavidades e irregularidades na superfície das partículas (Bazuco, 1999; Tenório, 2007).

Figura 21 - Imagens do Agregado Natural – Areia (A e B) e RCC (C e D) obtidas através de MEV



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Segundo Correia e Couto (2018), mesmo não estando evidente nas imagens e em comparação com o agregado reciclado, o agregado natural pode se apresentar com formato menos lamelar. É possível observar, conforme discussão presente ainda no trabalho de Correia e Couto (2018) que partículas finas e achatadas podem reduzir a resistência do material cimentício quando o agregado tem uma carga aplicada no seu lado achatado. Além disso, partículas mais angulares e mais lamelares tendem a prejudicar a consistência do concreto,

exigindo, então, mais água ou teor de pasta para que os concretos reciclados alcancem consistência adequada. Esse comportamento reológico e a necessidade de elevação do fator água/cimento devido ao formato irregular e textura rugosa das partículas também são corroborados por Aguiar *et al.* (2018) ao analisarem o comportamento no estado fresco de argamassas com substituição integral, e por Ferreira *et al.* (2019), que identificam o impacto dessas características geométricas nas propriedades mecânicas e de consistência. Adicionalmente, as análises microestruturais e mineralógicas desenvolvidas por Ulsen *et al.* (2010) demonstram como a morfologia das frações miúdas influenciam diretamente o empacotamento e a demanda por água nas misturas cimentícias.

Segundo Bauer (2025) os agregados influenciam em diversas características dos concretos e argamassas, sendo elas: resistência à compressão, retração, durabilidade, trabalhabilidade, permeabilidade e higroscopia.

A fim de comparar os resultados obtidos nas duas amostras, a Tabela 12 apresenta os resultados apontando possíveis implicações técnicas da utilização de cada um dos materiais.

Tabela 12 - Comparativo da morfologia da Areia e RCC e possível implicação técnica para produção de argamassas ou concretos.

Característica	**Areia Lavada**	**RCC**	**Possível Implicação Técnica**
Superfície	Lisa, vítrea, fratura concoidal (Quartzo)	Rugosa, porosa, incrustada.	A areia tem menor absorção de água. O RCC, por ser poroso/rugoso, absorverá mais água da mistura.
Limpeza	Partículas individuais "lavadas"	Presença de finos e pasta aderida.	A pasta aderida no RCC pode enfraquecer a "Zona de Transição Interfacial" (ZTI) em um novo concreto.
Forma	Subarredondada a Subangular	Angular e Irregular (fratura mecânica).	O RCC pode gerar maior travamento mecânico devido à angulosidade, mas reduz a trabalhabilidade da mistura.
Homogeneidade	Alta (fase mineral única predominante)	Baixa (mistura de diferentes materiais cimentícios e de cerâmicas vermelhas).	O RCC introduz maior variabilidade nas propriedades mecânicas de argamassas ou concretos

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

3.3. Caracterização Físico-química

3.3.1. Espectroscopia de Dispersão de Raios X (EDS)

Os resultados obtidos por meio da Espectroscopia de Dispersão de Raios X (EDS), que fundamentam a discussão deste item, encontram-se apresentados na Tabela 13, enquanto a Tabela 14 reúne a síntese e a interpretação da composição química de ambos os agregados.

Tabela 13 – Composição elementar obtida por meio de EDS das amostras de Areia e RCC

Elemento	Areia		RCC	
	% Peso	% Atômica	% Peso	% Atômica
Al	4.80	5.94	10.46	13.46
Si	74.43	88.52	58.05	71.74
Fe	4.24	2.54	5.48	3.41
Ca			8.14	7.05
Ti			1.79	1.30
Outros	16.53	3.00	16.07	3.03
Total	100.00		100.00	

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Constata-se que na areia o Silício (Si) é o elemento dominante com 74,43 % em peso. Isso indica que a matriz principal da amostra é sílica (SiO_2). Já o Alumínio (Al) e o Ferro (Fe) estão presentes em quantidades menores (4,80% e 4,24% em peso, respectivamente), que sugere a presença de óxidos de ferro (que dão cor à areia) ou minerais de argila/feldspato, e outras impurezas totalizam 16,53% em peso.

A amostra de RCC, por se tratar de um resíduo composto por diversos materiais, apresenta uma composição química complexa e heterogênea. A significância dessa heterogeneidade reside na impossibilidade de garantir uma composição constante ou padronizada, visto que os materiais originários do processo de reciclagem variam conforme a fonte geradora. Ressalta-se, contudo, que a avaliação do impacto dessa variação química, bem como a verificação sobre a possibilidade dessa característica alterar significativamente as propriedades finais da mistura, não fez parte das análises realizadas neste trabalho.

O Silício (Si) ainda se apresenta como elemento majoritário com 58,05% em peso no

RCC, indicando a presença de agregados (areia/pedra) no resíduo. Já o Cálcio (Ca) apresenta 8,14 % em peso, sendo esperado para materiais cimentícios (pasta de cimento aderida aos agregados), carbonatos ou gesso. A presença de Alumínio (Al) é mais que o dobro da amostra de areia, subindo para 10,46%, sugerindo maior presença de feldspatos ou aluminatos típicos do cimento e tijolo. E o Titânio (Ti) (1,79%) aparece como traço comum em minerais ou pigmentos de tintas em resíduos de construção. Outros elementos totalizam 16,07% em peso, valor próximo ao encontrado na amostra de areia.

Tabela 14 - Comparativo para a presença de elementos (Areia x RCC)

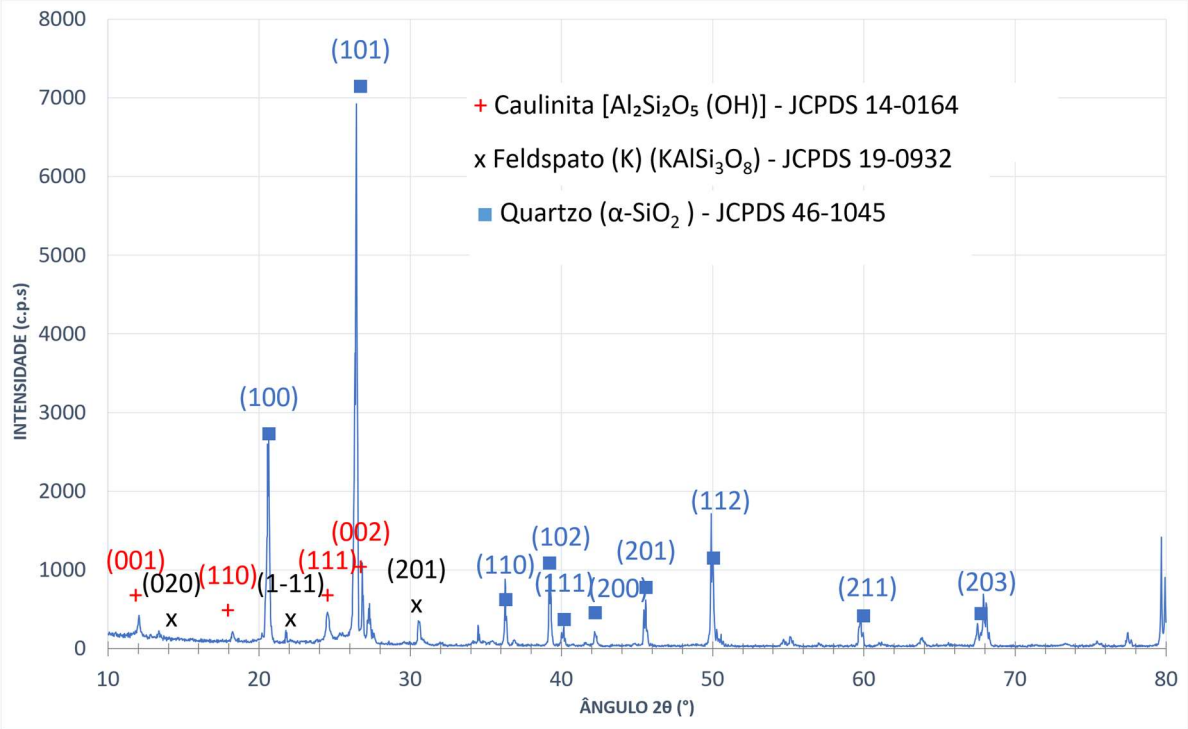
Elemento	**Areia (Peso%)**	**RCC (Peso %)**	**Interpretação**
Silício (Si)	74,43%	58,05%	A areia é mais pura em sílica. O RCC tem menos Si pois está misturado com outros componentes do cimento.
Alumínio (Al)	4,80%	10,46%	O RCC é mais rico em aluminossilicatos (feldspatos ou argilo-minerais do concreto).
Cálcio (Ca)	*Não detectado*	8,14%	Indica presença de cimento/cal/gesso no RCC.
Ferro (Fe)	4,24%	5,48%	Ligeiramente maior no RCC, mas comparável.
Titânio (Ti)	*Não detectado*	1,79%	Impureza específica do RCC.
Outros	16,53%	16,07%	Impurezas

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

3.3.2. Difração de Raios X (DRX)

A caracterização da composição mineralógica e a identificação das fases cristalinas da areia natural foram realizadas por meio da técnica de Difração de Raios X (DRX). O difratograma resultante encontra-se apresentado na Figura 22, no qual se observam os picos de reflexão característicos das fases presentes no agregado miúdo natural.

Figura 22 – Fases cristalinas obtidas por difração de raios x da Areia



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Observa-se um material de elevadíssima cristalinidade, evidenciada pela alta contagem de fótons (intensidade de pico atingindo aproximadamente 7500 c.p.s.). De acordo com Pasoti (2020) e Silva (2018), era esperado que areias de origem quartzo-feldspática, comuns no território brasileiro, apresentassem a fase predominante e de maior intensidade como sendo o Quartzo (α-SiO2) (JCPDS 46-1045), com seu pico principal de máxima intensidade (plano cristalográfico 101) localizado em aproximadamente 26,3º, além de picos secundários bem definidos nos planos (100) em 20,8°, (112) em 50,1°, entre outros.

Destaca-se a identificação de duas fases minoritárias de grande relevância, o Feldspato Potássico ($KAlSi_3O_8$) (JCPDS 19-0932), que é indicado pelo pico próximo a 29,8º (201) como seu principal e picos secundários em 13,8º (020) e em 22,1º (1-11), denotando a presença de minerais formadores de rochas ígneas que não sofreram intemperismo total e a Caulinita [$Al_2Si_2O_5(OH)_4$] (JCPDS 14-0164) que apresenta o pico mais acentuado (002) em aproximadamente 26,4º indicando a presença de argilominerais na composição da areia, além dos picos secundários próximos de 12,35º (001), 18,48º (110) e 24,3º (111) (Pasoti, 2020; Silva, 2018).

Do ponto de vista da engenharia de materiais, a detecção da caulinita é um dado crítico. Na prática de dosagem de concretos e argamassas, a presença de finos argilosos na areia tende a aumentar a demanda de água da mistura (devido à elevada área específica da argila) e pode

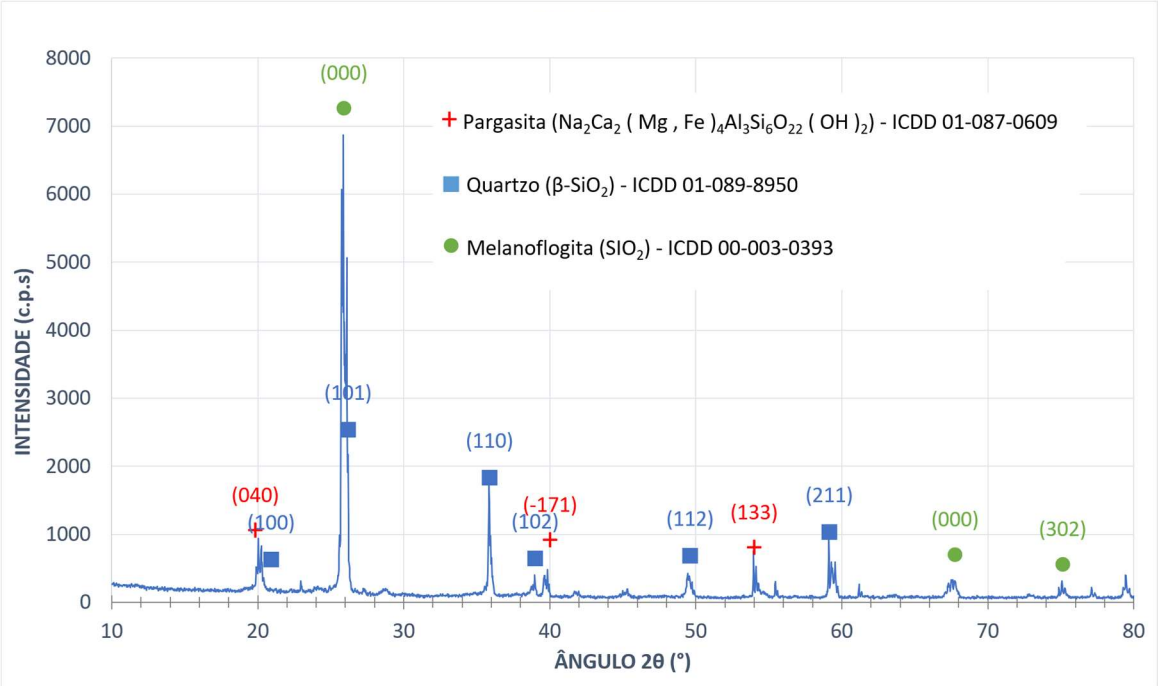
interferir negativamente na zona de transição interfacial (ZTI) entre a pasta de cimento e o agregado, impactando propriedades mecânicas e de durabilidade (Pasoti, 2020; Silva, 2018; Angulo, 2005).

Segundo Marín-Cortés *et al.* (2024), a natureza heterogênea do RCC é refletida na sua complexidade mineralógica. O difratograma da Figura 23 ilustra o padrão de difração do Resíduo de Construção Civil (RCC) e apresenta picos de alta intensidade (próximos a 7000 c.p.s.), indicando a presença de fases altamente cristalinas. A principal fase identificada é de natureza silicosa, associada aos agregados naturais presentes no concreto e na argamassa originais que geraram o resíduo.

O software de análise identificou duas fases de sílica: o Quartzo (β-SiO_2) (ICDD 01-089-8950) e a Melanoflogita (SiO2) (ICDD 00-003-0393). Os seus picos principais estão quase sobrepostos em para o quartzo (101) e para a melanoflogita (plano 000) confirmando a predominância absoluta de dióxido de silício inerte neste resíduo (Ju et al., 2026).

Adicionalmente, identificou-se a presença de Pargasita (Na_2Ca_2 (Mg, Fe)$_4Al_3Si_6O_{22}$ $(OH)_2$) (ICDD 01-087-0609). A pargasita é uma fase típica de rochas metamórficas e ígneas, o que sugere fortemente que o agregado graúdo (brita) utilizado no concreto original de onde o RCC foi extraído era originário de rochas com essa característica mineral.

Figura 23 - Fases cristalinas obtidas por difração de raios x do RCC



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

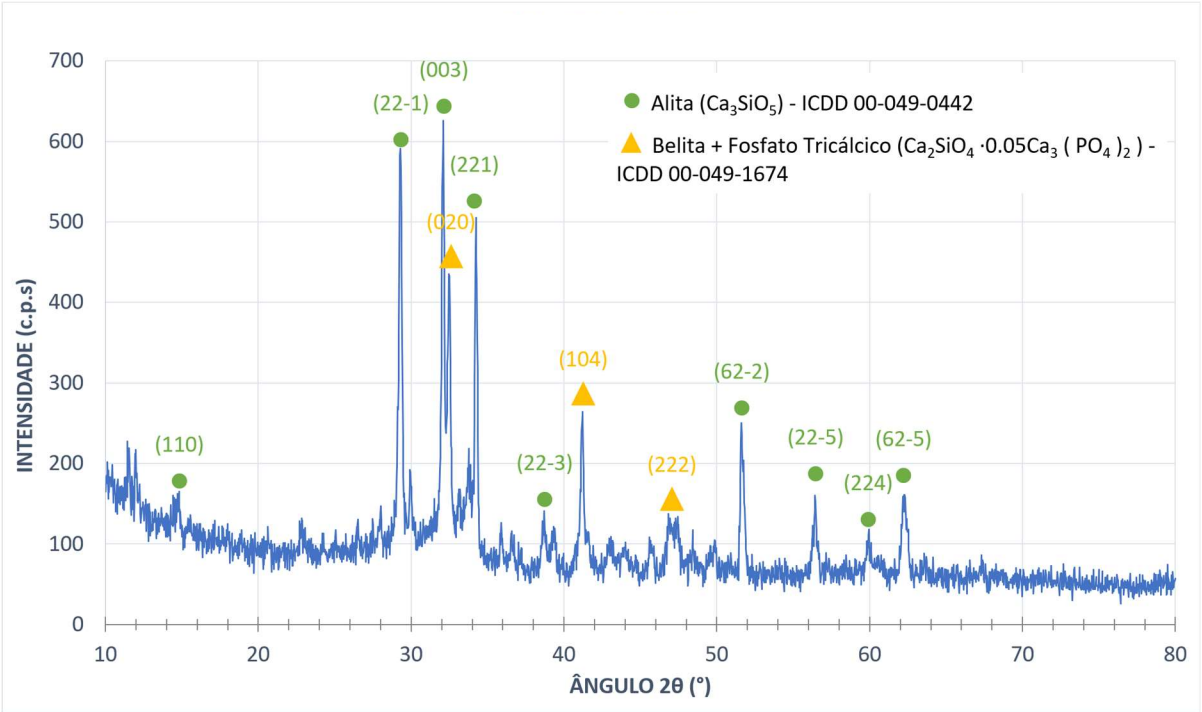
A ausência de picos significativos de fases hidratadas do cimento (como a Portlandita) neste difratograma específico pode indicar duas situações: ou o RCC é predominantemente composto pela fração de agregados do resíduo (fração de moagem com menos pasta aderida) (Ulsen *et al*., 2010), ou as fases da pasta original encontram-se carbonatadas e amorfizadas (Levy, 2001). Esse elevado teor de sílica cristalina corrobora o uso do RCC como um agregado inerte, não se esperando dele atividade pozolânica significativa sem tratamentos térmicos prévios.

A Figura 24 apresenta o difratograma do cimento Portland utilizado, classificado como CP II - E - 40 RS (Cimento Portland Composto com Escória de Alto-Forno, Alta Resistência Inicial e Resistente a Sulfatos).

A análise deste difratograma requer atenção à escala de intensidade e à morfologia da linha de base, pois ao contrário da areia e do RCC, a intensidade máxima registrada é baixa (cerca de 650 c.p.s.), e o gráfico apresenta um "ruído" significativo na linha de base.

Observa-se um abaulamento claro na linha de base entre $2\theta = 25°$ e $35°$. Segundo Ulsen *et al*. (2010), este desvio (halo) é a "assinatura" em DRX de materiais vítreos/amorfos, confirmando a presença da escória de alto-forno granulada, justificando a nomenclatura "E" do cimento. O conteúdo amorfo da escória é responsável pela hidratação latente do material.

Figura 24 - Fases cristalinas obtidas por difração de raios x do CPII - E - 40 RS



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

No que tange às fases cristalinas do cimento, foram identificados os principais silicatos de cálcio responsáveis pelo desenvolvimento de resistência mecânica:

a) Alita (Ca3SiO5) (ICDD 00-049-0442): Fase predominante do clínquer, com picos proeminentes em 2θ de 29,3° (plano 22-1), 32,2° (plano 003), e 34,4° (plano 221) (De Noirfontaine *et al*., 2006). A alta concentração de Alita está em consonância com a classe "40" do cimento, que exige desenvolvimento rápido de resistência nas primeiras idades (Neville; Brooks, 2010).

b) Belita com Fosfato Tricálcico (Ca2SiO4 ·0.05Ca3 (PO4)2) (ICDD 00-049-1674): Responsável pelo ganho de resistência em idades avançadas, identificada por pico sobreposto à Alita, como em $2\theta = 32,6°$ (plano 020) (Neville; Brooks, 2010).

É notável que a caracterização confirme as propriedades designadas pelo fabricante. A presença da escória (halo amorfo) atua no refinamento dos poros e consumo de hidróxido de cálcio, o que, somado a um controle rigoroso do aluminato tricálcico (C_3A) no clínquer (não evidenciado em picos de alta intensidade no gráfico), confere a este cimento a propriedade "RS" (Resistente a Sulfatos) (Hoppe Filho *et al*., 2017).

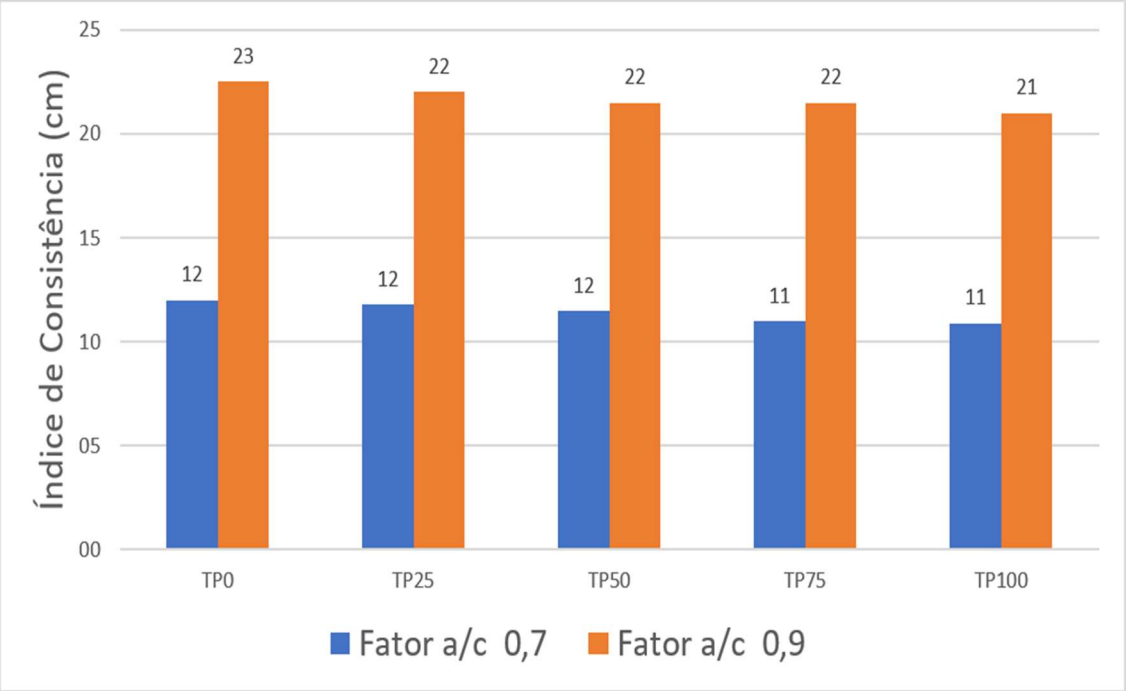
3.4. Ensaios de Desempenho dos Materiais

3.4.1. Consistência da Argamassa Fresca

A avaliação da trabalhabilidade das misturas no estado fresco é um parâmetro fundamental para garantir a viabilidade executiva do material. Os resultados obtidos para o índice de consistência estão ilustrados graficamente na Figura 25, evidenciam o comportamento reológico dos diferentes traços ensaiados (TP0 a TP100) sob duas condições de fator água/cimento (a/c): 0,7 e 0,9.

Com a elevação do fator a/c de 0,7 para 0,9 buscou-se incrementar a trabalhabilidade das misturas, garantindo a fluidez adequada para possibilitar a moldagem dos corpos de prova em forma de placa. Essa adequação assegurou o preenchimento completo das fôrmas e o adensamento uniforme do material, evitando a formação de vazios ou falhas estruturais.

Figura 25 - Índice de consistência por traço e fator a/c



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Como era previsível e perfeitamente condizente com a literatura de tecnologia dos materiais cimentícios, o incremento do fator a/c de 0,7 para 0,9 resultou em um aumento substancial na fluidez de todos os traços analisados. Tomando como base o traço de referência (TP0), o índice de consistência saltou de 12,0 mm (para a/c = 0,7) para 23 mm (para a/c = 0,9), representando um aumento de 87,5% no espalhamento. Este comportamento confirma o papel primário da água livre, que atua reduzindo a tensão de escoamento e lubrificando a matriz sólida, facilitando a mobilidade das partículas (Romano, 2013; Antoniazzi, 2019).

Ao analisar o impacto da incorporação progressiva de RCC, observa-se uma tendência clara e inversamente proporcional: à medida que o teor de TP aumenta, o índice de consistência diminui, independentemente do fator a/c adotado.

Para o fator a/c 0,7, o índice de consistência apresentou uma redução contínua, partindo de 12,0 mm no traço de referência (TP0) e decaindo para 11 mm no traço com substituição total (TP100). Isso representa uma perda de trabalhabilidade da ordem de 9,2%.

Ao observar o comportamento para o fator a/c 0,9, a mesma tendência de retração foi observada, partindo de 23 mm (TP0) e atingindo 21 mm no traço final (TP100), configurando uma queda de aproximadamente 6,7% no espalhamento.

Vale ressaltar um leve platô de estabilização identificado no fator a/c 0,9, onde os traços TP25, TP50 e TP75 apresentaram exatamente o mesmo índice de consistência (22 mm). Este

fenômeno pode indicar uma saturação momentânea na interação físico-química da mistura ou um empacotamento granulométrico nessa faixa de proporção que estabilizou a demanda de água, antes que a consistência voltasse a cair no traço de 100%.

Do ponto de vista da ciência dos materiais, a sistemática perda de fluidez atrelada ao aumento do teor de substituição sugere duas hipóteses principais quanto à natureza desse material:

c) Morfologia e Textura - O material RCC possui partículas com formato mais lamelar/angular e com textura mais rugosa em comparação ao material que está sendo substituído. Isso eleva o atrito interno entre as partículas da pasta durante o ensaio de espalhamento.

d) Área Superficial e Absorção: O RCC possui maior área superficial provocada por sua rugosidade e maior índice de absorção de água (Gomes; Poggiali; Azevedo, 2019). Consequentemente, frações maiores de RCC acabam "sequestrando" parte da água livre da mistura, transformando água livre em água retida/absorvida. Com menos água disponível para lubrificação, a matriz torna-se mais coesa e seca.

A partir dos dados, é possível supor que a incorporação do RCC pode penalizar a trabalhabilidade das misturas, portanto, quanto maior a adição desse material, maior é a necessidade de prever intervenções na dosagem. Para manter o índice de consistência aos mesmos níveis do traço de referência (TP0) sem ter que aumentar ainda mais o fator a/c — o que fatalmente acaba comprometendo a resistência mecânica e a durabilidade do material no estado endurecido —, recomenda-se a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes (Ribeiro, 2021). Dessa forma, será possível compensar a perda de reologia induzida pela morfologia/absorção do RCC, garantindo a adequada aplicação e adensamento da mistura.

3.4.2. Absorção de água

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água são apresentados e discutidos neste tópico, com o propósito de avaliar a influência das variáveis de dosagem e de processamento no comportamento físico e microestrutural das misturas desenvolvidas.

A interpretação e a validação científica dos comportamentos observados têm como suporte a Análise de Variância (ANOVA), cujos parâmetros e estatísticas descritivas encontram-se sumarizados na Tabela 15 de ANOVA do estudo. Essa ferramenta estatística foi adotada para testar as hipóteses nulas (H0) relativas ao efeito principal Fator A -Traço, já que

idade de cura e fator a/c são iguais para todos os corpos de prova, bem como à eventual interferência causada pelo erro residual.

Tabela 15 - Resultados obtidos na ANOVA para absorção de água

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrado Médio (MQ)	Fcalc	Fcrit (α=0,05)	Tamanho do Efeito (η^2)	Decisão Estatística (α=0,05)
Fator A (Traço)	31,44	4	7,86	14,69	3,47	86,46%	Rejeita-se H0 (Significativo)
Erro Residual	5,35	10	0,53	-	-	14,54%	-
Total Global	36,79	14	-	-	-	-	-

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

A estatística do teste resultou em um valor calculado de $F_{calc} = 14{,}69$, o qual supera em mais de quatro vezes o valor crítico de rejeição ($F_{crit} = 3{,}4780$). O que permite rejeitar a Hipótese Nula (H_0), isso confirma que o teor de substituição é uma variável de processo com efeito estatisticamente determinante na porosidade aberta do material.

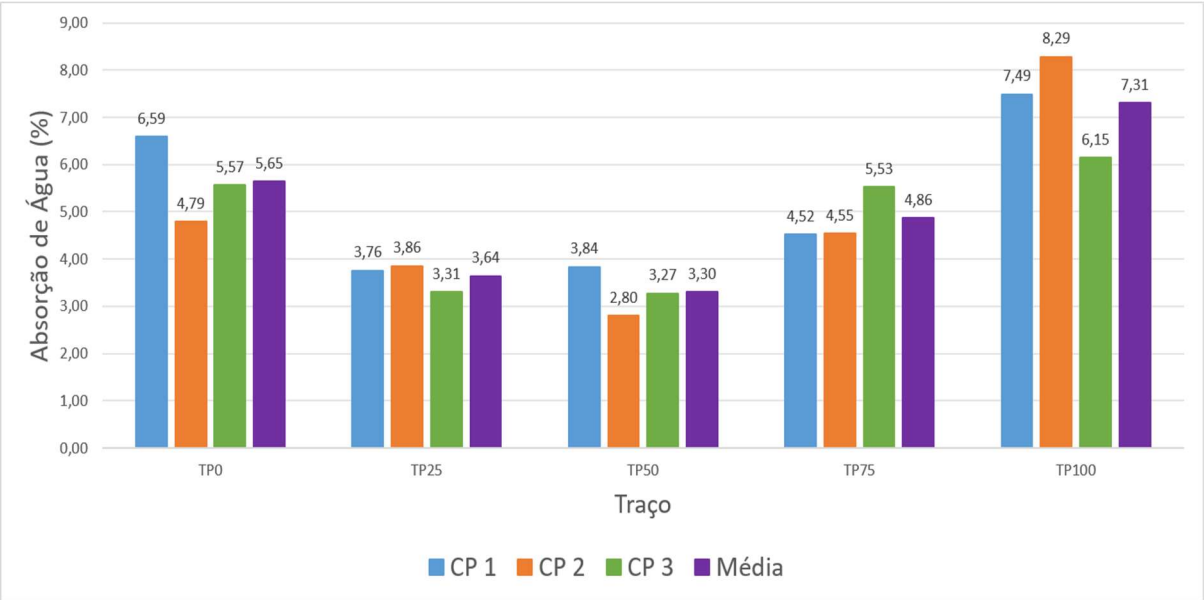
Ainda quanto ao teor de substituição, o coeficiente η^2 revelou-se com 86,46% de toda a variância da absorção de água, demonstrando que é a principal força dominante no comportamento hídrico da matriz.

A parcela residual associada ao erro aleatório (5,35) correspondeu a apenas 14,54% da variação total. O baixo Quadrado Médio do Erro (0,53) reflete a boa reprodutibilidade na moldagem e ensaio dos corpos de prova em triplicata, garantindo que as diferenças observadas entre os grupos não decorrem de falhas operacionais ou variabilidade interna do lote.

A redução expressiva da absorção média — de 5,65% no traço de referência (TP0) para 3,64% em TP25 e o mínimo de 3,30% em TP50 — pode fundamentar-se no efeito de empacotamento e no refinamento de poros. O acréscimo das partículas na substituição preenche os vazios intergranulares e reduz o diâmetro médio dos poros capilares, promovendo a desconexão da rede porosa permeável.

A Figura 26 apresenta os valores de absorção de água para os diferentes traços analisados (TP0, TP25, TP50, TP75 e TP100), permitindo avaliar a influência dos teores crescentes de substituição do agregado natural pelo RCC na porosidade aberta do material.

Figura 26 - Absorção de água por traço



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Diferentemente de uma tendência estritamente linear, os dados revelam um comportamento não linear em formato parabólico (curva em 'U'), delimitado por dois mecanismos físicos concorrentes. Inicialmente, observa-se uma redução contínua na absorção de água partindo do valor médio de 5,65% no traço de referência (TP0), passando por 3,64 % do TP25 até atingir o ponto mínimo de 3,30% no traço TP50, o que representa uma diminuição expressiva de 41,59%. Contudo, para teores de substituição superiores a 50%, a absorção volta a elevar-se, alcançando 4,86% no TP75 e atingindo o pico de 7,31% no traço de substituição integral (TP100), valor 29,38% superior ao do traço de referência.

A explicação para essa inflexão fundamenta-se na inter-relação entre o empacotamento granulométrico e a porosidade intrínseca dos constituintes, anteriormente discutidos. Nos traços com teores moderados de substituição (TP25 e TP50), predomina o efeito de empacotamento, pois a maior quantidade de frações finas presentes no RCC atua preenchendo os vazios intergranulares existentes entre as partículas do agregado natural. Essa redução nos canais de porosidade interconectada reflete no menor índice de vazios observados para essas proporções, culminando na menor absorção de água no TP50.

Por outro lado, nos traços com teores elevados de substituição (TP75 e TP100), o fator porosidade intrínseca do agregado torna-se o mecanismo dominante. Conforme demonstrado no ensaio de densidade, o RCC possui partículas individualmente mais leves e porosos devido à presença de argamassa acoplada e fases cerâmicas. Assim, ao ultrapassar o limiar de 50% de

substituição, a elevada porosidade interna acumulada das partículas de RCC supera os benefícios trazidos pelo empacotamento granulométrico, resultando no aumento expressivo da absorção de água no TP100.

Portanto, sob a ótica da absorção de água e porosidade, o teor de 50% de substituição (TP50) configura-se como a proporção ótima de dosagem, conciliando o máximo aproveitamento do efeito de empacotamento do resíduo sem comprometer a permeabilidade da mistura pela porosidade intrínseca do material reciclado.

3.4.3. Resistência à Compressão

Diante do tamanho da amostragem ($n = 4$ corpos de prova por condição), os dados de tensão de ruptura (MPa) foram submetidos à análise de confiabilidade Student, sendo assim, foram obtidos os seguintes dados:

a) Número de Amostras (n): 4 corpos de prova (CPs) por traço/idade.

b) Graus de Liberdade (gl): Calculado por gl = n-1 = 4-1 = 3

c) Nível de Confiança (1-α): Adotou-se 95% (α = 5%)

d) Valor Crítico de t (t_{crit}): Consultado na Tabela de Student para um teste bicaudal com gl = 3 e α = 0,05: $t_{crit} = 3{,}182$

Nas Tabelas 16 e 17 são apresentados respectivamente os resultados do ensaio de resistência à compressão para os fatores a/c de 0,7 e 0,9 respectivamente. Em ambas as tabelas, são discriminados a média amostral ($\bar{X}$), o desvio-padrão (s), o coeficiente de variação ($CV\%$), a margem de erro e o intervalo de confiança baseado em 95%. De acordo com a ACI 214 R (2011), para análise experimental, os ensaios de laboratório para resistência mecânica podem ser classificados como:

a) Excelente rigor de laboratório: $CV < 10\%$

b) Bom controle: $10\% \leq CV \leq 15\%$

c) Controle fraco / Alta dispersão: $CV > 15\%$

Tabela 16 - Resultado da resistência à compressão - Fator a/c 0,7

Traço	Idade (Dias)	Média ($\bar{X}$) [MPa]	Desvio Padrão (s) [MPa]	Coeficiente de Variação (CV%)	Margem de Erro [MPa]	Intervalo de Confiança (95%) [MPa]
TP0	7	14,37	2,17	15,11%	3,45	[10,92 ; 17,82]
TP0	14	17,29	2,09	12,07%	3,33	[13,96 ; 20,62]
TP0	28	19,64	4,09	20,81%	6,51	[13,13 ; 26,15]
TP25	7	19,93	3,15	15,81%	5,01	[14,92 ; 24,94]
TP25	14	23,55	2,56	10,88%	4,07	[19,48 ; 27,62]
TP25	28	26,31	3,26	12,40%	5,19	[21,12 ; 31,50]
TP50	7	17,25	2,88	16,72%	4,58	[12,67 ; 21,83]
TP50	14	21,92	0,97	4,44%	1,54	[20,38 ; 23,46]
TP50	28	27,15	2,09	7,71%	3,33	[23,82 ; 30,48]
TP75	7	13,19	1,16	8,76%	1,85	[11,34 ; 15,04]
TP75	14	18,95	1,21	6,40%	1,93	[17,02 ; 20,88]
TP75	28	20,27	1,28	6,29%	2,04	[18,23 ; 22,31]
TP100	7	4,40	0,96	21,91%	1,53	[2,87 ; 5,93]
TP100	14	7,65	1,79	23,38%	2,85	[4,80 ; 10,50]
TP100	28	8,72	2,83	32,42%	4,50	[4,22 ; 13,22]

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Tabela 17 - Resultado da resistência à compressão - Fator a/c 0,9

Traço	Idade (Dias)	Média ($\bar{X}$) [MPa]	Desvio Padrão (s) [MPa]	Coeficiente de Variação (CV%)	Margem de Erro [MPa]	Intervalo de Confiança (95%) [MPa]
TP0	28	21,63	2,50	11,60%	3,98	[17,65 ; 25,61]
TP25	28	17,83	2,55	14,30%	4,06	[13,77 ; 21,89]
TP50	28	14,03	0,53	3,80%	0,84	[13,19 ; 14,87]
TP75	28	13,68	1,34	9,80%	2,13	[11,55 ; 15,81]
TP100	28	11,98	1,19	9,90%	1,89	[10,09 ; 13,87]

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Para o a relação água/cimento de 0,7, é possível destacar os traços os traços TP50 (14 e 28 dias) e todas as idades do traço TP75, que alcançaram CV% menores que 10%, sendo classificados como de excelente rigor de laboratório. Ao observar os traços TP0 aos 14 dias e TP25 (14 e 28 dias), o controle laboratorial pôde ser classificado como bom, e os demais traços nas suas respectivas idades foram classificados como controle fraco por possuir alta dispersão. Esta análise comprova que 53,33% dos ensaios foram considerados com excelente ou bom controle laboratorial.

Os altos valores observados para o desvio padrão, podem ser explicados pelas reduzidas

dimensões geométricas dos corpos de prova (diâmetro aproximado de 47mm e área aproximada de 1750mm^2), nos quais pequenas discrepâncias locais de adensamento, alinhamento de carga na prensa ou rugosidades superficiais provocam amplificação proporcional no desvio padrão, sem, contudo, invalidar a tendência das médias.

Quando são analisados os traços com relação água/cimento de 0,9, todos os ensaios foram caracterizados como de excelente ou bom controle laboratorial, havendo destaque para os traços TP 50, TP75 e TP100 que apresentaram coeficiente de variação menor que 10%.

Nos traços de maior teor de substituição (TP100), a expressiva redução nas médias de carga apuradas no ensaio ($\bar{X} = 4{,}40$ a $8{,}72$ MPa) elevam matematicamente o CV% para patamares superiores a 20%, mesmo mantendo um desvio padrão moderado ($s \approx 0{,}96$ a $2{,}83$ MPa).

Ainda ao analisar os resultados obtidos para uma relação a/c de 0,7 foi possível observar que o traço de referência (TP0) apresentou grande perda de confiabilidade na última idade (CV = 20,81%). Analisando os dados, isto pode ter ocorrido, pois um dos corpos de prova apresentou rompimento precoce em relação aos outros. Esse comportamento provém de uma possível falha de capeamento ou concentração localizada de tensões na prensa de ensaios, e não como uma característica intrínseca do traço base. Devido a essa faixa excessivamente larga, o IC do TP0 sobrepõe-se a quase todos os traços (de TP25 a TP100). Porém é importante observar que a amplitude do TP0 decorre do desvio padrão do lote e não necessariamente de uma equivalência real com traços de baixo desempenho.

Já os traços TP25 (todas as idades) se sobrepõem ao TP50 e ao TP75, mas não possuem sobreposição com o TP100 ([4,22;13,22] MPa), confirmando que a substituição de 25% é estatisticamente superior à substituição de 100%.

Para o traço TP 50, o pico de desempenho aos 28 dias entre os traços estudados (27,15 MPa) possui uma excelente sustentação estatística. O Coeficiente de Variação cai para 7,71% e a margem de erro restringe a variação real entre 23,82 e 30,48 MPa. Ao comparar TP50 ([23,82; 30,48]) com TP75 ([18,23; 22,31]), não há sobreposição de intervalos, pois o limite inferior de TP50 (23,82 MPa) é maior que o limite superior (22,31MPa) de TP75. Isso prova que ultrapassar 50% de substituição gera uma perda de resistência estatisticamente significativa.

O traço TP 75, embora apresente menor resistência (20,27 MPa) que o valor máximo encontrado (27,15 MPa), é o estatisticamente mais estável do estudo. O CV manteve-se consistentemente abaixo de 9% em todas as idades, gerando intervalos de confiança estreitos. Isso significa que o comportamento físico do material com 75% de substituição foi

significativamente homogêneo. O intervalo do TP75 está contido dentro do intervalo do TP0, ou seja, é possível substituir 75% do material de referência sem perder a resistência original do controle.

O traço com 100% de substituição exibe dispersões severas, culminando em um CV de 32,42% aos 28 dias. Nota-se que a margem de erro obtida por Student (4,50 MPa) é alta, representando mais da metade da própria média experimental (8,72 MPa). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a saturação total da matriz adicionada somente de RCC comprometeu a trabalhabilidade da mistura. Isso induz a segregação mecânica interna, dificuldade de adensamento nos moldes e geração de vazios macroestruturais aleatórios entre os diferentes CPs, podendo assim justificar a enorme flutuação de resultados. O intervalo do TP100 não se sobrepõe a TP25, TP50 e TP75. Trata-se de um grupo estatisticamente isolado na parte inferior da curva de resistência.

Para os traços com relação a/c de 0,9 observa-se que TP0 apresenta o maior limite superior (25,61 MPa) e o maior valor central (21,63 MPa). Contudo, sua faixa de incerteza é consideravelmente larga devido ao desvio padrão (2,50 MPa). Em comparação com TP25, apesar da média ter caído de 21,63 para 17,83, os intervalos de confiança se sobrepõem fortemente ([17,65; 25,61] *vs* [13,77; 21,89]). Estatisticamente, isso sugere que a diferença entre o controle e a substituição de 25% pode não ser estatisticamente significativa ao nível de 95% de confiabilidade.

Já o TP25 é o traço mais instável do experimento. Devido à sua alta variabilidade (CV = 14,30%), a margem de erro foi muito elevada (±4,06 MPa), aumentando significativamente o intervalo em ambas as direções.

Quando é observado o TP50, com ele foi obtido o ponto de maior consistência experimental. O baixo desvio padrão (0,53 MPa) estreitou o intervalo, dando alta confiabilidade à média obtida (14,03 MPa). Ao comparar TP0 com TP50, não há sobreposição de intervalos (o limite inferior de TP0 é 17,65 MPa e o superior de TP50 é 14,87 MPa). Assim é possível afirmar com 95% de certeza que a queda de resistência é significativa.

Quanto ao TP75, ele apresenta uma média de 13,68 MPa, valor extremamente próximo ao TP50 (14,03 MPa). E o TP100 marca o piso absoluto do ensaio, atingindo o limite inferior da pesquisa (10,09 MPa) e a menor média de resistência (11,98 MPa).

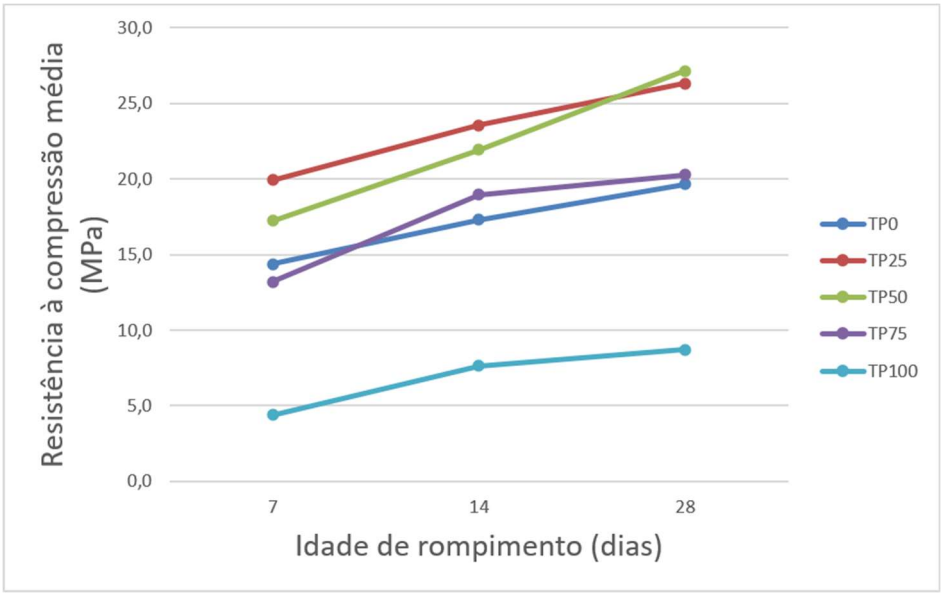
Ao observar os intervalos de TP50 [13,19; 14,87] e TP75 [11,55; 15,81], é possível identificar que eles se cruzam. O mesmo acontece entre TP75 e TP100. Isso indica que, a partir da substituição na proporção de 50%, a taxa de perda de resistência começa a se estabilizar. As misturas de alto teor de substituição apresentam comportamentos mecânicos estatisticamente

muito similares entre si.

Embora tenha sido observada uma tendência decrescente nas médias de resistência para o fator a/c de 0,9, a análise dos intervalos de confiança a 95% indica que adições de até 25% (TP25) podem manter o desempenho estatisticamente equiparável ao traço de referência, dada a sobreposição das variâncias.

A análise do comportamento mecânico ao longo do tempo (Figura 27) revela curvas de endurecimento distintas entre os traços avaliados.

Figura 27 - Gráfico da evolução da resistência à compressão para os diferentes teores de substituição (Fator a/c 0,7)



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Ao analisar o comportamento das curvas obtidas, é possível observar que o Traço de Referência (TP0) exibe um comportamento clássico e linear de crescimento, evoluindo de 14,37 MPa (7 dias) para 19,64 MPa (28 dias), representando um incremento de aproximadamente 36,7% no período.

Os traços TP25 e TP50 Apresentam um ganho de resistência significativamente superior à referência desde as primeiras idades, podendo ser considerados traços ótimos no contexto estudado. O traço TP25 destaca-se pelo elevado desempenho inicial aos 7 dias (19,93 MPa), superando inclusive a resistência de 28 dias do traço controle. O traço TP50, embora inicie ligeiramente abaixo do TP25 aos 7 dias (17,25 MPa), exibe a maior taxa de ganho tardio, culminando no ápice de desempenho mecânico aos 28 dias.

Já o Traço TP75 consegue manter um patamar próximo ao da referência, atingindo 20,27 MPa aos 28 dias. No entanto, o traço TP100 demonstra uma perda drástica na hidratação e endurecimento, estagnando em 8,72 MPa aos 28 dias.

Ainda seguindo a análise dos resultados do ensaio de resistência à compressão, a variação do fator água/cimento alterou fundamentalmente o papel desempenhado pela adição mineral na matriz. Para o fator a/c menor (0,7), observou-se um comportamento sinérgico pronunciado, em que os traços TP25 e TP50 superaram a resistência do traço de referência (TP0) em 33,9% e 38,2%, respectivamente. Esse incremento pode ser atribuído ao efeito de empacotamento microestrutural.

Para avaliar o efeito simultâneo do teor de substituição do agregado natural por RCC (Fator A, a = 5 níveis: TP0, TP25, TP50, TP75 e TP100), fator água/cimento (Fator B, b = 2 níveis: 0,7 e 0,9) e da idade de cura (Fator C, c = 3 níveis: 7, 14 e 28 dias) sobre a resistência à compressão, utilizou-se a Análise de Variância Trifatorial com Interação (ANOVA de Três Fatores), adotando-se o nível de significância de 5% ($\alpha = 0{,}05$).

A avaliação conjunta dos fatores principais observados na Tabela 18 revela que todas as três variáveis independentes exercem impacto estatisticamente significante na resistência à compressão axial.

Já a análise do parâmetro η^2 demonstra que o Teor de Substituição (Fator A) representa a força predominante do sistema, respondendo por 58,55% de toda a variância dos dados. O fator Idade de Cura (Fator B) surge como segunda variável mais influente, correspondendo a 12,81% da variação total.

A estatística calculada para a interação Traço × Idade ($F_{calc} = 1{,}03$) situa-se na Região de Aceitação de H0 ($F_{calc} < F_{crit(0{,}05)} = 2{,}15$). A ausência de interação significativa entre esses fatores comprova que o endurecimento ao longo do tempo ocorre em taxas relativas equivalentes em todos os traços, independentemente do teor de resíduo presente.

Ao contrário da interação temporal, a interação Traço × Fator a/c revelou-se altamente significante ($F_{calc} = 17{,}57 \gg F_{crit(0{,}05)} = 2{,}52$), sendo responsável por 11,41% de toda a variância da resistência aos 28 dias.

O modelo trifatorial confirma a hierarquia de dominância dos fatores, sendo o teor de substituição o fator de maior peso decisório (58,55% da variância total), a Idade de Cura, com 12,81% da variância total, governa a evolução temporal homogênea das reações de hidratação. Já a Interação Traço × Fator a/c (11,41% da variância total) constitui a única interação de fatores com significância estatística ($F_{calc} = 17{,}57 \gg F_{crit(0{,}05)} = 2{,}52$).

A Interação Tripla $(A \times B \times C)$ apresenta $F_{calc} = 0{,}85 < F_{crit(0{,}05)} = 2{,}09$, confirmando que não há interação simultânea entre os três fatores. Isso indica que a inversão de desempenho provocada pelo fator a/c é estável ao longo do tempo de cura.

Tabela 18 - Quadro da ANOVA trifatorial para resistência à compressão

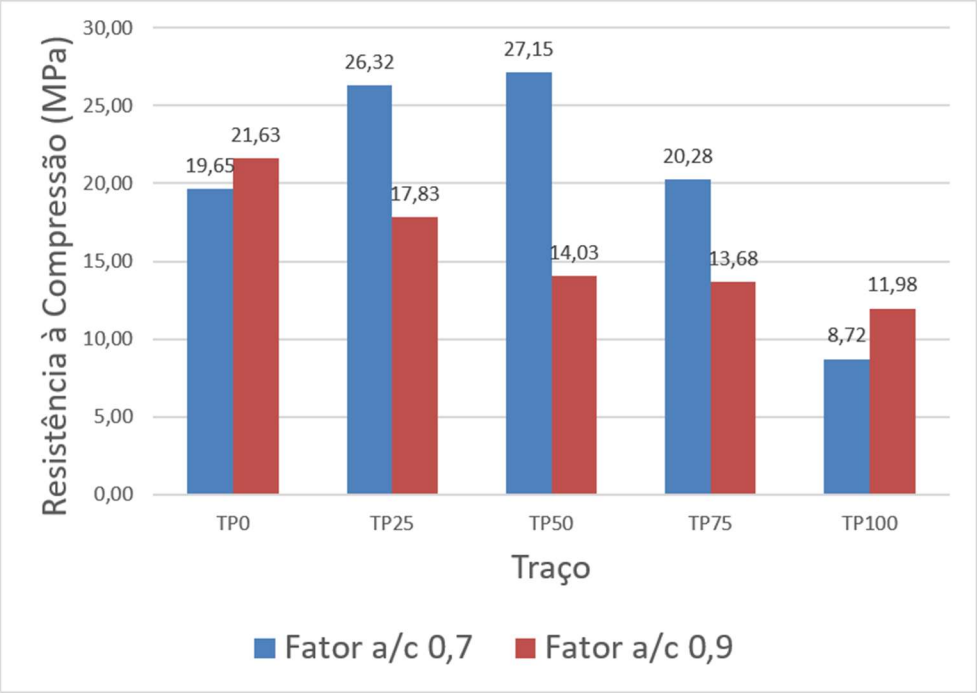
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrado Médio (MQ)	Fcalc	Fcrit (α=0,05)	Tamanho do Efeito (η^2)	Decisão Estatística (α=0,05)
Fator A (Traço)	2020,45	4	505,11	90,14	2,52	58,55%	Rejeita-se H0 (Significativo)
Fator B (Idade de Cura)	442,22	2	221,11	39,46	3,14	12,81%	Rejeita-se H0 (Significativo)
Fator C (Fator a/c)	211,59	1	211,59	37,79	3,99	6,13%	Rejeita-se H0 (Significativo)
Interação AxB (Traço x Idade)	46,06	8	5,76	1,03	2,09	1,33%	Não rejeita H0 (Não Significativo)
Interação AxC (Traço x Fa/c)	393,8	4	98,45	17,57	2,52	11,41%	Rejeita-se H0 (Significativo)
Interação BxC (Idade x Fa/c)	18,42	2	9,21	1,64	3,14	0,53%	Não rejeita H0 (Não Significativo)
Interação Tripla AxBxC	38,15	8	4,77	0,85	2,09	1,11%	Não rejeita H0 (Não Significativo)
Erro Residual	280,18	50	5,6	—	—		—
Total Global	3450,87	79	—	—	—		—

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Como as interações envolvendo a variável Idade de Cura não foram estatisticamente significantes, as correlações de desmolde e avanço de resistência aos 7 e 14 dias podem ser extrapoladas com significativa segurança para estimar o f_{ck} aos 28 dias.

Esses resultados evidenciam que a eficiência de substituição do agregado pelo RCC não depende apenas do teor de adição, mas também sendo condicionada à relação água/cimento do sistema, conforme pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Comparação da resistência à compressão para 28 dias entre ambas as relações a/c



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Observa-se um comportamento parabólico não linear para a relação água/cimento de 0,7. A substituição parcial do agregado atinge um ponto ótimo no traço TP50 (27,15 MPa), superando em 38,2% a resistência do traço de referência TP0 (19,65 MPa).

A presença do resíduo em uma matriz com menor espaço poroso pode viabilizar a ação do efeito físico de empacotamento, refinando a estrutura dos poros, já que o efeito químico pozolânico, caso exista, possui pouquíssima influência. De acordo com a análise de DRX, não houve registro de fases reativas na estrutura cristalina do RCC.

Em contrapartida, a relação água/cimento de 0,9 apresenta um comportamento decrescente. O desempenho máximo é obtido no traço TP0 (21,63 MPa), ocorrendo degradação contínua da resistência à medida que se eleva o teor de substituição (caindo para 17,83 MPa no TP25, 14,03 MPa no TP50 e 8,72 MPa no TP100). Neste regime, a elevada quantidade de água de amassamento cria um volume excessivo de macroporos capilares que sobrepuja os benefícios microestruturais do resíduo.

De acordo com a análise realizada, em aplicações que demandam maior trabalhabilidade ou maior consumo de água (por exemplo, fator a/c = 0,9), a substituição do agregado não é recomendada se o objetivo for maximizar a resistência mecânica, devendo o traço ser mantido em TP0 ou limitado a teores baixos. A Tabela 19 mostra a comparação entre os diferentes fatores a/c estudados neste trabalho.

Tabela 19 - Tabela comparativa entre fatores a/c

Parâmetro de Análise	**Fator a/c= 0,7**	**Fator a/c =0,9**
Tendência da Curva	Parabólica (Ascendente até 50%, depois decrescente)	Decrescente (Queda contínua de TP0 a TP100)
Resistência Máxima	Obtida no TP50 (27,15 MPa)	Obtida no TP0 (21,63 MPa)
Pior Desempenho	TP100 (8,72 MPa)	TP100 (11,98 MPa)
Teor Ótimo de Substituição	25% a 50% (Supera o controle TP0)	0% (Qualquer substituição reduz a resistência)

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

3.4.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Neste subitem são apresentados e discutidos os resultados relativos ao desempenho mecânico das argamassas contendo diferentes teores de substituição do agregado miúdo natural por resíduos de construção civil (RCC) - nominalmente indicados como TP0 (referência), TP25, TP50, TP75 e TP100 - submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral nas idades de 7, 14 e 28 dias de cura.

Para conferir suporte decisório e validação científica aos fenômenos físicos observados, a análise compreende tanto a estatística descritiva (como médias e desvio padrão) quanto a inferência estatística (como Intervalos de Confiança e Teste de Hipótese). A avaliação da influência combinada do teor de substituição e da idade de cura foi fundamentada em uma Análise de Variância Bifatorial (ANOVA de Dois Fatores com Interação) e a confiabilidade das amostras foi avaliada com a utilização do Teste t de Student, ambos fixados a um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0{,}05$).

Sendo assim, foram obtidos os seguintes dados:

a) Número de Amostras (n): 2 corpos de prova (CPs) por traço/idade.

b) Graus de Liberdade (gl): Calculado por gl = n-1 = 2-1 = 1

c) Nível de Confiança (1-α): Adotou-se 95% (α = 5%).

d) Valor Crítico de t (t_{crit}): Consultado na Tabela de Student para um teste bicaudal com gl = 1 e α = 0,05: $t_{crit} = 12{,}706$

Na Tabela 20 são apresentados respectivamente os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, nela é possível observar a média amostral ($\bar{X}$), o desvio-padrão (s), o coeficiente de variação ($CV\%$), a margem de erro e o intervalo de confiança baseado em 95%.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de resistência à tração e os limites do intervalo de confiança

Traço	Idade (Dias)	Média (X^-) [MPa]	Desvio Padrão (s) [MPa]	Coeficiente de Variação (CV%)	Erro Padrão (SEM)	Margem de Erro [MPa]	Intervalo de Confiança (95%) [MPa]
TP0	7	4,35	0,64	14,63%	0,45	5,72	[-1,37 ; 10,07]
TP0	14	4,80	0,14	2,95%	0,10	1,27	[3,53 ; 6,07]
TP0	28	7,15	0,49	6,92%	0,35	4,45	[2,70 ; 11,60]
TP25	7	4,65	0,35	7,60%	0,25	3,18	[1,47 ; 7,83]
TP25	14	4,90	0,85	17,32%	0,60	7,62	[-2,72 ; 12,52]
TP25	28	7,20	0,28	3,93%	0,20	2,54	[4,66 ; 9,74]
TP50	7	5,97	0,51	8,59%	0,36	4,61	[1,36 ; 10,58]
TP50	14	6,63	0,16	2,41%	0,11	1,44	[5,20 ; 8,07]
TP50	28	7,83	0,38	4,83%	0,27	3,40	[4,43 ; 11,23]
TP75	7	4,10	0,56	13,74%	0,40	5,06	[-0,96 ; 9,16]
TP75	14	5,14	0,06	1,08%	0,04	0,50	[4,64 ; 5,64]
TP75	28	5,46	0,05	0,92%	0,04	0,45	[5,01 ; 5,91]
TP100	7	2,01	0,02	0,81%	0,01	0,15	[1,86 ; 2,15]
TP100	14	3,70	0,28	7,64%	0,20	2,54	[1,16 ; 6,24]
TP100	28	3,80	1,13	29,77%	0,80	10,16	[-6,36 ; 13,96]

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Observa-se que a utilização de poucos corpos de prova (2 CPs) para cada traço e idade aumentou o valor de t_{crit} (12,706), consequentemente aumentando o valor da margem de erro de forma significativa.

Após analisar os dados obtidos, foi possível identificar que o traço TP25 apresentou excelente precisão aos 28 dias. A resistência média é de 7,20 MPa e seu IC varia estritamente entre 4,66 MPa e 9,74 MPa. O ganho de resistência do TP25 entre 7 e 28 dias é significativo.

O Traço TP50 (em todas as idades) mantém todos os limites de IC positivos, o que indica maior previsibilidade e reprodutividade experimental, já que nenhuma margem de erro foi maior que a média de resistência.

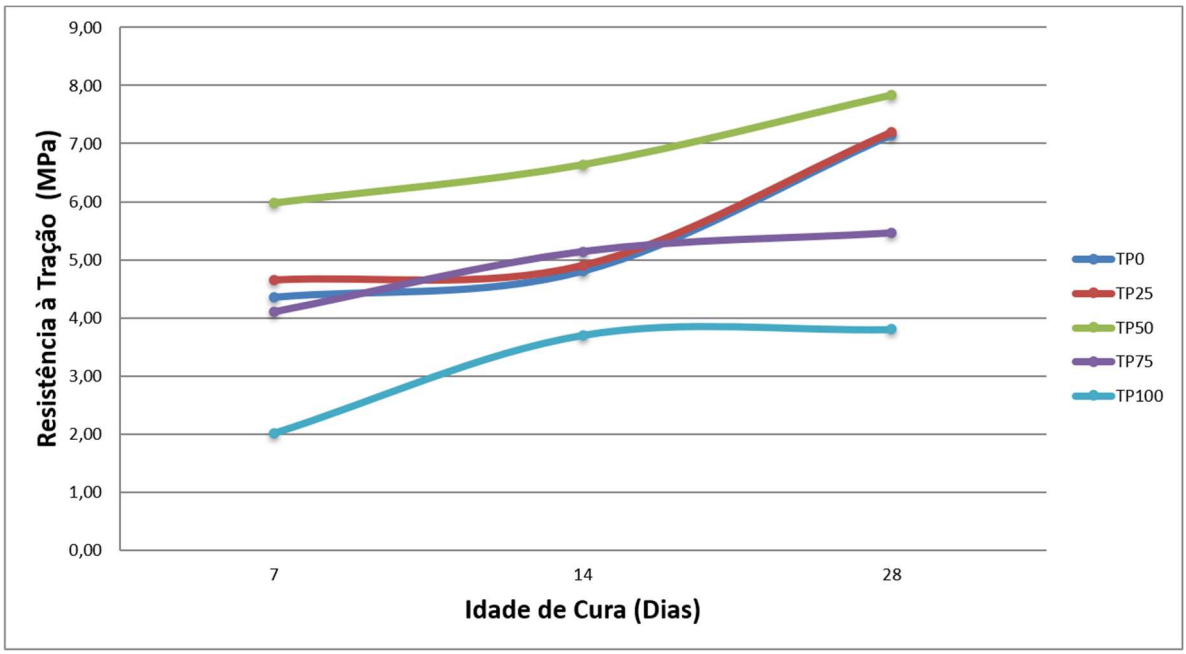
Quanto ao Traço TP75 aos 28 dias, ele apresentou dispersão quase nula (s = 0,05), resultando no intervalo de confiança, ao final dos 28 dias de cura, mais estreito de todo o estudo ([5,01; 0,589] MPa), restringindo a possibilidade de resultados para valores significativamente próximos ao valor médio encontrado (5,46 MPa).

Ao analisar os coeficientes de variação de acordo com a ACI 214 R (ACI, 2011), em TP0, TP25 e TP50, eles apresentam excelente controle e repetibilidade na maior parte das idades. Destaca-se o TP50, que obteve $CV_{médio} = 5{,}28\%$, indicando baixa variação dos resultados entre os corpos de prova ensaiados. No traço e TP100 na Idade de 28 Dias (29,77%)

houve um salto drástico no desvio, a elevada variabilidade nesses traços aos 28 dias pode ser fruto da heterogeneidade intrínseca do RCC, combinada à uma possível microfissuração causada por retração autógena, provavelmente provocada pela maior capacidade de absorção de água apresentada pelo RCC, que acaba absorvendo parte da água que permaneceria nos poros e seria utilizada na hidratação do cimento. Como a tração por compressão diametral intercepta os planos mais frágeis do corpo de prova, a presença localizada de um poro maior ou de um agregado reciclado frágil altera significativamente a carga de ruptura entre corpos de prova do mesmo lote.

A partir da compilação dos dados das cinco formulações (TP0, TP25, TP50, TP75 e TP100) nas idades de 7, 14 e 28 dias, foi possível observar comportamentos distintos que merecem atenção, conforme gráfico da Figura 29.

Figura 29 - Evolução da resistência à tração por traço



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

O gráfico demonstra claramente que a substituição parcial do agregado natural por Resíduo de Construção e Demolição (RCC) até o limite de 50% (TP50) otimiza a resistência à tração por compressão diametral, enquanto substituições elevadas (75% e 100%) provocam estagnação e perda expressiva de desempenho mecânico.

A resistência à tração por compressão diametral é um ensaio extremamente sensível à aderência da interface agregado-pasta e à coesão interna da matriz, o que explica a variação observada entre os traços (Romano, 2013; Santana *et al*., 2011)

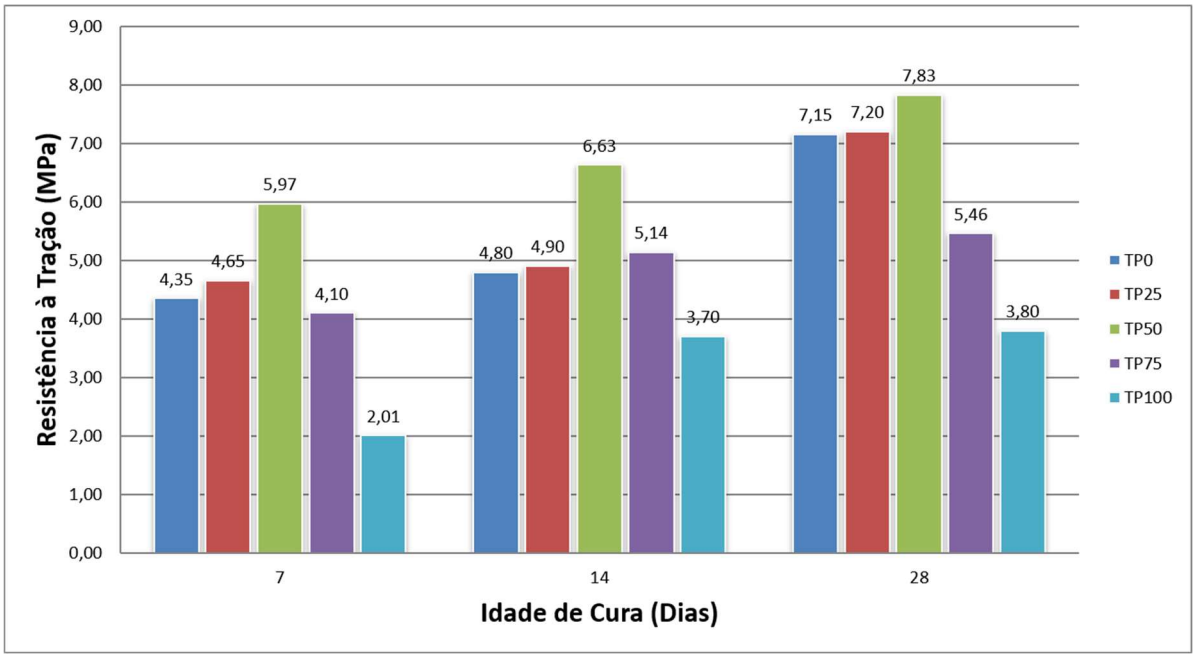
Os traços TP0 e TP25 apresentaram curvas quase sobrepostas, iniciando entre 4,35 MPa e 4,65 MPa aos 7 dias e atingindo 7,15 MPa a 7,20 MPa aos 28 dias. Esse comportamento pode ser explicado, pois a substituição de 25% de resíduo não altera significativamente a estrutura de poros da argamassa nem a área de contato em comparação ao agregado natural puro, mantendo o comportamento mecânico muito próximo ao do traço tradicional. Em ambas as curvas é possível observar um salto de resistência após os 14 dias, impulsionado pela maior concentração do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na matriz de cimento Portland convencional.

O traço TP75 atinge um patamar próximo a 5,46 MPa aos 28 dias, enquanto o TP100 fica limitado a 3,80 MPa aos 28 dias — uma queda drástica em relação aos demais. Ambos apresentam uma curva que se achata (estagna) entre os 14 e 28 dias. Este desempenho reflete uma característica importante do agregado reciclado, ele carrega consigo uma camada de argamassa antiga e porosa do concreto original e em substituições de 75% e 100%, essa fase frágil domina a estrutura interna da nova argamassa. O ensaio de compressão diametral gera tensões de tração perpendiculares ao plano de aplicação da carga. Em traços como TP75 e TP100, a fratura não precisa contornar o agregado pois ela corta de maneira facilitada através da pasta antiga porosa e das microfissuras já existentes no resíduo, fazendo com que a maior concentração de agregado reciclado acabe limitando a resistência máxima. Essa limitação impede que a hidratação contínua do cimento após os 14 dias seja capaz de compensar os defeitos microestruturais, fazendo a curva estabilizar precocemente.

Como pode ser observado na Figura 30, a avaliação da resistência à tração por compressão diametral revelou um comportamento parabólico em relação ao teor de substituição do agregado natural por resíduo de construção civil (RCC), consolidando a dosagem de 50% (TP50) como o ponto ótimo de desempenho mecânico e estatístico para este aspecto. O traço TP50 atingiu as maiores frações de resistência em todas as idades de cura (5,97 MPa aos 7 dias, 6,63 MPa aos 14 dias e 7,83 MPa aos 28 dias), superando a mistura de referência sem resíduo (TP0 — 7,15 MPa aos 28 dias), enquanto o teor de 25% (TP25) manteve comportamento equivalente ao convencional (7,20 MPa aos 28 dias). O incremento mecânico observado no TP50 pode ser fundamentado pela cooperação entre a elevada rugosidade superficial e angulosidade das partículas de RCC, o que favorece o intertravamento físico na Zona de Transição Interfacial (ZTI) e o adensamento microestrutural pelo efeito de empacotamento dos finos. Em contraposição, teores de substituição elevados (TP75 e TP100) provocaram estagnação e perda acentuada de resistência (com o TP100 atingindo 3,80 MPa aos 28 dias), resultado da dominância da pasta antiga porosa aderida ao resíduo e da fácil propagação de

trincas sob tensão de tração.

Figura 30 - Comparativo de resistência à tração aos 7, 14 e 28 dias



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

A Figura 31 ilustra as duas metades de um corpo de prova prismático que sofreu ruptura abrupta durante a realização do ensaio de tração por compressão diametral. A falha ocorreu de maneira planar ao longo da seção central, conforme esperado para este tipo de carregamento, dividindo a amostra e expondo sua superfície de fratura interna para análise macroscópica.

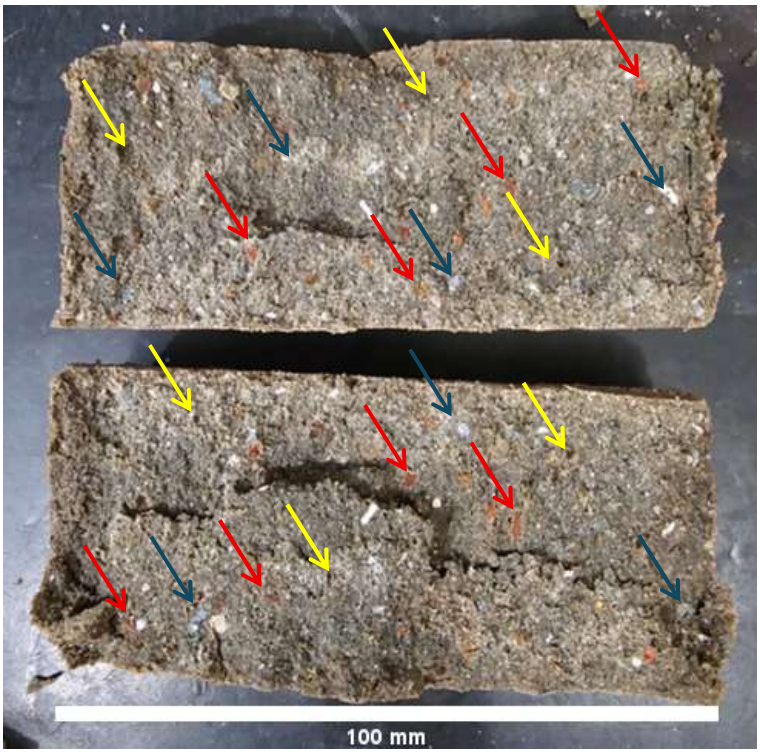
A observação detalhada da face exposta revela uma distribuição heterogênea dos componentes da mistura cimentícia. É visível a incorporação de RCC na matriz do compósito. Dentre os resíduos identificáveis a olho nu, destacam-se:

a) Resíduos Cerâmicos – setas vermelhas: Fragmentos de coloração avermelhada e ocre, dispersos por toda a superfície, característicos de tijolos e telhas de cerâmica vermelha triturados.

b) Agregados Reciclados Diversos – setas azuis: Partículas de cor cinza claro e branca, que indicam a presença de restos de concreto ou argamassa britados.

c) Tríncas e Porosidades – setas amarelas: Regiões e pontos escuros que evidenciam a presença de vazios, cavidades e microfissuras, refletindo a porosidade intrínseca e os defeitos estruturais do RCC utilizado.

Figura 31 - Corpo de prova rompido pela ação da compressão diametral



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor).

Esta imagem fornece indícios visuais importantes sobre a interação entre os agregados reciclados e a pasta cimentícia na interface de fratura. A distribuição aparentemente uniforme dos resíduos cerâmicos sugere, por meio de uma análise qualitativa, um processo de mistura eficaz, enquanto a observação da pouca quantidade de partículas soltas sugere um plano de fratura limpo por existir uma boa coesão interna entre os componentes do traço utilizado.

3.4.5. Atenuação Acústica

A avaliação do isolamento acústico provido pelas placas cimentícias foi quantificada a partir do ensaio de atenuação sonora, aferido em diferentes bandas de frequência (500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz). O controle rigoroso das variáveis de contorno foi essencial para garantir a confiabilidade da resposta dos materiais. O ruído ambiente foi devidamente mensurado, apresentando 56 dB na câmara de emissão (entrada) e 54 dB na câmara de recepção (saída).

Para estabelecer um referencial e mensurar a transmissão direta do aparato sem barreira física, executou-se a medição do equipamento "sem placa". Sob esta condição, o sistema emitiu na entrada 70 dB a 500 Hz, 65 dB a 1000 Hz e 65 dB a 2000 Hz, enquanto a recepção registrou na saída, respectivamente, 63 dB, 58 dB e 65 dB. Observa-se que, na frequência de 2000 Hz, o

som atravessou o aparato sem placa sem sofrer atenuação (65 dB em ambos os lados), reforçando a necessidade de material atenuador.

Com base nos dados medidos para o equipamento de medição sem placa:

a) 500 Hz: $AL_{\text{sem placa}} = 70\ \text{dB} - 63\ \text{dB} = 7\ \text{dB}$

b) 1000 Hz: $AL_{\text{sem placa}} = 65\ \text{dB} - 58\ \text{dB} = 7\ \text{dB}$

c) 2000 Hz: $AL_{\text{sem placa}} = 65\ \text{dB} - 57\ \text{dB} = 8\ \text{dB}$

A Tabela 21 apresenta os parâmetros estatísticos da atenuação líquida para cada traço (4 corpos de prova por traço) e frequência, calculados com base na distribuição t de Student ($\alpha = 0{,}05$ e $t_{crit} = 3{,}182$).

Tabela 21 - Análise de confiança (t-Student, 95%) para a atenuação acústica líquida (Alíquida).

Traço	Frequência (Hz)	Média ($\bar{X}$) [dB]	Desvio Padrão (s) [dB]	Coeficiente de Variação (CV%)	Margem de Erro [dB]	Intervalo de Confiança (95%) [dB]
TP0	500	6,5	0,58	8,88%	0,92	[5,58 ; 7,42]
TP0	1000	4,75	0,50	10,53%	0,80	[3,95 ; 5,55]
TP0	2000	2,25	0,50	22,22%	0,80	[1,45 ; 3,05]
TP25	500	7	0,00	0,00%	0,00	[7,00 ; 7,00]
TP25	1000	5	0,00	0,00%	0,00	[5,00 ; 5,00]
TP25	2000	2,75	0,50	18,18%	0,80	[1,95 ; 3,55]
TP50	500	7	0,00	0,00%	0,00	[7,00 ; 7,00]
TP50	1000	5	0,00	0,00%	0,00	[5,00 ; 5,00]
TP50	2000	2,5	0,58	23,09%	0,92	[1,58 ; 3,42]
TP75	500	7	0,00	0,00%	0,00	[7,00 ; 7,00]
TP75	1000	5	0,00	0,00%	0,00	[5,00 ; 5,00]
TP75	2000	2,5	0,58	23,09%	0,92	[1,58 ; 3,42]
TP100	500	7	0,00	0,00%	0,00	[7,00 ; 7,00]
TP100	1000	5,25	0,50	9,52%	0,80	[4,45 ; 6,05]
TP100	2000	3	0,00	0,00%	0,00	[3,00 ; 3,00]

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Nesta abordagem, determinou-se a Margem de Erro multiplicando o Erro Padrão da Média pelo valor t-crítico ($t_{crit} = 3{,}182$) correspondente a 3 graus de liberdade ($v = n-1$) e um nível de significância $\alpha = 0{,}05$.

A análise do Coeficiente de Variação (CV%) demonstrou excelente repetibilidade do ensaio. As variações observadas nos níveis de saída dos corpos de prova da mesma família apresentaram, em sua vasta maioria, desvios inferiores a 1 dB, refletindo num baixo percentual

de dispersão. Esta precisão métrica atesta a homogeneidade microestrutural e de compactação das placas avaliadas no escopo desta dissertação.

A análise direta dos intervalos de confiança permite confirmar o ganho acústico oferecido pelos compósitos. Em 500 Hz, enquanto o ensaio sem placa apresentou apenas 7 dB de perda (diferença entre 70 e 63 dB), a matriz de referência (TP0) proporcionou uma atenuação bruta média de 13,33 dB e uma atenuação líquida média de 6,50 dB. Este ganho revela a capacidade de isolamento físico oferecido pela densidade da placa cimentícia.

Avaliando o impacto da substituição nos traços de TP0 a TP100, os resultados indicam a similaridade e, em casos específicos, uma leve melhoria na barreira acústica. Para o traço TP100 na frequência de 2000 Hz, por exemplo, o nível de saída foi cravado em 54 dB em todas as repetições, totalizando uma atenuação líquida média de 3 dB e o traço referência (TP0), apresentou níveis de saída variando entre 54 e 55 dB na mesma frequência, apresentando uma atenuação líquida média de 2,25 dB.

Os dados confirmam que a substituição progressiva do material até 100% (TP100) não compromete o desempenho isolante da matriz. Ao contrário, o leve aumento na atenuação líquida nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz sugere que o novo traço promove a formação de um labirinto acústico nos poros interconectados ou um maior amortecimento viscoelástico das ondas incidentes, absorvendo ruídos com eficiência (Criado *et al*., 2024; Setlik *et al*., 2023).

Para validar estatisticamente a influência da composição da matriz cimentícia e das diferentes bandas de espectro sonoro sobre a capacidade de isolamento do material, conduziu-se uma Análise de Variância de duplo fator (ANOVA bifatorial). O modelo estatístico avaliou simultaneamente o efeito do Fator A (Traço: TP0, TP25, TP50, TP75, TP100), do Fator B (Frequência: 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz) e a possível correlação entre eles (Interação AxB).

Adotou-se o nível de significância de 5% ($\alpha = 0{,}05$). O critério de decisão para aceitação ou rejeição da hipótese nula (H0 – premissa de que as médias dos grupos são estatisticamente equivalentes) fundamentou-se na comparação do valor F calculado (F_{calc}) com o valor F crítico (F_{crit}) tabelado pela distribuição de Fisher-Snedecor para os respectivos graus de liberdade. Adicionalmente, quantificou-se o Tamanho do Efeito (Eta-quadrado, η^2) para mensurar o percentual da variância total do experimento que é explicado por cada fator independente. Portanto, os resultados consolidados da ANOVA encontram-se tabulados na Tabela 22.

Tabela 22 - Análise de variância (ANOVA) para o ensaio de atenuação acústica.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrado Médio (MQ)	Fcalc	Fcrit (α=0,05)	Tamanho do Efeito (η^2)	Decisão Estatística (α=0,05)
Fator A (Traço)	2,17	4	0,54	4,06	2,58	1,11%	Rejeita-se H0 (Significativo)
Fator B (Frequência)	185,73	2	92,87	696,50	3,20	95,57%	Rejeita-se H0 (Significativo)
Interação - AxB (Traço x Frequência)	0,43	8	0,05	0,41	2,15	0,22%	Não se rejeita H0 (Não Significativo)
Erro Residual	6,00	45	0,13	-	-	-	-
Total Global	194,33	59	-	-	-	-	-

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

A análise do fator composicional (Traço) demonstrou significância estatística sobre os resultados de atenuação. O valor de F_{calc} obtido (4,06) superou o limite de F_{crit} (2,58), portanto, rejeita-se a hipótese nula, confirmando que a alteração da matriz cimentícia através dos níveis de substituição gera mudanças estatisticamente perceptíveis no desempenho acústico.

Apesar de significativo no teste de hipóteses, a análise do Tamanho do Efeito ($\eta^2 = 1{,}11\%$) revela que a variação exclusiva da dosagem (traço) responde por uma fração minoritária da variância total observada no experimento. Este comportamento, no escopo da engenharia de materiais, é um indicativo positivo, pois comprova-se que a inserção da substituição até o nível de 100% altera ligeiramente a matriz acústica (evidenciado pelo $F_{calc} > F_{crit}$), porém, sem causar oscilações bruscas ou perda de função do material, garantindo estabilidade funcional entre as diferentes misturas.

Ao avaliar o espectro sonoro, a Frequência provou ser o fator governante do comportamento acústico das placas. O teste estatístico apontou um F_{calc} massivo de 696,50, expressivamente superior ao F_{crit} de 3,20. Consequentemente, rejeita-se fortemente H0, atestando que a capacidade de bloqueio da onda sonora pelo compósito é estritamente dependente da frequência de excitação.

O Tamanho do Efeito corrobora essa constatação, demonstrando que 95,57% da variância total (SQ_{total} = 194,33) do sistema é governada puramente pela frequência de emissão. Fisicamente, este fenômeno está intrinsecamente ligado à interação das ondas com a microestrutura sólida e porosa da placa. Ondas de baixa frequência (500 Hz), que possuem maior comprimento de onda, apresentam comportamento de difração e transmissão distinto em barreiras massivas quando comparadas às ondas curtas e direcionais de alta frequência (2000

Hz), justificando a resposta predominante da variável frequência sobre o ensaio.

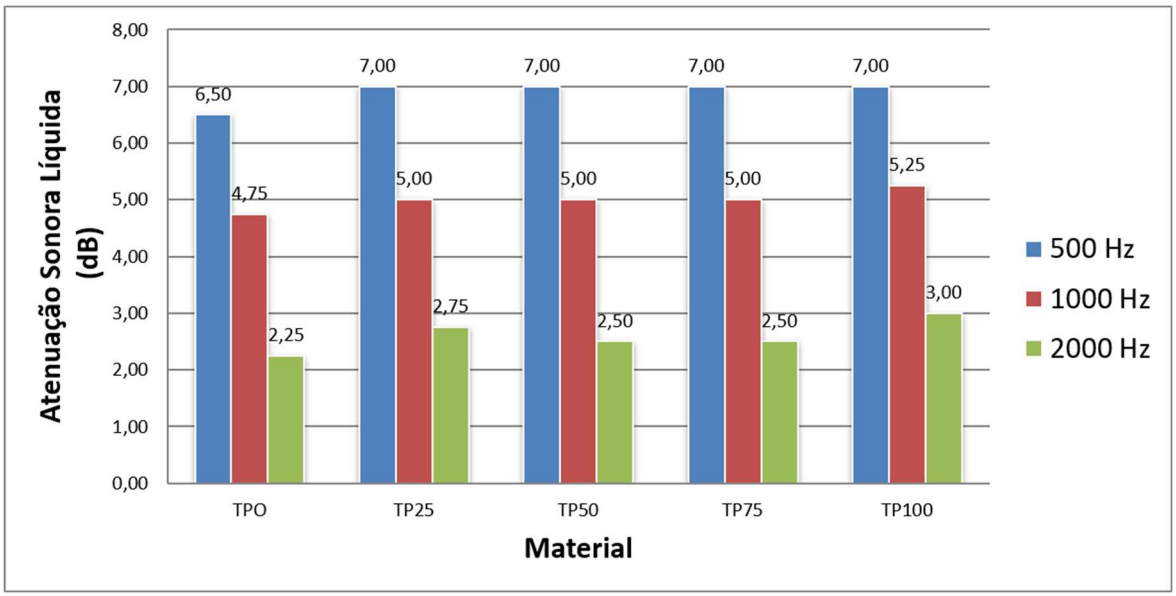
A avaliação combinada investigou se a resposta acústica perante diferentes frequências muda de acordo com o traço específico da placa. A análise da Interação (AxB) resultou num F_{calc} de apenas 0,41, valor substancialmente inferior ao patamar limitante de F_{crit} (2,15). Com base neste cenário, não se rejeita a hipótese nula (H0).

O tamanho do efeito para a interação foi praticamente nulo ($\eta^2 = 0{,}22\%$). Isso significa que, do ponto de vista estatístico, os diferentes traços respondem de maneira similar e proporcional às variações de frequência. Ou seja, a curva de atenuação acústica ao longo do espectro sonoro (500 Hz → 2000 Hz) possui a mesma tendência e formato mecânico, independentemente de se estar testando a amostra referência (TP0) ou a amostra de máxima substituição por RCC (TP100).

Em síntese, a ANOVA comprova a robustez das formulações estudadas, indicando que as placas respondem aos comprimentos de onda incidentes (frequência governante), mas mantêm a confiabilidade e o padrão de isolamento consistentes ao longo de todas as taxas de substituição adotadas.

A representação gráfica dos resultados de atenuação acústica (Figura 32) permite uma visualização do comportamento do material e corrobora de forma direta as constatações inferidas pela Análise de Variância (ANOVA). Observa-se que o perfil de atenuação é regido por duas mecânicas distintas: uma forte dependência espectral (queda em degraus conforme o aumento da frequência) e um ganho sutil, porém contínuo e estável, decorrente da modificação microestrutural impulsionada pela substituição no traço.

Figura 32 – Média da atenuação acústica líquida por frequência



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

A remoção da resposta da câmara permitiu isolar com precisão a contribuição intrínseca do compósito cimentício, revelando dois comportamentos fundamentais: a dependência marcante do comprimento de onda da fonte sonora e a otimização contínua do isolamento promovida pela substituição do insumo no traço.

No perfil gráfico observam-se barras decrescentes à medida que a frequência se eleva. Em todas as formulações avaliadas, o maior valor de atenuação líquida ocorre na faixa de 500 Hz (variando de 6,5 a 7,0 dB), seguido por patamares intermediários em 1000 Hz (variando de 4,75 a 5,25 dB) e pelos menores valores em 2000 Hz (variando de 2,25 a 3,0 dB).

Sob a ótica da Ciência dos Materiais, essa resposta se relaciona diretamente com a interação entre o comprimento de onda (λ) e a microestrutura da matriz, pois baixas Frequências (500 Hz) apresentam comprimentos de onda maiores ($\lambda \approx 68$ cm no ar), fazendo com que a placa rígida atue majoritariamente por lei da massa e reflexão superficial. O material oferece uma barreira física sólida e contínua, garantindo a retenção da maior parcela da energia mecânica da onda sonora ($A_{\text{líquida}} \approx 7{,}0$ dB).

Já em altas Frequências (2000 Hz), as ondas possuem comprimentos substancialmente mais curtos ($\lambda \approx 17$ cm), o que favorece a penetração e a difração do som pelos poros e vazios microscópicos da placa cimentícia. Como resultado, a atenuação puramente intrínseca cai para a faixa de 2,25 a 3,00 dB.

A avaliação horizontal do gráfico evidencia que a modificação da matriz cimentícia através da substituição progressiva do insumo trouxe ganho de desempenho em todas as frequências consideradas. A amostra de referência (TP0, matriz convencional sem substituição) apresentou a menor capacidade de isolamento intrínseco em todas as frequências: 6,50 dB (500 Hz), 4,75dB (1000 Hz) e 2,25 dB (2000 Hz).

A elevação da atenuação líquida (sobretudo no TP100 a 1000 Hz e 2000 Hz) sugere a existência de uma rede porosa de maior tortuosidade. À medida que a onda sonora atravessa a placa, a maior complexidade do caminho microscópico força o ar contido nos poros a sofrer maior atrito viscoso contra as paredes sólidas do compósito, convertendo parcela superior da energia mecânica do som em energia térmica (dissipação termo-viscosa) (Tayari *et al*., 2026).

Portanto, considerando o aspecto da atenuação acústica, a análise gráfica confirma que a substituição de 100% do insumo (TP100) constitui a melhor alternativa, combinando a máxima eficiência de isolamento acústico intrínseco com estabilidade frente a diferentes frequências do ruído incidente.

3.4.6. Compromisso entre resistência mecânica e atenuação sonora

O desenvolvimento de componentes cimentícios sustentáveis exige a avaliação integrada de suas propriedades físicas, mecânicas e funcionais, uma vez que a alteração na microestrutura do material impacta simultaneamente diferentes parâmetros de desempenho. No âmbito das placas cimentícias não estruturais incorporadas com Agregado Miúdo Reciclado de Resíduos da Construção Civil (RCC), a relação entre a resistência à compressão axial e a atenuação sonora estabelece um clássico compromisso de projeto: enquanto o desempenho mecânico demanda uma matriz densa, rígida e com baixa porosidade, o isolamento acústico é favorecido por redes porosas que promovam a dissipação da energia sonora.

Os resultados experimentais obtidos aos 28 dias de cura demonstram claramente a concorrência entre esses dois fenômenos à medida que o teor de substituição da areia natural por RCC é elevado de 0% (TP0) até 100% (TP100). A Tabela 23 evidencia essa correlação.

Tabela 23 - Comparação entre os diferentes teores de substituição quanto à resistência à compressão e a atenuação sonora

Traço	Compressão 28 d (MPa)	Atenuação média* (dB)	Interpretação
TP0	19,64	4,50	Referência; maior rigidez
TP25	26,31	4,92	Equilíbrio favorável
TP50	27,15	4,83	Melhor compromisso global
TP75	20,27	4,83	Acústica mantida; mecânica menor
TP100	8,72	5,08	Maior ganho acústico; forte perda mecânica

*Média das atenuações em 500, 1000 e 2000 Hz

(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

A análise da transição entre os traços evidencia que o comportamento da mistura é governado por dois efeitos concorrentes: o empacotamento granulométrico promovido pela fração fina do resíduo e a porosidade intrínseca das partículas de RCC.

Quanto ao empacotamento das partículas (efeito observado principalmente até 50% de substituição do RCC), observa-se que nos teores intermediários de substituição (25% e 50%), a maior proporção de finos presentes no RCC (aproximadamente 10% de material passante na peneira de 150 μm) atua preenchendo os vazios intergranulares deixados pela areia natural (Amer *et al*., 2024; Ulsen *et al*., 2010). Esse fenômeno de micro-preenchimento otimiza o empacotamento da matriz e reduz a porosidade capilar aberta (Amer *et al*., 2024; Silva Júnior; Rêgo Silva; Pinheiro, 2015), promovendo o aumento da resistência à compressão para o pico de 27,15 MPa (Amer *et al*., 2024). Ao considerar a porosidade da mistura, observou-se que para teores de substituição superiores a 50% (TP75 e TP100), a porosidade intrínseca do próprio

agregado reciclado (originada de argamassas antigas e frações cerâmicas aderidas) passa a predominar no sistema (Amer *et al*., 2024; Angulo, 2000,2005). Essa macroporosidade enfraquece a Zona de Transição Interfacial (ZTI) e atua como concentradora de tensões, resultando em uma perda acentuada de resistência mecânica, que chega a 8,72 MPa no TP100 (Amer *et al*., 2024).

Concomitantemente, a atenuação sonora do material estudado é favorecida com a elevação progressiva do teor de RCC. Quando a onda sonora incide sobre a placa e penetra na rede porosa tortuosa propiciada pelo resíduo, a capacidade de absorção acústica aumenta e atinge seu valor máximo no traço TP100 (atenuação líquida média de 5,08 dB).

Sendo assim, a análise conjunta das curvas de desempenho evidencia que a busca isolada pelo máximo ganho em atenuação acústica prejudica severamente a integridade estrutural do componente cimentício. Embora o traço TP100 apresente a maior atenuação sonora, este sofre a maior redução em sua capacidade de resistência mecânica, comparado ao traço de controle (linha vermelha na Tabela 23).

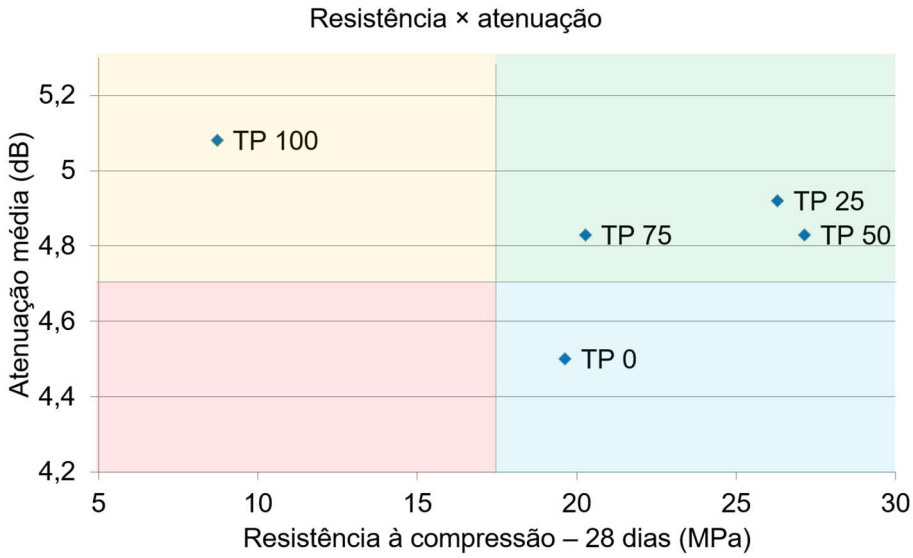
Em consequência dessa análise, a dosagem TP50 (50% de substituição) consolida-se como o ponto de compromisso com melhor resultado global para a aplicação em placas cimentícias não estruturais de vedação (linha verde na Tabela 23). O TP50 assegura o ganho máximo de resistência à compressão (27,15 MPa — aumento de 38,2% sobre o referencial TP0), e ainda proporciona um ganho técnico na atenuação sonora média (4,83 dB frente a 4,50 dB do TP0). Dessa maneira, a substituição de 50% da areia natural por RCC atende às exigências normativas de resistência para manuseio e operação, ao mesmo tempo em que agrega valor funcional acústico e mitiga o impacto ambiental mediante a economia circular dos resíduos.

A Figura 33 ilustra graficamente a relação de compromisso entre os parâmetros de desempenho do material estudado da pesquisa, correlacionando a resistência à compressão aos 28 dias com a atenuação sonora média. Com o intuito de facilitar a análise multicritério e a tomada de decisão quanto à viabilidade técnica das formulações, o diagrama de dispersão foi setorizado em quatro quadrantes de desempenho.

O quadrante superior direito (destacado em verde) delimita a zona de ótimo global. Nesta região, enquadram-se as misturas que apresentam, simultaneamente, elevada capacidade de resistência e melhores índices de atenuação sonora, configurando o melhor balanço multifuncional da pesquisa. É possível observar que os traços com substituição parcial do agregado natural por resíduo de construção civil (especificamente os traços TP 25, TP 50 e TP 75) posicionam-se dentro deste quadrante. Destacam-se, sobretudo, as formulações TP 25 e TP

50, que alcançam os maiores valores de resistência, sem renunciar à eficiência termo-viscosa para dissipação sonora.

Figura 33 - Gráfico de comparação entre a resistência à compressão e atenuação sonora



(Fonte: Elaborada pelo próprio autor)

Em contrapartida, a análise dos demais quadrantes evidencia o comportamento isolado das formulações extremas. O traço de referência sem resíduo (TP 0) posiciona-se no quadrante inferior direito (azul), atestando a sua rigidez estrutural característica, porém apresentando o menor índice de atenuação acústica do estudo. No extremo oposto, o traço com substituição total (TP 100) isola-se no quadrante superior esquerdo (amarelo), ilustrando perfeitamente o fenômeno da porosidade intrínseca do RCC: a matriz atinge a sua máxima eficiência na absorção sonora, mas sofre uma penalização drástica e limitante em sua resistência mecânica.

Dessa forma, a disposição espacial dos dados na Figura 33 corrobora visualmente a assertividade da utilização do resíduo de construção civil em teores intermediários (entre 25% e 75%).

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

4. CONCLUSÕES

A substituição parcial e total da areia natural por agregado miúdo reciclado de resíduos da construção civil (RCC, fração menor que 4,0 mm) provou ser uma solução tecnicamente viável, eficiente e ecologicamente alinhada aos princípios da economia circular para a fabricação de placas cimentícias não estruturais. A caracterização dos insumos atestou a elevada compatibilidade física, química e mineralógica do resíduo em relação ao agregado convencional. Por apresentar um menor módulo de finura (2,33 contra 2,73 da areia) e uma maior concentração de frações finas, o RCC desempenhou um papel fundamental de micro-preenchimento na matriz cimentícia, otimizando o empacotamento intergranular e promovendo uma redução de 17,63% no índice de vazios no estado solto, o que compensou a menor densidade intrínseca de 2,055 g/cm³.

Apesar dos ganhos de empacotamento, a morfologia angular e a textura rugosa e porosa do resíduo demandaram maior quantidade de água de amassamento, resultando em uma perda progressiva de trabalhabilidade de até 9,2% no traço com substituição integral. Essa limitação reológica, contudo, pode ser perfeitamente contornada em escala de produção com a aplicação de aditivos plastificantes, preservando a fluidez necessária sem elevar o fator água/cimento, evitando o surgimento de macroporos e a consequente perda de desempenho mecânico.

No aspecto do desempenho físico e mecânico, o traço TP50 (com 50% de substituição e fator a/c de 0,7) consolidou-se como a dosagem ótima do estudo, combinando a menor taxa de absorção de água (3,30%, o que representa uma queda de 41,59% em relação ao traço de referência) com o maior valor de resistência à compressão, atingindo 27,15 MPa — um incremento de 38,2% sobre o traço convencional. Por sua vez, a substituição total no traço TP100 não apenas manteve a resistência mecânica em patamares superiores ao limite mínimo normativo de 2,0 MPa exigido para componentes de vedação, como também viabilizou a produção de painéis mais leves e com desempenho acústico levemente superior

Dessa forma, a utilização de agregado miúdo proveniente de resíduos reciclados da construção civil como insumo para a produção de placas não estruturais atinge os objetivos propostos ao evidenciar uma alternativa viável para a transformação de um passivo ambiental em um material com valor agregado. O compósito resultante oferece ao mercado da construção civil placas cimentícias que conciliam segurança estrutural, leveza, conforto acústico e viabilidade econômica, consolidando uma alternativa sustentável de elevado potencial de aplicação prática.

A presente pesquisa atingiu os objetivos propostos ao comprovar que a produção de

placas cimentícias não estruturais com a incorporação de agregado miúdo reciclado de Resíduos da Construção Civil (RCC) é uma solução viável, atendendo aos requisitos técnicos, físicos e ambientais estabelecidos no início do trabalho. Com base nos achados técnico-científicos obtidos, sugere-se a continuidade desta linha de investigação por meio de estudos complementares. Recomenda-se, inicialmente, a otimização da dosagem com a investigação de formulações que utilizem aditivos superplastificantes, visando restabelecer a trabalhabilidade das misturas com altos teores de substituição enquanto se mantêm baixas relações água/cimento. Além disso, é importante a realização de ensaios de durabilidade e desempenho como os indicados pela ABNT NBR 15498 (2026), englobando testes de envelhecimento acelerado, retração por secagem, estanqueidade e resistência a sulfatos, para viabilizar a classificação das placas nas Categorias A, B e C da referida norma. No âmbito da aplicação prática, sugere-se uma avaliação acústica em escala real, produzindo painéis de dimensões maiores ou a aplicação de conjuntos de placas para serem testados quando montados em protótipos de sistemas leves (como o *Wood Frame*), permitindo a aferição do Índice de Redução Sonora e a classificação do isolamento acústico conforme ABNT NBR ISO 717 (2001). Por fim, indica-se a condução de uma Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACV), um estudo quantitativo para mensurar a pegada de carbono real e a efetiva redução de custos de fabricação em escala industrial do compósito proposto frente às placas cimentícias convencionais.

REFERÊNCIAS

ABRECON - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (Brasil). **Pesquisa Setorial Abrecon 2020**. 2020. Disponível em: https://abrecon.org.br/documentos-e-informa/pesquisa-setorial-abrecon-2020. Acesso em: 10 ago. 2025.

ABREMA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/. Acesso em: 10 ago. 2025.

ACCAMTAS – Ação Contra Crimes Ambientais e Tráfego de Animais Silvestres (Rio de Janeiro). **A Extração Ilegal de Areia no Brasil e no Mundo - 2024**. Disponível em: https://www.neossolu.com.br/plano-lavra-extracao-areia. Acesso em: 29 jul. 2026.

AGUIAR, N. C. *et al*. Utilização de resíduo de construção civil (RCC) na produção de argamassas. *In*: 73º Congresso Anual da ABM – Internacional, 73. 2018, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: ABM, 2018. p. 1-12.

AMER, Adem Ait Mohamed *et al*. Behavior of the use of fine recycled concrete aggregates on rheological parameters and hardened mortar properties. **Studies In Engineering And Exact Sciences**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 5955-5984, 22 jul. 2024. South Florida Publishing LLC.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 214R-11**: Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. Farmington Hills: ACI, 2011.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos da construção e demolição reciclados**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. de. CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS. In: TUTIKIAN, B. *et al*. **Concreto**: ciência e tecnologia. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 47. p. 1-40.

ANTONIAZZI, J. P. **Efeito dos Aditivos Incorporador de Ar e Estabilizador de Hidratação nas Propriedades das Argamassas Estabilizadas**. 2019. 258 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

ARAGÃO, H. G. *et al*. Aplicação do Concreto Reciclado de RCD em Vigas para Lajes Pré-Moldadas. In: 49° Congresso Brasileiro do Concreto, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais [...] .** Bento Gonçalves: Ibracon, 2007. p. 1-15.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto — Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9935**: Agregados — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos — Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15498**: Painéis de fibrocimento e placas cimentícias não estruturais — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054**: Agregados — Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 717-1**: Acústica — Avaliação do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificação — Parte 1: Isolamento a ruído aéreo. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

AZEVEDO, A. R. G. de. **Desenvolvimento de Placas Cimentícias Reforçadas com Incorporação do Lodo Primário da Indústria de Papel Celulose**. 2018. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - Uenf, Campos dos Goytacazes, 2018.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2025.

BAZUCO, A. **Aproveitamento de resíduos da construção civil na produção de novos concretos**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BERNARDON, L. *et al*. Avaliação da substituição total de areia natural por RCC em argamassa de assentamento. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v. 9, n. 2, p. 173-192, jul./dez. 2020.

BEZERRA, C. de S.; FERREIRA, K. C. Análise Operacional de Prensas de Rolos na Cominuição de Minério de Cobre: Estudo de Caso na Mina do Salobo. **Revista Foco**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 1-22, 17 jan. 2025. Brazilian Journals.

BISTAFA, S. N. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 147, p. 3-7, 3 ago. 2010.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 254 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CARDOSO, A. C. F.; GALATTO, S. L.; GUADAGNIN, M. R. Estimativa de Geração de Resíduos da Construção Civil e Estudo de Viabilidade de Usina de Triagem e Reciclagem. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 60, n. 31, p. 1-10, mar. 2014.

CASALI, J. M. *et al*. Avaliação do tipo de cimento Portland nas propriedades da argamassa estabilizada ao longo do tempo. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2024, 20., Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2024.

CBIC - CÂMARA BRASILEIRA DA INDUSTRIA DA CONSTRUÇÃO (Brasil). **Banco de Dados**. 2025. Disponível em: http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil. Acesso em: 26 jul. 2025.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Resolução**. Brasília, 17 jul. 2002.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 448, de 18 de janeiro de 2012. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, nos arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10º e 11ºincluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. **Resolução**. Brasília, 17 ago. 2004. p. 1-1.

CORREIA, J. C. G.; COUTO, H. J. B. Classificação e Peneiramento. In: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: Cetem/McTic, 2018. Cap. 5. p. 225-269.

CRIADO, B. de O. *et al*. Análises de desempenho mecânico, térmico e acústico de placa em compósito cimento-madeira como painel de vedação. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 28, n. 8, p. 112, 2024.

CUNHA, K. da S. *et al*. Resíduos sólidos na construção civil no Brasil. **Revista de Gestão e Secretariado (Management And Administrative Professional Review)**, São Paulo/Sp, v. 14, n. 6, p. 8671-8692, 6 jun. 2023. Brazilian Journals.

DAMAS, T. de S. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do compósito cimento-madeira utilizando farinha de madeira pinus com cimento Portland**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.

DE NOIRFONTAINE, M. N. et al. Polymorphism of tricalcium silicate, the major compound of Portland cement clinker: 2. Modelling alite for Rietveld analysis, an industrial challenge. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 54–64, 2006.

DELMONDES, P. G. D. **Reaproveitamento de resíduos da construção civil gerados no município do Rio de Janeiro como alternativa para o seu descarte**. 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

DEZORDI, A. P. da R.; VIEIRA, E. P.; SAUSEN, J. O. O impacto nos custos ambientais dos resíduos gerados na construção civil. In: XXIV Congresso Brasileiro de Custos, 24., 2017, Florianópolis. **Anais [...] .** Florianópolis: Abcustos, 2017. v. 1, p. 1-15.

DUTRA, R. M. de S. *et al*. Agregados Reciclados de Resíduos da Construção Civil e Demolição (RCD): Classificação, Aplicação e Normatização. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 32., 2023, Belo Horizonte/Mg. **Anais [...] .** Belo Horizonte: Abes, 2023. p. 1-5.

FABRO, F.; *et al*. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 191-212, jun. 2011.

FAGUNDES, K. P. *et al*. Propriedades de concretos produzidos com fresa de asfalto em substituição ao agregado miúdo. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 8885-8899, 1 mar. 2023. South Florida Publishing LLC.

FAROOQ, M. U. *et al*. Mechanical and durability performance of 100% recycled aggregate concrete pavers made by compression. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 73, p. 106729-106750, ago. 2023. Elsevier BV.

FERREIRA, R. L. S. *et al*. Caracterização e estudo comparativo entre dosagens de argamassas para revestimento, utilizando resíduos da construção civil (RCC) oriundos da Grande Natal/RN. In: 2º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2019, Natal/RN. **Anais[...]** Natal, 2019. p. 1-12.

FREITAS, E. M. da S. G. *et al*. Comportamento Físico-Mecânico e Térmico de Placas Cimentícias com Resíduos de Borracha de Pneu. In: 6° Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção (ENARC 2019), 6., 2019, Belém/PA. **Anais [...] .** Belém: Antac, 2019. p. 481-494.

GOBBE, D. C.; VANDERLEI, R. D. Concreto Sustentável com Resíduos da Construção e Demolição: revisão sistemática. In: 5° Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 5., 2022, Gramado. **Anais [...] .** Gramado: Ibeas, 2022. p. 1-10.

GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J.; AZEVEDO, R. C. Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: uma análise bibliográfica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 1-12, 09 jan. 2019. FapUNIFESP (SciELO).

HOPPE FILHO, J. *et al*. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, p. 1-19, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 266**: Acoustics — Preferred frequencies. Geneva: ISO, 1997.

JU, Y. *et al*. **Carbonation behavior of reactivated recycled concrete fines containing residual sand**: Effects of Ca/Si ratio adjustment and activation temperature. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 18, art. 100557, 2026.

KIHARA, Y; VISEDO, G. Economia de baixo carbono: uma visão para o futuro da indústria brasileira de cimento. **Concreto & Construções**, São Paulo, ano XLII, n. 77, p. 86-88, jan./mar. 2015.

KOKSAL, F.; GENCEL, O.; KAYA, M. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 88, p. 175-187, 2015.

LEEMANN, A.; SANCHEZ, L. Internal alkali transport in recycling concrete and its impact on alkali-silica reaction. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 174, p. 107334-107346, dez. 2023. Elsevier BV.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-15072026-081023/pt-br.html. Acesso em: 29 jul. 2026.

LIMA, R. S.; LIMA, Ruy Reynaldo Rosa. **Guia para Elaboração de Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil**. Curitiba: Crea-Pr, 2012. 60 p.

LOSCHI NETO, A. *et al*. Efeito das Diferentes Madeiras no Isolamento Acústico. **Floresta**, v. 38, n. 4, p. 1-10, 2008.

MA, J. *et al*. Influence of geometric shape, pore structure and surface modification of recycled fine aggregate on the rheology behaviour and strength development of mortar. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 91, p. 109604-109617, mai. 2024.

MARÍN-CORTÉS, M. F. A. et. al. Experimental characterization data on aggregates from construction and demolition wastes for the assistance in sorting and recycling practices. **Construction and Building Materials**, v. 435, ep. 136798, 2024.

MARQUES, A. C. *et al*. Revestimento Cimentício Composto por Resíduos da Construção Civil e Lama de Mármore e Granito. In: VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 8., 2017, Campo Grande. **Anais [...] .** Campo Grande: Ibeas, 2017. p. 1-6.

MURARI, A. R. **Avaliação do Desempenho Termoacústico de Painéis de Vedação Vertical em *Wood Frame*. Estudo de Caso: Habitação Unifamiliar em São Carlos - SP**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL (Brasil). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**: cidades e comunidades sustentáveis. Cidades e comunidades sustentáveis. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11. Acesso em: 19 jul. 2025.

NEOSSOLU ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE (Minas Gerais). **Plano de lavra extração de areia**. Disponível em: https://www.neossolu.com.br/plano-lavra-extracao-areia. Acesso em: 14 set. 2025.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2. ed. Harlow: Pearson Education, 2010. 442 p

OLIVEIRA, C. F. de. **Análise das propriedades do concreto quando utilizado após início de pega:** tempo de utilização de concreto estrutural vencido. 2018. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

OLIVEIRA, M. F. *et al*. Desempenho acústico de laje com vigota e lajota: isolamento ao som aéreo e de impacto. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 243-254, 2021.

PASOTI, B. de F. **Chapas Cimentícias com a Incorporação de Resíduos do Processamento de Pedras Ornamentais**. 2020. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2020.

PEREIRA NETO, C. *et al*. Design de Pavers Permeáveis para Pavimentação Urbana. In: V Semana Acadêmica de Engenharia de Materiais, 5, 2026, Seropédica. **Anais[...]**.

PILZ, T. L. *et al*. Estudo de Placas Cimentícias Para Uso em Habitações Populares: Uma Revisão Sistemática da Literatura. **The Journal Of Engineering And Exact Sciences**, Viçosa, v. 6, n. 1, p. 56-62, 23 jan. 2020.

PROACÚSTICA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A QUALIDADE ACÚSTICA. **Manual ProAcústica sobre a norma de desempenho ABNT NBR 15575:2021: acústica**. 4. ed. São Paulo: ProAcústica, 2022. 46 p. Disponível em: https://www.proacustica.org.br/manuais-proacustica/manual-proacustica-sobre-a-norma-de-desempenho-4edicao/. Acesso em: 29/07/2026.

RIBEIRO, D. V. *et al* (org.). **Princípios da Ciência dos Materiais Cimentícios**: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos. Curitiba: Appris, 2021. 569 p. Coleção Geral.

ROMANO, R. C. O. **Incorporação de Ar em Materiais Cimentícios Aplicados em Construção Civil**. 2013. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTANA, V. M. *et al*. Utilização de Concreto Reciclado na Aplicação de Elementos Estruturais. In: XI Encontro Latino Americano de Pós Graduação, 11., 2011, São José dos Campos. **Anais [...] .** São José dos Campos: Univap, 2011. p. 1-6.

SETLIK, E. C. F. *et al*. Desempenho acústico em placas cimentícias com a aplicação materiais isolantes não convencionais. **Revista Contribuiciones a las Ciências Sociales**, v. 16, n. 6, p. 4617-4627, 2023.

SILVA JÚNIOR, O. J.; RÊGO SILVA, J. J.; PINHEIRO, M. A. S. Desempenho acústico de divisórias verticais em blocos de gesso: uma avaliação em campo e laboratório. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 5, n. 2, p. 15-21, jan. 2015.

SILVA, R. H. de L. **Incorporação de matérias primas alternativas em massas cerâmicas para grés sanitário**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018

SILVA, A. C. G. *et al*. Comparison of the properties of mortars containing expanded clay, vermiculite, and rubber residue. **Revista Cerâmica**, v. 69, n. 392, p. 325-331, 2023.

SOARES, I. H. de L. *et al*. Estudo das propriedades mecânicas e ciclo da vida em placas cimentícias de geopolímero com resíduos. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 22, n. 9, p. 1-18, 13 set. 2024. South Florida Publishing LLC.

SONAWANE, T. R.; PIMPLIKAR, S. S.. Use of Recycled Aggregate Concrete. **Iosr Journal Of Mechanical And Civil Engineering**, [S.L.], p. 52-59, abr. 2023.

SOUZA, J. J. de; SILVA, C. C. C. Caracterização dos Resíduos da Construção e Demolição (RCD) Gerados nas Obras da Cidade de Floresta. **Revista Multi Disciplinar do Sertão**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 47-54, mar. 2023.

TABOSA, J. M. *et al*. Os Processos de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil (RCC) e a Produção de Agregado. In: Seminário Regional de Extensão Universitária da Região Centro-Oeste, 12., 2021, Goiânia. **Anais [...] .** Goiânia: Ufg, 2021. p. 590-595.

TANG, Q. *et al*. Utilization of recycled concrete powder and clay brick powder in cementitious composites: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 264, 120281, 2020.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. de S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 75-90, 18 nov. 2016.

TAYARI, F. *et al*. Sustainable Sound Absorption: A Critical Review of Material Innovation and Geometry-Driven Design. **Revista Polymers**, v.18, n. 1522, p. 1-42, 2026.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de Propriedades do Concreto Produzido com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição Visando Aplicações Estruturais**. 2007. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

ULSEN, C. *et al*. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 339-346, 2010.

WANG, B. *et al*. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 171, p. 105565-105594, ago. 2021. Elsevier BV.

YANG, X. *et al*. Straightening methods for RCA and RAC—a review. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 141, p. 105145-105178, ago. 2023. Elsevier BV.