



Rafael Clementino Arêas Dos Santos

**AGREGADO RECICLADO: UMA SOLUÇÃO  
SUSTENTÁVEL PARA O ASSENTAMENTO DE  
BLOCOS DE VEDAÇÃO**

**DEFESA DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Defesa orientada pela Professora Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro  
Cordeiro

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**Rafael Clementino Arêas Dos Santos**

## **AGREGADO RECICLADO: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL PARA O ASSENTAMENTO DE BLOCOS DE VEDAÇÃO**

**Defesa de Mestrado**

Exame de Defesa submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Belém/PA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A678a Arêas Dos Santos, Rafael Clementino.  
Agregado Reciclado: Uma Solução Sustentável para o  
Assentamento de Blocos de Vedação / Rafael Clementino Arêas  
Dos Santos. — 2025.  
108 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Coorientação: Prof<sup>a</sup>. Dra. Mariana Domingues Von  
Paumgarten  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Belém, 2025.
1. Sustentabilidade; Resíduo; Argamassa; Agregado.. I.  
Título.

CDD 624

---

## AGREGADO RECICLADO: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL PARA ASSENTAMENTO DE BLOCOS DE VEDAÇÃO

AUTOR:

**RAFAEL CLEMENTINO ARÊAS DOS SANTOS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA  
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA  
ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 05 / 08 / 2025.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LUCIANA DE NAZARÉ PINHEIRO CORDEIRO  
Data: 25/08/2025 19:04:05-0300  
Verifique em <https://validar.ufpa.gov.br>

BANCA EXAMINADORA:

Profª. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Orientadora (UFPA)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MATEUS ANTONIO NOGUEIRA OLIVEIRA  
Data: 22/08/2025 13:50:44-0300  
Verifique em <https://validar.ufpa.gov.br>

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira  
Membro Externo (UFMG)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARIANA DOMINGUES VON PAUMGARTTEN  
Data: 22/08/2025 15:26:19-0300  
Verifique em <https://validar.ufpa.gov.br>

Profª. Dra. Mariana Domingues Von Paumgarten  
Membro Externo (UFPA)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LUIZ MAURICIO FURTADO MAUÉS  
Data: 22/08/2025 09:36:29-0300  
Verifique em <https://validar.ufpa.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Coordenador do PPGECC / ITEC / UFPA

*“Se você quer um pedacinho do Paraíso, acredite em Deus. Mas se você quer conquistar o mundo, acredite em você porque Deus já te deu tudo o que você precisa para você vencer”*

*(Augusto Branco)*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01: Classificação dos resíduos da construção civil .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 02: Equipamento para medição de consistência.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 03: Identificação do resíduo reciclado utilizado – (a) Resíduo em obra, (b) Resíduo coletado para ser beneficiado, (c) Resíduo beneficiado .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 04: Fluxograma do planejamento experimental.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 05: Processo de beneficiamento da areia reciclada – (a) Resíduo, (b) Britagem em britador de mandíbulas, (c) Peneiramento, (d) Resíduo Beneficiado .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 06: Procedimento de mistura adotado para homogeneização das argamassas .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 07: Preenchimento dos moldes com argamassa .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 08: Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas estudadas ..</b>	<b>50</b>
<b>Figura 09: Ensaio de tração na flexão nos CP's de argamassa (a) Ensaio de compressão dos CP's de argamassa (b) .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 10: Desenho Esquemático Demonstrando as Dimensões Utilizadas nas Execuções dos Painéis de Alvenaria e a Espessura das Juntas das Argamassas .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 11: Mini Painéis para as Possíveis Análises – (a) Painéis de Alvenaria com Tijolos Cerâmicos Executados, (b) Aplicação da Camada de Chapisco nas Superfícies dos Painéis de Alvenaria, (c) Aplicação da Camada de Reboco nas Superfície dos Painéis de Alvenaria .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 12: Desenho Esquemático Demonstrando a Forma de Aplicação do Cachimbo de Vidro .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 13: Desenho Esquemático Demonstrando o Passo a Passo dos Procedimentos Realizados Para a Realização do Ensaio de Permeabilidade nos Painéis de Alvenaria sem e com Revestimentos em suas Superfícies .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 14: Ensaio de Permeabilidade pelo Método de Cachimbo nas Alvenarias .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 15: Ensaio de Permeabilidade pelo Método de Cachimbo nos Painéis de Alvenaria já Revestidos .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 16: Curva de distribuição granulométrica do agregado natural e reciclado utilizado .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 17: Gráficos demonstrativos das resistências mecânicas encontradas para as argamassas estudadas .....</b>	<b>63</b>

<b>Figura 18: Módulo de elasticidade dinâmico (<math>E_d</math>) em função do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado aos 28 dias .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 19: Aparecimento de Microfissuras nas Juntas nos Painéis de Alvenaria Executadas .....</b>	<b>72</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Principais parâmetros e resultados esperados segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023).....	29
Tabela 02: Nomenclatura das argamassas estudadas .....	43
Tabela 03: Características físicas, químicas, mecânicas e mineralógicas do cimento CII F 32 .....	44
Tabela 04: Características técnicas do aditivo Quimikal MPK 120.....	47
Tabela 05: Consumo de Materiais (kg/m <sup>3</sup> ) .....	48
Tabela 06: Resultados encontrados sobre densidade, absorção de água, massa unitária, índice de vazios, teor de material pulverulento dos agregados analisados .....	56
Tabela 07: Composição granulométrica dos agregados miúdos ensaiados .....	57
Tabela 08: Propriedades no estado fresco de argamassa com e sem resíduo .....	59
Tabela 09: Propriedades no estado endurecido de argamassa com e sem resíduo ....	61
Tabela 10: Resultados encontrados de resistência mecânica .....	62
Tabela 11: ANOVA do efeito do teor de resíduo na resistência à compressão .....	64
Tabela 12: ANOVA do efeito do teor de resíduo na resistência à tração na flexão ....	65
Tabela 13: Resultados do ensaio de absorção por imersão .....	65
Tabela 14: Resultados do ensaio de absorção por capilaridade .....	66
Tabela 15: Modelos de previsão de módulo de elasticidade dinâmico .....	68
Tabela 16: Classificação das argamassas segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023) ....	69
Tabela 17: Resultados de permeabilidade em cada um dos painéis .....	71
Tabela 18: Análise estatística de permeabilidade em mini parede sem revestimentos .....	73
Tabela 19: Análise estatística de permeabilidade em mini parede com revestimentos .....	73
Tabela 20: Análise qualitativa dos impactos ambientais oriundos da emissão de CO <sub>2</sub> na fabricação das argamassas com resíduos .....	74
Tabela 21: Análise qualitativa do custo na fabricação das argamassas com resíduos ....	75
Tabela 22: Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo reciclado .....	102
Tabela 23: Determinação da composição granulométrica do agregado miúdo natural .....	102



## **LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 01: Tipos de resíduos como agregados reciclados, aplicações e vantagens ..</b>	<b>24</b>
<b>Quadro 02: Ensaio para caracterização dos índices físicos dos agregados naturais e reciclados .....</b>	<b>46</b>
<b>Quadro 03: Ensaio realizado durante o estado fresco e endurecido das argamassas .....</b>	<b>49</b>

## **LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS**

RCD – Resíduo de Construção e Demolição

RCC – Resíduos de Construção Civil

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CNI – Confederação Nacional da Indústria

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação

CP – Cimento Portland

UFPA – Universidade Federal do Pará

COSANPA – Companhia de Saneamento do Pará

WAMBUCO – European Waste Manual For Building Construction

## RESUMO

O impacto negativo da construção civil no meio ambiente é conhecido tanto pela produção dos materiais utilizados como matéria prima, quanto pela geração de resíduos sólidos durante os processos de construção e demolição. Uma solução alternativa é a utilização de materiais alternativos. Apesar da influência de utilização de agregados reciclados já ser conhecida em concretos e pavimentação, o uso em argamassas ainda é discreto na literatura. Este estudo propõe avaliar o comportamento de argamassas de assentamento com substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados oriundos de resíduos de construção e demolição, no caso, resíduos de argamassas. Para análise foram confeccionadas argamassas com 10%, 20%, 30% e 40% de substituição de agregado natural miúdo com traços de 1:6 (Cimento : Areia em Massa) para assentamento, comparando com os traços de referência. Para análise estatística dos resultados utilizou-se o método ANOVA. Para avaliar as argamassas de assentamento foram confeccionadas mini paredes de alvenaria assentadas com as misturas estudadas que ficaram expostas em ambiente externo para realização de ensaios de permeabilidade. Observou-se que houve uma tendência decrescente na resistência mecânica das argamassas com a utilização de resíduos, entretanto, a análise estatística indicou que não houve variação significativa dos resultados, sugerindo a baixa influência da utilização dos resíduos para essa propriedade. Para permeabilidade, a mistura com 40% de resíduo cimentício se mostrou mais permeável, segundo a análise estatística, as demais misturas, não apresentaram variabilidade significativa entre si. Por meio dos resultados, observou-se ser viável a aplicação dos agregados reciclados em argamassas de assentamento.

**Palavra - Chave:** Sustentabilidade; Resíduo; Argamassa; Agregado.

## ABSTRACT

The negative impact of civil construction on the environment is known both for the production of materials used as raw materials and for the generation of solid waste during the construction and demolition processes. An alternative solution is the use of recycled aggregates. Although the influence of the use of recycled aggregates is already known in concrete and paving, there is still no consensus in the literature on mortars. This study aims to evaluate the performance of laying mortars with partial replacement of natural aggregates by recycled aggregates from construction and demolition waste, in this case, mortar waste. For the analysis, mortars with 10%, 20%, 30% and 40% replacement of fine natural aggregate with 1:6 ratios for laying were prepared, comparing them with the reference ratios. For statistical analysis of the results, the ANOVA method was used. To evaluate the mortars, mini masonry walls were made with the studied mixtures and exposed to the outside environment, and permeability tests were performed. It was observed that there was a decreasing trend in the mechanical resistance of the mortars with the use of waste. However, the statistical analysis indicated that there was no significant variation in the results, suggesting the low influence of the use of waste on this property. For permeability, the mixture with 40% cement waste was more permeable, according to the statistical analysis, the other mixtures did not present significant variability among themselves. Through the results, the applicability of the use of recycled waste for mortar was confirmed.

**Keyword:** Sustainability; Waste; Mortar; Aggregate.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1. CONTEXTO DO TEMA E PROBLEMÁTICA.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3 OBJETIVOS DE PESQUISA.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.1 Objetivo geral.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2. RCC – RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. DEFINIÇÕES, COMPOSIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO AGREGADOS.....</b>	<b>21</b>
<b>3. ARGAMASSAS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2. DEFINIÇÕES .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3. PROPRIEDADES.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.1. Trabalhabilidade e Consistência .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.2. Resistência à Compressão e Resistência à Tração na Flexão .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.3. Permeabilidade .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4. MODELOS E MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAR DESEMPENHO DE ARGAMASSAS .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4.1. Modelos para argamassas de assentamento e revestimento .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5. ARGAMASSA COM AGREGADOS DE RCC.....</b>	<b>38</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2. MATERIAIS .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3. MÉTODOS.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.1. Produção Das Argamassas.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.2. Caracterização das Argamassas.....</b>	<b>48</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>56</b>
<b>5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS .....</b>	<b>56</b>
<b>5.2. EFEITO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO NAS CARACTERÍSTICAS NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO .....</b>	<b>59</b>

<b>5.3. EFEITO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO NAS CARACTERÍSTICAS NO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO .....</b>	<b>61</b>
<b>5.3.1. Densidade de Massa no Estado Endurecido.....</b>	<b>62</b>
<b>5.3.2. Resistência à tração na flexão e à compressão .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3.3. Absorção por imersão .....</b>	<b>65</b>
<b>5.3.4. Absorção por capilaridade.....</b>	<b>66</b>
<b>5.3.3. Módulo de elasticidade dinâmico .....</b>	<b>67</b>
<b>5.4. CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS SEGUNDO A NBR 13281-2 (ABNT, 2023).....</b>	<b>69</b>
<b>5.5. ENSAIO DE PERMEABILIDADE PELO MÉTODO DE CACHIMBO.....</b>	<b>71</b>
<b>5.6. ANÁLISE QUALITATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E DO CUSTO DAS ARGAMASSAS COM E SEM RESÍDUOS.....</b>	<b>74</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
<b>6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. CONTEXTO DO TEMA E PROBLEMÁTICA**

A indústria da construção civil se destaca em todo planeta não só como uma grande consumidora de recursos, mas também como uma ampla geradora de resíduos. Essa indústria tem grande importância, pois suas atividades influenciam no desenvolvimento econômico e social no Brasil, por isso é essencial para o país lidar com o significativo volume de resíduos da construção civil que é gerado anualmente. Existem alguns entraves que dificultam combinar essa indústria com o desenvolvimento sustentável, gerando um sério problema ambiental (Matuti, 2022).

A realidade da construção sustentável solicita uma diminuição do consumo de matérias-primas naturais não renováveis e a geração de novos produtos a partir da reciclagem de resíduos. No desenvolvimento da reciclagem dos resíduos para uma forma eficiente e segura, a tecnologia pode contribuir para produtos com desempenho técnico adequado e que sejam financeiramente competitivos nos diferentes mercados (Alvarenga, 2021).

Conforme o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2022, os municípios brasileiros recolheram mais de 48 milhões de toneladas de Resíduos de Construção Civil (RCC), refletindo um aumento de 2,9% em relação ao ano anterior. A média de coleta por habitante foi de aproximadamente 227 kg por ano, sendo em grande parte composta por resíduos de construção e demolição descartados em vias e outros locais públicos (Abrelpe, 2022).

Ainda que os resíduos gerados no setor da construção sejam considerados de baixa periculosidade, eles representam um grave problema em muitas cidades brasileiras e sobrecarregam os sistemas de limpeza pública dos municípios. Tais resíduos representam de 50% a 70% de todo o volume de resíduos sólidos gerados, a depender do município (IPEA, 2022).

Quanto às responsabilidades para ações necessárias de gestão, segundo a Lei 12.305 (2010, Brasil) que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), cabe ao poder público gerenciar os serviços de limpeza urbana e de manejo de resíduos, observados o respectivo plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos (Brasil, 2020).

Sobre este princípio, Oliveira (2012) reitera que a Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos em Belém apresenta desafios e limitações de ordem técnica, econômica, administrativa e, a principal delas, política. Percebe-se que a falta de reconhecimento

institucional interfere nas várias características de sua gestão, e que surge como a fragilidade mais marcante do programa.

Essa problemática subsiste há anos, pois o sistema de limpeza urbana de Belém é inadequado e ultrapassado, ocasionando vários problemas com o tratamento do lixo hospitalar, do lixo doméstico e industrial, principalmente o entulho da construção civil e os graves problemas com o destino no Aterro Sanitário do Aurá (Leite, 2020).

A ausência de ações efetivas tem acarretado graves problemas de caráter ambiental, principalmente pela disposição irregular de RCC em locais clandestinos. Essas ocorrências, em grande parte, são provocadas pelos pequenos geradores devido à ineficiência do sistema de coleta para pequenos volumes, desde o recolhimento correto até a destinação final ambientalmente adequada deste material (Leite, 2020).

Segundo Santos (2024), na Região Metropolitana de Belém, há relatos recorrentes de despejo de entulho às margens de igarapés e em áreas de proteção permanente, resultando em obstruções de drenagem, alagamentos, proliferação de vetores de doenças e degradação ambiental de manguezais urbanos. Os autores apontam que, embora a legislação municipal preveja multas para descarte irregular, a falta de fiscalização efetiva inviabiliza sua aplicação prática.

Além disso, estudo de Gomes (2023) revelou que em Belém mais de 70% do entulho gerado por pequenas reformas não chega a áreas licenciadas, sendo descartado em terrenos baldios, vias públicas ou áreas verdes, reforçando a necessidade de políticas públicas que incluam pontos de entrega voluntária acessíveis e cooperativas de triagem devidamente licenciadas.

Entretanto, pesquisas recentes têm apontado caminhos promissores para o reaproveitamento desses materiais descartados irregularmente, por meio de processos de beneficiamento e reintrodução como insumo em novas obras. De acordo com Cardoso e Nunes (2024), em Ananindeua, município da Região Metropolitana de Belém, está em fase de projeto a implantação de uma central de triagem de RCC voltada à produção de agregados reciclados para utilização em pavimentação de vias secundárias e estabilização de terrenos de ocupações irregulares, reduzindo custos públicos com transporte de materiais e promovendo recuperação ambiental de áreas degradadas.

Em Belém, Souza (2023) destacou iniciativas de pequenas usinas móveis de britagem para reaproveitar entulho de demolições como base para calçadas ecológicas em áreas periféricas, promovendo inclusão produtiva de catadores de materiais recicláveis que passaram a operar os equipamentos após capacitação técnica.



Outras cidades brasileiras também têm avançado nesse reaproveitamento. Em Curitiba, Rocha (2023) relatam o uso de RCC reciclado em blocos intertravados para calçamento de praças públicas, enquanto em Recife, Carvalho (2022) demonstraram que resíduos cerâmicos coletados irregularmente e beneficiados em usinas locais foram aplicados na produção de argamassas para assentamento de alvenaria não estrutural, com ganhos em redução de custos, minimização de impactos ambientais e geração de empregos locais.

Em Manaus, Pereira (2022) apontou o uso experimental de RCC reciclado como agregado para fabricação de tubos de concreto para drenagem urbana, com resultados técnicos satisfatórios e viabilidade econômica superior ao uso de brita natural, sendo esta uma solução que, segundo os autores, poderia ser replicada em outras capitais amazônicas.

Os principais benefícios do reaproveitamento de RCC incluem a redução da demanda por recursos naturais não renováveis, menor consumo energético em comparação à produção de agregados virgens, diminuição de áreas degradadas por descarte irregular e geração de emprego e renda, conforme reforçam Martins e Almeida (2024). Esses autores destacam que a adoção de tecnologias simples de britagem e classificação granulométrica permite que até 80% dos resíduos sejam reaproveitados na própria região onde foram gerados, reduzindo custos logísticos e emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao transporte.

Desta forma, torna-se relevante adquirir competências e táticas para conciliar a escassez de insumos naturais, a preservação do meio ambiente, a destinação de resíduos e a sua reutilização em outros materiais, por meio de programas de gestão e controle do reuso de recursos materiais nos processos construtivos, de maneira sustentável (Barbisan, 2023).

O uso de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção (RCC) na produção de concretos é viável e ambientalmente vantajoso, desde que as características dos resíduos sejam adequadamente avaliadas (Coêlho, 2024). A substituição parcial ou total de agregados naturais por reciclados pode reduzir significativamente os impactos ambientais associados à construção civil, contribuindo para a sustentabilidade do setor (Maia, 2021).

Entretanto, devido às propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados como maior porosidade e menor resistência, o concreto produzido com esses materiais é frequentemente recomendado para aplicações não estruturais (Maia, 2021). No caso das argamassas, características como aderência e permeabilidade têm se mostrado favoráveis ao uso de agregados reciclados, especialmente quando se busca um equilíbrio entre desempenho técnico e responsabilidade ambiental (Alvarenga, 2021).

Além disso, segundo Ferreira (2023), a promoção de políticas públicas de incentivo à cadeia da reciclagem da construção civil, incluindo capacitação de mão de obra, linhas de financiamento para centrais de beneficiamento de RCC e revisão das normas técnicas para incorporação desses materiais em diferentes tipologias de argamassa, é considerada essencial para a consolidação de um modelo de economia circular no setor.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

O uso de argamassas recicladas tem ganhado destaque mundial como estratégia sustentável na construção civil, especialmente em países com tradição histórica no uso dessa técnica, como Portugal. Pesquisadores como Gomes (2021) e Faria (2020) destacam que, em Portugal, a incorporação de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção (RCC) em argamassas tem sido incentivada não apenas por razões ambientais, mas também como forma de preservar técnicas construtivas tradicionais herdadas e adaptadas nas antigas colônias portuguesas, como Angola, Moçambique e Brasil.

Essas técnicas incluem, por exemplo, o uso de argamassas de cal aérea com areia local em paredes de alvenaria de pedra ou terra crua compactada, comuns em edificações coloniais do Brasil, como descrito por Mazzilli (2022), que analisou o restauro de igrejas barrocas mineiras utilizando traços à base de cal hidratada e agregados reciclados de demolições locais. Em Moçambique, segundo Fonseca (2021), técnicas como a construção com tijolos de terra crua estabilizada com cal foram aplicadas desde o século XVII para aumentar a durabilidade das paredes em edificações residenciais e comunitárias, enquanto em Angola o emprego de blocos de terra compactada revestidos com argamassa de cal e areia de rio era amplamente difundido como solução de conforto térmico em construções habitacionais. Essas práticas reforçam a importância do conhecimento técnico tradicional aliado às soluções modernas de sustentabilidade.

Essa herança cultural e técnica fortaleceu o uso da argamassa como elemento essencial em edificações históricas e contemporâneas. Segundo Santos (2022), em países como Espanha, França e Itália, a utilização de agregados reciclados em argamassas e concretos vem sendo aplicada principalmente em obras de reabilitação de centros urbanos históricos, onde a compatibilidade de propriedades físico-mecânicas entre materiais novos e antigos é essencial para garantir a integridade estrutural e patrimonial dos edifícios.

No Brasil, essa prática tem sido amplamente adotada e estudada, com foco na durabilidade e desempenho das argamassas recicladas. Pesquisas recentes, como as de Lacerda (2020) e Silva (2025), demonstram que a substituição parcial de agregados naturais

por reciclados pode manter ou até melhorar propriedades como aderência e resistência à compressão, além de reduzir significativamente o impacto ambiental da construção. Complementando esses achados, Oliveira, (2023) investigaram a incorporação de resíduos cerâmicos moídos em argamassas de assentamento estrutural, observando ganhos na trabalhabilidade e redução na absorção capilar, o que contribui para a durabilidade das alvenarias.

A escassez de areia natural tem se tornado um problema crítico em várias regiões do Brasil, especialmente nas áreas metropolitanas de São Paulo (SP) e Recife (PE), onde a intensa urbanização e as restrições ambientais à extração mineral têm comprometido o abastecimento do insumo. Em São Paulo, por exemplo, a expansão urbana tem afastado os pontos de extração para regiões mais distantes, elevando os custos logísticos e dificultando o acesso ao material (Oliveira, 2021). Já em Recife, estudos apontam que a crescente demanda da construção civil tem pressionado os recursos naturais locais, tornando urgente a busca por alternativas sustentáveis (Correia, 2022).

Além dessas cidades, Belo Horizonte (MG) também enfrenta limitações no abastecimento de areia natural devido à exaustão de jazidas próximas à região metropolitana, levando ao aumento do uso de areia artificial proveniente de pedreiras e pó de britagem, conforme apontado por Guimarães (2023). Em Curitiba (PR), alternativas como o reaproveitamento de resíduos de fundição e areia descartada de processos industriais têm sido estudadas para uso em argamassas, reduzindo o volume de resíduos e a extração mineral (Souza, 2024).

Na região Norte, especificamente na Região Metropolitana de Belém (PA), a escassez de areia natural tem se intensificado devido à sobrecarga da demanda local, à retirada desordenada dos rios próximos e ao aumento da fiscalização ambiental sobre dragas ilegais, gerando oscilações significativas no preço do insumo. Segundo Castro (2023), para minimizar essa problemática, construtoras e concreteiras passaram a utilizar com maior frequência o pó de pedra oriundo de pedreiras localizadas em Ananindeua e Benevides, além de implementarem sistemas de lavagem e classificação granulométrica para adequação do material às especificações técnicas. Complementarmente, pesquisas regionais, como a de Almeida (2024), têm investigado o uso de resíduos cerâmicos triturados como agregado fino em argamassas de assentamento e revestimento, obtendo resultados promissores em termos de resistência mecânica, trabalhabilidade e redução do impacto ambiental no ciclo produtivo da construção.

Nesse contexto, pesquisadores como Araújo (2018) propuseram o uso de resíduos de pedreiras como substitutos da areia natural, obtendo bons resultados em termos de resistência e viabilidade ambiental. Bonato (2020) também destacou o reaproveitamento de areia descartada de fundição como agregado em blocos e argamassas, contribuindo para a economia circular. Recentemente, Dias (2024) investigaram o uso de lamas de britagem de rocha como finos reciclados em argamassas de revestimento, observando boa adesividade, resistência e redução de impacto ambiental pela menor geração de passivo mineral.

No campo das argamassas com agregados reciclados, estudos como os de Lacerda (2020) e Marques (2023) têm demonstrado que essas soluções não apenas mantêm propriedades técnicas adequadas, como também representam uma resposta eficaz à escassez de recursos naturais, promovendo práticas mais sustentáveis na construção civil brasileira. Além disso, Vieira (2023) reforçou que o uso de agregados reciclados pode reduzir custos de transporte e disposição de RCC em até 40%, dependendo da proximidade das usinas de reciclagem aos canteiros de obras, fortalecendo a economia circular no setor.

Atualmente, observa-se um volume expressivo de informações voltadas à incorporação de resíduos em argamassas de revestimento, com destaque para pesquisas como as de Silva (2024) e Lima (2024), que analisam o uso de resíduos de construção civil (RCC) e resíduos industriais como agregados alternativos, evidenciando ganhos em desempenho e sustentabilidade. Entretanto, estudos como o de Costa (2022) apontam que há potencial pouco explorado em argamassas de injeção para reforço estrutural e argamassas autonivelantes, onde a elevada fluidez exigida pode ser ajustada pelo uso de agregados reciclados finos associados a superplastificantes, contribuindo para reduzir o consumo de cimento e melhorar a ecoeficiência dos materiais.

No entanto, ainda há uma lacuna significativa no que diz respeito à aplicação desses resíduos em outros tipos de argamassas, como as de assentamento, injeção ou autonivelantes, cujas propriedades específicas exigem investigações mais aprofundadas. Essa escassez de dados limita a ampliação do uso de materiais reciclados em diferentes contextos construtivos. Nesse sentido, a presente pesquisa se insere como uma contribuição relevante, ao buscar compreender o comportamento de argamassas com agregados reciclados em aplicações menos exploradas, ampliando o escopo técnico-científico e fortalecendo o compromisso com práticas construtivas mais sustentáveis.

## **1.3 OBJETIVOS DE PESQUISA**

### **1.3.1 Objetivo geral**

Avaliar o efeito do agregado miúdo reciclado, em diferentes teores de substituição, nas propriedades físico-mecânicas, características no estado fresco e desempenho de estanqueidade das argamassas de assentamento de blocos de vedação, além de analisar os impactos ambientais decorrentes da incorporação desses resíduos.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o efeito do teor de substituição (0, 10%, 20%, 30% e 40%) de areia reciclada nas características no estado fresco de argamassas de assentamento;
- Avaliar o efeito do teor de substituição (0, 10%, 20%, 30% e 40%) de areia reciclada no comportamento físico-mecânico de argamassa de assentamento;
- Avaliar o efeito do teor de substituição (0, 10%, 20%, 30% e 40%) na estanqueidade de painéis de alvenaria de vedação;
- Realizar uma análise ambiental afim de avaliar o efeito de incorporação de areia reciclada em argamassas de alvenaria de vedação.

## **1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos: introdução, referencial teórico, metodologia da pesquisa, resultados e discussões e conclusão.

Na seção 1 foram abordadas a contextualização do tema, problemática, objetivos, relevância, motivação e justificativa da escolha do tema, além da estrutura. A seção 2 explora a base teórica da pesquisa, por meio de bibliografias de diversos autores, a fim de adquirir maior conhecimento e embasamento acerca do tema.

A seção 3 demonstra os procedimentos metodológicos utilizados para a realização da pesquisa, os resultados foram encontrados através dos ensaios definidos pelas normas em vigor, após a determinação dos resultados, foi possível discutir e concluir se os resultados foram satisfatórios ou não para a pesquisa pré-estabelecida.

## **2. RCC – RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO**

### **2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO**

A Construção Civil é uma das atividades mais antigas do mundo e, desde a antiguidade, há registros de diversos processos construtivos cujas etapas sempre geraram resíduos com subprodutos. Os primeiros registros de reutilização de resíduos sólidos em novas obras remontam à edificação das cidades do Império Romano, onde materiais de construções anteriores eram reaproveitados para novas edificações (Paulino, 2022). Durante o Império Bizantino, por exemplo, era comum demolir parcialmente antigas muralhas para reaproveitar pedras em igrejas e palácios, prática que também foi observada na construção de templos hindus e budistas no sudeste asiático, onde blocos de pedra eram reempregados em novas estruturas (Silva, 2023).

Todavia, a primeira aplicação significativa de resíduos da construção civil (RCC) só ocorreu após a Segunda Guerra Mundial. O grande volume de resíduos gerado pela destruição das cidades europeias, após os ataques da guerra, impulsionou uma busca imediata por reutilização. Esse processo envolveu a britagem dos materiais e sua utilização como agregados na reconstrução das cidades (Almeida, 2025). De acordo com Behnood (2022), a Alemanha foi pioneira na criação de usinas de britagem móvel para produção de agregados reciclados utilizados em pavimentações urbanas e bases rodoviárias no pós-guerra.

Atualmente, a reciclagem de resíduos da construção civil tem se tornado uma prática essencial para a sustentabilidade do setor. Estudos recentes destacam a importância da economia circular na gestão desses resíduos, promovendo sua reutilização como insumos para novos produtos e reduzindo impactos ambientais (Silva, 2024). Países como Alemanha, Bélgica e Áustria possuem taxas médias de reciclagem acima de 80%, enquanto a Suíça, por exemplo, alcança cerca de 95% de reaproveitamento dos RCC, destinando-os principalmente para camadas de pavimentação e bases de estradas (Ramos, 2021). Em Luxemburgo e Noruega, os índices superam 85%, reflexo de políticas rigorosas de gestão integrada de resíduos, incentivos fiscais para utilização de agregados reciclados e sistemas logísticos eficientes (Torres, 2024).

No Brasil, as primeiras pesquisas sobre o uso de resíduos de construção e demolição (RCC) como agregados começaram no final da década de 1980 e início de 1990. No entanto, foi a partir dos anos 2000 que estudos mais relevantes ampliaram a discussão

sobre o tema, impulsionados pela necessidade de uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos gerados pelo setor da construção civil (Gerin, 2019). Destaca-se, nesse período, a aprovação da Resolução nº 307 do CONAMA, em 2002, que estabeleceu critérios e procedimentos para a gestão de RCC no Brasil. Essa resolução atribuiu às empresas geradoras de resíduos a responsabilidade pelo gerenciamento adequado, exigindo que fossem destinados de forma eficiente e sustentável. Além disso, o Estado passou a ter a obrigação de oferecer coleta e destinação adequada para pequenos geradores (Gerin, 2019).

Em 2010, foi sancionada a Lei nº 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com o objetivo de reduzir a geração de resíduos sólidos, promover a reutilização e reciclagem, e reforçar a responsabilidade dos geradores na gestão e destinação final dos resíduos. Apesar dessas regulamentações, a implementação ainda enfrenta desafios, especialmente no que diz respeito à destinação adequada dos resíduos em diversos municípios brasileiros (Gerin, 2019).

A primeira cidade brasileira a iniciar um processo estruturado de reciclagem e gestão de resíduos de construção foi Belo Horizonte (Minas Gerais). Com o incentivo do governo estadual, a cidade passou a reutilizar resíduos em diversas áreas da construção civil, com destaque para a pavimentação, por meio de usinas de reciclagem. Além de Belo Horizonte, destacam-se as usinas de São Paulo (Usina Recicla SP), Curitiba (Usina de Reciclagem do Caximba), Porto Alegre (Unidade de Reciclagem Restinga), Recife (Usina EcoGestor) e Goiânia (Usina de Reciclagem do Jardim das Oliveiras), que atuam no reaproveitamento de RCC para base e sub-base de pavimentação, blocos de vedação e agregados para argamassas (Jesus, 2021; Tenorio, 2025).

Na região Norte do Brasil, iniciativas começam a ser implementadas. Em Manaus, há usinas privadas e públicas que processam resíduos de concreto e cerâmica, gerando agregados reciclados aplicados em pavimentação de vias internas e fabricação de blocos intertravados. Na Região Metropolitana de Belém, segundo Lima (2025), embora ainda incipiente, há iniciativas como o Projeto EcoBelém, que prevê a instalação de usinas de reciclagem para atender o Distrito Industrial de Ananindeua e a área portuária, destinando os materiais reciclados para pavimentações e fabricação de pré-moldados não estruturais, com potencial para reduzir o passivo ambiental gerado pelo descarte irregular em canais e igarapés urbanos.

Em outros países, esse setor já está mais desenvolvido. A taxa de reciclagem geral na Europa chega a 50%, enquanto países como Dinamarca, Estônia e Holanda conseguem reciclar mais de 90% dos resíduos de construção. Esses índices elevados podem

estar relacionados ao tipo de gestão adotada e aos processos construtivos empregados, como o uso de pré-moldados e estruturas metálicas, que reduzem significativamente a geração de resíduos (Ramos, 2021). Na Suécia e Finlândia, por exemplo, a maior parte dos RCC reciclados é utilizada para infraestrutura rodoviária e ferroviária, enquanto na Espanha e em Portugal há uso consolidado em bases granulares de estradas e na produção de blocos de concreto reciclado (Bravo, 2021).

Esse panorama reforça a necessidade de investimentos no Brasil em logística reversa, tecnologias de britagem e certificação de agregados reciclados, além de políticas públicas integradas para ampliar a prática em todo o território nacional, sobretudo na região Norte, onde o avanço do setor ainda é limitado, mas apresenta potencial significativo de desenvolvimento sustentável para os próximos anos.

## **2.2. DEFINIÇÕES, COMPOSIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO**

A NBR 15116 (ABNT, 2021) define resíduos da construção civil como “Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”

Os resíduos gerados pelas atividades de construção e demolição são altamente heterogêneos, e sua composição varia conforme diversos fatores, como a fase da obra, a tecnologia construtiva empregada e o tipo de edificação. Estudos recentes indicam que a gestão inadequada desses resíduos pode comprometer sua reciclagem, tornando o processo mais complexo e oneroso devido à dificuldade de separação dos componentes (Silva, 2024).

A reciclagem de resíduos da construção civil tem avançado significativamente nos últimos anos, impulsionada por políticas públicas e inovações tecnológicas. No entanto, desafios como a contaminação dos materiais e a falta de infraestrutura adequada ainda dificultam a implementação de práticas eficientes. Pesquisas recentes destacam a necessidade de aprimorar os processos de triagem e classificação dos resíduos para viabilizar sua reutilização em larga escala (Paulino, 2022).

Com a crescente preocupação ambiental, iniciativas voltadas para a economia circular têm sido fundamentais para reduzir o impacto dos resíduos da construção civil. A implementação de usinas de reciclagem e o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis



são estratégias que vêm sendo adotadas para minimizar os efeitos negativos da disposição inadequada desses resíduos (Cerqueira, 2024).

A NBR 10004 (ABNT, 2024), trata da classificação dos resíduos sólidos e enfatiza a importância da separação dos resíduos já na fonte geradora, juntamente com a identificação de sua origem. A norma estabelece que a classificação dos resíduos deve estar relacionada ao seu processo de origem, garantindo uma gestão mais eficiente e segura.

Quanto aos resíduos de construção civil (RCC), eles são classificados como Classe II-B, ou seja, não perigosos e inertes. Isso significa que esses resíduos contêm elementos químicos estáveis que não reagem quimicamente, minimizando riscos ambientais e permitindo sua reutilização em diversas aplicações na construção civil.

A Resolução 307 do CONAMA (2002), classifica os resíduos originados da construção civil conforme sua origem e materiais constituintes, de acordo com a Figura 01. Segundo esta classificação, o RCC se enquadra na Classe. A.

Figura 01: Classificação Dos Resíduos da Construção Civil

Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;	Resíduos recicláveis para outras destinações. Ex: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas e gesso;	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem ou recuperação	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde;

Fonte: CONAMA (2002)

Os resíduos de construção (RCC) podem ser classificados, de forma geral, em resíduos de cor cinza e resíduos de cor vermelha. Os resíduos de cor cinza são predominantemente compostos por materiais à base de cimento, como argamassas e concretos, além de fragmentos de rochas naturais. Já os resíduos de cor vermelha são constituídos por materiais cerâmicos à base de argila calcinada, contendo óxido de ferro, o que confere a coloração característica (Coutinho, 2016).

Além dessas categorias, existem também os resíduos mistos, que combinam elementos das duas composições, tornando sua separação e reaproveitamento mais complexos. Estudos recentes indicam que a correta classificação e separação desses

materiais são fundamentais para viabilizar sua reciclagem e reutilização em novos processos construtivos, reduzindo impactos ambientais e promovendo a economia circular (Pitolli, 2019).

Existem normas e diretrizes que regulamentam a utilização de resíduos em argamassa. No Brasil, a NBR 15116 (ABNT, 2021), trata do uso de agregados reciclados em concretos estruturais, algumas diretrizes podem ser aplicadas às argamassas. Além disso, a NBR 13281, estabelece requisitos para argamassas de revestimento e assentamento, podendo incluir critérios para o uso de materiais reciclados. Já a NBR 15116 (ABNT, 2021), estabelece diretrizes para o uso de agregados reciclados em concretos estruturais e sem função estrutural, além de sua aplicação em argamassas. A norma especifica critérios para a produção, recepção e uso desses materiais, obtidos a partir do beneficiamento de resíduos da construção civil.

Segundo essa norma, um agregado reciclado pode ser definido como um material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas adequadas para aplicação em obras de edificação e infraestrutura.

Além disso, a norma classifica os resíduos da construção civil em diferentes categorias, conforme sua origem. Entre essas classificações, destacam-se:

- Agregado Reciclado de Concreto (ARC): composto predominantemente por fragmentos de concreto à base de cimento Portland.
- Agregado Reciclado Misto (ARM): formado por uma mistura de materiais cimentícios e cerâmicos.

### **2.3. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO AGREGADOS**

A utilização de resíduos da construção civil (RCC) em concretos, argamassas e pavimentação como substituição total ou parcial das matérias-primas tem se consolidado como uma solução sustentável e amplamente difundida mundialmente. Além de proporcionar uma nova destinação a esses resíduos, essa prática contribui para mitigar a escassez de matéria-prima em diversas regiões, reduzir a disposição em aterros e diminuir os impactos ambientais da atividade mineradora (Silva, 2021).

Estudos recentes demonstram a viabilidade do uso de RCC como agregados em pavimentação, concretos e argamassas, tanto estrutural quanto não estrutural, com resultados satisfatórios em termos de desempenho mecânico, durabilidade e trabalhabilidade, quando aplicado dentro dos limites normativos (Souza, 2022). Além disso, sua fração mais fina tem

sido explorada como substituinte parcial do cimento e como adição mineral para melhorar o desempenho dos materiais (Lozovey, 2021). Essa substituição parcial de cimento por finos de RCC contribui diretamente para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de cimento, um dos materiais mais impactantes ambientalmente na construção civil (Tavares, 2023).

A composição básica do RCC inclui resíduos de tijolos, argamassa, fragmentos de concreto, cerâmica de piso e telha. Esses materiais apresentam propriedades distintas, como absorção de água, massa específica, resistência à abrasão e variação na forma das partículas. O processamento dos agregados reciclados ocorre por meio de britagem e peneiramento, visando atingir a granulometria ideal para cada aplicação (Lozovey, 2021).

Além do RCC, outros resíduos têm sido amplamente estudados como agregados na construção civil. Por exemplo, escórias siderúrgicas, como a escória de alto-forno (GBFS), são aplicadas em concretos e pavimentação devido à sua elevada resistência e baixa absorção (Behnood, 2022). No Brasil, estudos têm avaliado também o uso de resíduos de vidro moído como agregado miúdo ou pozolânico em argamassas, melhorando a compacidade e reduzindo a demanda de cimento (Araújo, 2020). Na Europa, a utilização de resíduos de demolição cerâmica como agregado reciclado tem sido empregada principalmente em concretos não estruturais e bases de pavimentação, especialmente em países como Espanha, Portugal, Alemanha e Itália (Bravo, 2021). Esses países possuem políticas públicas e planos nacionais de gestão de RCC que incentivam fortemente a reciclagem e reutilização desses materiais no próprio setor da construção.

Um fator relevante na utilização de agregados reciclados é a sua morfologia, distinta daquela observada nos agregados naturais. Estudos de microscopia indicam que esses materiais apresentam superfície mais irregular, alongada e porosa, o que resulta em uma absorção de água significativamente maior. Essa característica afeta diretamente a trabalhabilidade e o desempenho dos concretos e argamassas produzidos com agregados reciclados. Além disso, tais agregados apresentam massa unitária e densidade inferiores, decorrentes de sua composição química e da presença de poros não acessíveis (Gomes, 2019).

Com o avanço das pesquisas e normatizações, o uso de RCC tem se tornado cada vez mais viável, promovendo benefícios ambientais, econômicos e sociais para o setor da construção civil (Gobbe, 2022). Além disso, reforça o compromisso do setor com a economia circular e o desenvolvimento sustentável, princípios essenciais para atender às diretrizes globais de redução de impacto ambiental na construção.

Segundo Silva (2021), a reciclagem de resíduos de construção civil reduz de maneira expressiva a necessidade de novas áreas para aterros e contribui para o cumprimento de legislações ambientais cada vez mais rigorosas em diferentes países.

Outro benefício ambiental importante está relacionado à diminuição da extração de recursos naturais não renováveis, como areia e brita, preservando os ecossistemas locais e reduzindo o impacto da atividade mineradora, conforme discutido por Behnood (2022) em sua revisão sobre agregados alternativos para concretos. Além disso, estudos como os de Tavares (2023) apontam que o uso de agregados reciclados pode resultar em menor emissão de CO<sub>2</sub> no ciclo produtivo dos concretos e argamassas, pois há redução da demanda por transporte de agregados naturais e menor consumo de energia no processo de extração mineral.

A promoção da economia circular também é uma vantagem ambiental frequentemente citada por autores como Bravo (2021), que destacam que a utilização de RCC como matéria-prima secundária possibilita reintegrar ao processo produtivo resíduos que, de outra forma, seriam descartados, estabelecendo cadeias produtivas mais sustentáveis e alinhadas às diretrizes globais de desenvolvimento sustentável.

Sob a perspectiva econômica, a utilização de agregados reciclados apresenta potencial para reduzir custos na produção de concretos e argamassas. Souza (2023) demonstram que a economia pode chegar a até 30% em determinadas aplicações, especialmente quando há disponibilidade de usinas regionais de reciclagem, diminuindo gastos logísticos relacionados ao transporte de agregados naturais. Além disso, conforme apontado por Gobbe (2022), a redução de custos com destinação de RCC para aterros também representa uma vantagem relevante para construtoras, incorporadoras e empresas públicas.

Por fim, a criação de um mercado regional voltado à reciclagem de RCC promove a geração de empregos diretos e indiretos, além de movimentar a economia local de forma sustentável, como defendido por Mercante (2022) em sua análise sobre os impactos socioeconômicos da reciclagem na construção civil brasileira. Dessa forma, evidencia-se que o uso de agregados reciclados oferece soluções vantajosas e alinhadas aos princípios da sustentabilidade, contribuindo para o avanço tecnológico e ambiental do setor da construção civil.

A NBR 15116 (ABNT, 2021) estabelece requisitos para a utilização de agregados reciclados em concretos e argamassas, incluindo critérios específicos para agregados miúdos. Entre esses requisitos, a norma define que a absorção máxima deve ser

de 12% para Agregado Reciclado de Concreto (ARC) e 17% para Agregado Reciclado Misto (ARM). Além disso, estabelece que o teor de material passante na malha de 75µm deve ser menor que 15% para ARC e menor que 20% para ARM. A composição granulométrica dos agregados reciclados deve estar de acordo com a ABNT NBR 7211, que especifica os requisitos para agregados utilizados em concretos. Caso a granulometria do agregado reciclado não atenda aos requisitos da norma, ela pode ser corrigida por meio da adição de agregados naturais, garantindo melhor desempenho e compatibilidade com as aplicações estruturais.

A norma ainda considera necessária a pré-molhagem dos agregados miúdos, recomendando que seja realizada a 80% do teor de absorção de água do agregado, visando melhorar a trabalhabilidade e reduzir a variação da umidade durante a mistura. Para garantir um melhor controle de qualidade, especifica que os lotes dos agregados devem ser formados de acordo com a classificação (ARM ou ARC), granulometria e compreender a produção dentro do período do mesmo mês, com um volume máximo de 1500 m³ por lote. No caso dos agregados miúdos para concreto não estrutural, determina que para cada lote sejam realizados ensaios de composição granulométrica, teor de material passante na peneira 75µm, absorção de água, torrões de argila e materiais friáveis, composição do agregado gráudo e percentual de materiais não minerais no agregado miúdo. Para determinações de cloretos e sulfatos, a norma sugere que os ensaios sejam realizados apenas uma vez por mês ou a cada 6000 m³, garantindo um controle periódico da qualidade dos materiais. A seguir, no Quadro 01, alguns resíduos que são aplicados no Brasil e no resto do mundo, mostrando algumas vantagens na sua aplicabilidade.

Quadro 01: Tipos de resíduos utilizados como agregados reciclados, aplicações e vantagens

<b>Tipo de Resíduo</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Exemplos de Uso (Brasil e Europa)</b>	<b>Principais Vantagens</b>
<b>Resíduos da Construção Civil (RCC)</b> (tijolos, concreto, argamassa, telhas, cerâmica)	Concretos não estruturais, argamassas, bases de pavimentação, blocos intertravados, pré-moldados	Brasil: pavimentação urbana (São Paulo), blocos de vedação (PE, BA) Europa: pavimentação na Espanha; concretos não estruturais em Portugal e Itália	<input checked="" type="checkbox"/> Redução de extração de areia natural; <input checked="" type="checkbox"/> Menor custo de matéria-prima; <input checked="" type="checkbox"/> Destinação ambientalmente correta; <input checked="" type="checkbox"/> Redução de CO <sub>2</sub> pela menor demanda de transporte e exploração mineral

<b>Tipo de Resíduo</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Exemplos de Uso (Brasil e Europa)</b>	<b>Principais Vantagens</b>
<b>Escória de Alto-Forno (GBFS)</b>	Concretos estruturais e argamassas como agregado ou substituinte de cimento	Brasil: Usina de Tubarão (ES) para cimento e concreto; Europa: Alemanha e Bélgica para cimento blastfurnace	<input checked="" type="checkbox"/> Elevada resistência mecânica; <input checked="" type="checkbox"/> Menor absorção de água; <input checked="" type="checkbox"/> Redução de impacto ambiental na produção de cimento; <input checked="" type="checkbox"/> Aproveitamento de resíduo industrial volumoso
<b>Vidro moído reciclado</b>	Argamassas de revestimento e concretos não estruturais como agregado miúdo ou pó pozzolânico	Brasil: argamassas de revestimento (UFRJ, UFPE); Europa: concretos de pavimentação na Holanda	<input checked="" type="checkbox"/> Melhora a compactidade; <input checked="" type="checkbox"/> Potencial pozzolânico; <input checked="" type="checkbox"/> Redução do consumo de areia natural; <input checked="" type="checkbox"/> Alta disponibilidade do resíduo
<b>Resíduos de demolição cerâmica</b>	Concretos não estruturais, pavimentação, sub-bases de rodovias	Brasil: uso experimental em obras públicas (PR, SP); Europa: Espanha e Portugal em bases e sub-bases rodoviárias	<input checked="" type="checkbox"/> Boa resistência à abrasão; <input checked="" type="checkbox"/> Menor custo de disposição em aterro; <input checked="" type="checkbox"/> Economia no transporte
<b>Cinzas volantes (fly ash)</b>	Substituição parcial de cimento em concretos e argamassas	Brasil: usinas termelétricas (MG, PR); Europa: Reino Unido, Alemanha e Polônia	<input checked="" type="checkbox"/> Redução significativa de CO <sub>2</sub> ; <input checked="" type="checkbox"/> Melhoria na trabalhabilidade e durabilidade; <input checked="" type="checkbox"/> Aproveitamento de resíduo de difícil disposição

Fonte: Clementino (2025)

### 3. ARGAMASSAS

#### 3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A utilização das paredes como estrutura remonta às técnicas construtivas mais antigas do mundo. Evidências arqueológicas indicam que, por volta de 10.000 a.C., civilizações assírias e persas já utilizavam tijolos secos ao sol em suas edificações, criando sistemas simples de vedação e sustentação baseados em adobe moldado manualmente (Cavicchioli, 2017). Em regiões do Egito, Mesopotâmia e Vale do Indo, os tijolos de barro secos ao sol foram amplamente aplicados na construção de templos, residências e palácios, constituindo os primeiros exemplos históricos de alvenaria de terra (Behnood, 2022).

Com o avanço das técnicas construtivas, os primeiros tijolos de barro queimados em fornos surgiram aproximadamente em 3.000 a.C. na Mesopotâmia e se difundiram para o Egito e regiões mediterrâneas, sendo amplamente empregados em diversas culturas ao longo dos séculos. Esses tijolos queimados apresentavam maior resistência mecânica e durabilidade frente a intempéries, possibilitando construções mais altas e duráveis (Cavicchioli, 2017).

Por volta de 2.000 a.C., há registros da utilização de argila crua em construções de taipa e pau-a-pique, envolvendo estruturas resistentes de madeira na Grécia e na arquitetura etrusca na Itália. No período clássico, os gregos desenvolveram sistemas construtivos em pedra calcária e mármore, reservando o uso de argamassa de cal para assentamento de alvenarias e criação de estuques ornamentais (Gomes, 2020). Os romanos, por sua vez, aperfeiçoaram as argamassas ao introduzir a pozolana – cinza vulcânica fina – misturada à cal, originando um cimento natural de alta resistência, utilizado amplamente em aquedutos, banhos termais e na icônica Cúpula do Pantheon em Roma (Bravo, 2021).

Na Idade Média, entre os séculos V e XV, as técnicas de alvenaria de pedra com argamassa de cal permaneceram dominantes na Europa, com destaque para as catedrais góticas francesas, os castelos ingleses e as construções fortificadas italianas. O uso de tijolos cerâmicos queimados voltou a se popularizar nos séculos XIV e XV, especialmente em regiões da Holanda e do norte da Alemanha, onde as limitações de pedra natural impulsionaram a produção de tijolos padronizados em fornos locais (Behnood, 2022).

No Brasil, há registros da utilização de argamassas desde o primeiro século d.C., empregadas no assentamento de alvenaria de pedra pelas populações indígenas costeiras, que utilizavam argila crua e laterita para unir pedras em estruturas básicas (Silva, 2015).

Com a chegada dos colonizadores portugueses no século XVI, consolidou-se o uso de cal obtida por meio da queima de conchas, ostras e mariscos, técnica difundida principalmente no litoral nordestino e sudeste, dada a abundância desses materiais (Gomes, 2020). Na região Norte, estudos como o de Moraes (2023) apontam que populações amazônicas empregavam argamassas à base de argila e fibras vegetais na fixação de elementos de madeira em construções comunitárias e moradias tradicionais ribeirinhas.

Durante o período colonial, as construções de alvenaria de pedra e cal foram amplamente empregadas em igrejas, fortes e casarões, como observado no centro histórico de Salvador e nas igrejas barrocas de Ouro Preto. Na região Norte, especialmente no Pará, o uso de argamassas à base de cal e areia quartzosa foi intensificado no período da economia da borracha, com destaque para edificações históricas de Belém, como o Teatro da Paz e o Forte do Presépio (Barata, 2022). Segundo Barros (2024), a cal utilizada em Belém nesse período era proveniente de conchas coletadas em áreas costeiras e estuarinas, prática também observada em cidades amazônicas como Cametá e Abaetetuba.

No século XIX, o uso de tijolos cerâmicos queimados tornou-se comum em áreas urbanas, inicialmente em Recife, Salvador e Rio de Janeiro, acompanhando a industrialização local e a criação dos primeiros fornos cerâmicos de escala comercial (Lozovey, 2021). Em Belém, a industrialização tardo-colonial e a influência europeia na arquitetura neoclássica e art nouveau intensificaram a utilização de argamassas de cal e areia fina, tanto para assentamento quanto para revestimentos decorativos, como analisado por Oliveira (2022) em seus estudos sobre patrimônios tombados da cidade.

Atualmente, a evolução histórica das paredes como sistemas estruturais reflete a busca contínua por materiais mais duráveis, econômicos e sustentáveis, tema amplamente discutido por Bravo (2021) e Tavares (2023), que apontam a retomada de técnicas tradicionais adaptadas ao contexto moderno, como o uso de solo-cimento, tijolos de solo estabilizado e argamassas ecológicas, visando redução de impacto ambiental e melhoria do desempenho construtivo.

Em Manaus-AM, Lima (2024) analisaram a aplicação de argamassas produzidas com adições minerais de cinza de casca de arroz e resíduo cerâmico moído em obras de habitação popular, observando melhoria significativa de durabilidade e redução de custos. Já em Belém-PA, Sousa (2024) destacam o potencial de reaproveitamento de resíduos de construção civil como agregados em argamassas de assentamento para alvenaria de vedação, promovendo sustentabilidade e redução de impactos no descarte irregular de entulhos na região metropolitana.



### 3.2. DEFINIÇÕES

A definição de argamassa segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023) descreve-a como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, podendo conter aditivos ou adições para melhorar suas propriedades. Além disso, a norma classifica as argamassas de acordo com sua aplicação, incluindo aquelas destinadas ao assentamento de alvenaria de vedação, que têm a função de unir componentes com blocos e tijolos, garantindo a estabilidade e vedação da estrutura.

A argamassa de assentamento desempenha um papel fundamental na garantia do comportamento monolítico e da solidez estrutural da alvenaria, pois é responsável por transmitir as ações atuantes da estrutura para a fundação. As tensões verticais são absorvidas e distribuídas pelas unidades de blocos, permitindo a acomodação das deformações e contribuindo para a estabilidade da construção (Schankoski, 2015).

No estado fresco, as principais propriedades da argamassa incluem consistência, retenção de água, coesão da mistura e exsudação, características essenciais para garantir a trabalhabilidade e a aderência ao substrato. Segundo Souza (2024), a coesão é determinante para manter a homogeneidade da mistura durante o transporte e a aplicação, evitando a segregação dos materiais e assegurando a uniformidade da camada aplicada, o que impacta diretamente a resistência de aderência e a estabilidade dimensional do revestimento ou assentamento. A exsudação, por sua vez, quando excessiva, pode ocasionar o acúmulo de água na superfície ou no fundo da camada aplicada, resultando em redução da aderência, formação de vazios e menor compacidade do material endurecido, como apontado por Nahi (2025) em seus estudos sobre argamassas de alta trabalhabilidade. Além disso, Bravo (2021) enfatizam que a adequada retenção de água no estado fresco permite a hidratação contínua do cimento e melhor adesão ao substrato, fator essencial principalmente em climas quentes e regiões de elevada evaporação superficial, como observado na região Norte do Brasil. Em Belém, por exemplo, Tenório (2025) destacam que argamassas de baixa coesão e alta exsudação têm apresentado problemas de aderência nos assentamentos de alvenaria cerâmica devido à rápida perda de água para os blocos de alta absorção, comprometendo o desempenho estrutural local.

No estado endurecido, aspectos como resistência à compressão, aderência, durabilidade e capacidade de acomodar deformações são determinantes para o desempenho estrutural e a longevidade da alvenaria (Schankoski, 2015). Silva (2023) aponta que a resistência à compressão e a aderência são fundamentais não apenas para suportar as cargas verticais, mas também para garantir o comportamento solidário entre bloco e argamassa,

reduzindo fissuras e patologias estruturais ao longo do tempo. Além disso, a durabilidade das argamassas está diretamente associada à sua microestrutura, porosidade e compacidade, determinando sua resistência à ação de agentes agressivos, como ciclos de umidade e secagem, ataque por sais e processos de carbonatação.

Segundo Behnood (2022), a baixa permeabilidade e a elevada aderência das argamassas contribuem para a longevidade das alvenarias, evitando infiltrações e destacamentos que comprometam a integridade do conjunto construtivo. Complementarmente, Tavares (2023) ressaltam que a capacidade de acomodar deformações, expressa pelo módulo de elasticidade adequado e pela deformabilidade controlada, é essencial para a durabilidade, permitindo que a alvenaria suporte recalques diferenciais e variações térmicas sem apresentar fissuração prematura.

Ainda, estudos recentes de Sonvezzo (2024) demonstram que o equilíbrio entre propriedades no estado fresco, como coesão e retenção de água, e no estado endurecido, como resistência e durabilidade, deve nortear o desenvolvimento de argamassas para assentamento, pois somente dessa forma é possível garantir segurança estrutural e vida útil prolongada para as edificações.

Por fim, Tenorio (2025) reforça que, no contexto da sustentabilidade, a escolha de argamassas que apresentem excelente desempenho no estado fresco e endurecido contribui para a redução de desperdícios na obra, menor necessidade de manutenção corretiva ao longo do tempo e, consequentemente, menor impacto ambiental gerado pelo ciclo de vida do sistema construtivo.

**3.3. PROPRIEDADES**

A seguir, podemos verificar na Tabela 01, os principais parâmetros e resultados esperados segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), nas argamassas de revestimento e assentamento:

Tabela 01: Principais parâmetros e resultados esperados segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023)

Propriedades	Requisito Mínimo / Intervalo	Observações
Consistência (Abatimento)	260mm ± 30mm (Método de Mesa de Consistência)	Para Argamassas Industrializações

Propriedades	Requisito Mínimo / Intervalo	Observações
Retenção de Água	$\geq 75\%$	Importante para evitar segregação e perda de água
Tempo em Aberto	$\geq 2$ horas	Tempo Mínimo em que a argamassa mantém suas propriedades de Trabalho
Resistência à Compressão (28 dias)	$\geq 1,5$ Mpa (Para Argamassas de Uso Geral)	Pode variar conforme aplicação específica
Aderência à Tração na Flexão	$\geq 0,3$ Mpa	Para as argamassas colantes e de revestimentos
Teor de Ar Incorporado	$8\% \pm 3\%$	Demasiado ar reduz resistência, pouco ar reduz trabalhabilidade
Absorção de Água por Capilaridade	Avaliação Qualitativa (Sem Desintegração ou Trincas)	Resistência à Penetração de Água

Fonte: (Clementino, 2025)

### 3.3.1. Trabalhabilidade e Consistência

A trabalhabilidade das argamassas é determinada pela consistência, influenciando diretamente o manuseio e aplicação do material. Essa propriedade no estado fresco define a facilidade com que a argamassa pode ser misturada, transportada, aplicada, consolidada e acabada, garantindo uma distribuição homogênea sobre o substrato. Para cada tipo de aplicação, existe uma consistência ideal, essencial para assegurar a qualidade do revestimento e a durabilidade da estrutura (Gachet, 2020).

A consistência é uma das propriedades mais relevantes, pois a quantidade de água necessária para atingir a trabalhabilidade ideal está diretamente relacionada à vida útil da argamassa. A granulometria do agregado também desempenha um papel crucial, influenciando a trabalhabilidade e a demanda de água pelos aglomerantes no estado fresco (Gachet, 2020). Um agregado bem graduado melhora a trabalhabilidade da mistura, enquanto a adição de cal contribui para maior retenção de água e coesão, reduzindo o risco de fissuras (Becker, 2020).

Além disso, autores como Souza (2023) ressaltam que a trabalhabilidade está diretamente ligada à coesão interna da argamassa, influenciando a aderência ao substrato e a capacidade de preenchimento de juntas e vazios, aspectos fundamentais para o desempenho mecânico e a durabilidade de sistemas de alvenaria e revestimentos. Trabalhabilidade

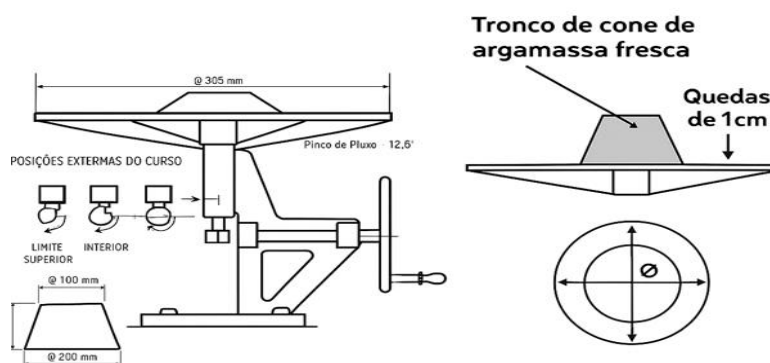
insuficiente pode acarretar falhas na aplicação, enquanto trabalhabilidade excessiva, geralmente resultante do aumento descontrolado do teor de água, pode reduzir a resistência final da argamassa.

Por outro lado, o excesso de água pode provocar exsudação, segregando os componentes e criando regiões enfraquecidas, o que compromete a resistência mecânica e a durabilidade da argamassa devido ao aumento da porosidade. Tenorio (2025) enfatizam que o controle rigoroso da relação água/cimento é indispensável para evitar esses problemas, principalmente em argamassas de assentamento estrutural.

Para avaliar a consistência, utiliza-se o índice de consistência, medido pelo ensaio de mesa de consistência, conforme a NBR 13276. Esse ensaio consiste no preenchimento de um tronco cônico metálico, seguido de golpes com soquete e quedas sucessivas da mesa, permitindo a determinação da média aritmética do diâmetro do espalhamento do material (Becker, 2020). Segundo Tavares (2023), esse ensaio é fundamental para o controle tecnológico de argamassas em obra, garantindo uniformidade nas aplicações e evitando falhas decorrentes de variações no traço ou na umidade dos agregados.

Complementando essas definições, Bravo (2021) discutem que a trabalhabilidade também é impactada pelo tipo de aglomerante utilizado. Em suas pesquisas com argamassas contendo pozolanas ativas e resíduos finos reciclados, verificaram que a incorporação de cinzas de casca de arroz e filer cerâmico pode melhorar a retenção de água e a coesão sem prejudicar a consistência quando as dosagens são devidamente ajustadas. Isso demonstra que materiais alternativos podem ser aplicados com segurança, desde que respeitados os limites técnicos, contribuindo tanto para a sustentabilidade quanto para o desempenho funcional das argamassas.

Figura 02: Equipamento para Medição de Consistência



Fonte: (Alves, 2013)

### 3.3.2. Resistência à Compressão e Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração e à compressão são propriedades bastante enfatizadas quando se trata, de maneira geral, de materiais de construção. Entretanto, nas argamassas, apesar de serem propriedades importantes para classificação, outras características podem ter maior relevância, dependendo de sua aplicação, como ocorre com a aderência e a permeabilidade em argamassas de revestimento, e a trabalhabilidade em argamassas de revestimento e assentamento. A utilização de adições minerais pode melhorar a resistência mecânica e a trabalhabilidade das argamassas, reduzindo a porosidade e aumentando a durabilidade. Além disso, a resistência de aderência à tração em argamassas de revestimento permanece como fator crítico para o desempenho estrutural (Silva, 2025).

Nas argamassas de revestimento, por exemplo, o incremento da resistência mecânica em alguns casos pode ser um fator negativo, podendo indicar um baixo desempenho, tendo em vista a implicação em fissuras. A análise comparativa de propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas mistas e aditivadas reforça a importância de um equilíbrio adequado entre resistência e flexibilidade (Silva, 2025). Souza (2023) corroborou essa visão ao destacarem que argamassas de elevada resistência, mas baixa deformabilidade, tendem a apresentar maior incidência de fissuras de retração, comprometendo a integridade dos revestimentos em médio prazo.

De acordo com os materiais constituintes da argamassa, vale ressaltar que quanto maior o teor de cimento, maior será a resistência à compressão, tração e rigidez. O teor de cimento também provoca um aumento na aderência no estado endurecido, mas diminui sua capacidade de acomodar deformações. A cal fornece à mistura de argamassa o tempo adequado à hidratação necessária do cimento e aumento de plasticidade, já que possui menos vazios devido ao seu efeito filler. A quantidade de água interfere de maneira negativa no desempenho mecânico; quanto maior for a relação água-cimento, menor será a resistência à compressão e à tração das argamassas convencionais mistas. A resistência à compressão e as deformações devido aos esforços são fatores que interferem no desempenho da alvenaria, sendo influenciadas por variáveis como porosidade e teor de cimento (Alves, 2019).

Bravo (2021) analisou argamassas produzidas com adições minerais, como metacaulim e cinzas de casca de arroz, verificando que essas adições, além de melhorarem a resistência à compressão, reduziram significativamente a permeabilidade das argamassas, aumentando sua durabilidade frente à ação de agentes agressivos, especialmente em regiões de alta umidade.

Estudos recentes sobre o comportamento das argamassas de assentamento indicam que o confinamento dessas argamassas na alvenaria gera um estado triaxial de tensões de compressão, diferentemente da análise em corpos-de-prova padronizados, onde o elemento fica submetido apenas a um estado de tensões uniaxial. Essa diferença de comportamento pode impactar significativamente a avaliação da resistência das argamassas em estado de serviço na alvenaria. Tavares (2023) destacou que a interação entre a argamassa de assentamento e o bloco cerâmico influencia não apenas a resistência global do conjunto, mas também a rigidez e a capacidade de redistribuição de tensões ao longo das fiadas.

Nesse contexto, Lima (2024) investigou argamassas de assentamento produzidas com substituição parcial de areia natural por resíduos de construção civil reciclados, como concreto moído e cerâmica vermelha, em Manaus-AM, observando que a resistência à compressão e a aderência das argamassas atenderam plenamente os requisitos normativos, além de apresentarem ganhos em sustentabilidade pela redução do consumo de insumos naturais. De maneira semelhante, Barbosa (2023) analisou argamassas de assentamento contendo resíduos de concreto reciclado em Goiânia-GO, verificando que a substituição de até 30% dos agregados naturais resultou em argamassas com resistência à compressão superiores a 3,5 MPa, atendendo as categorias de uso estrutural não armadas previstas em norma, além de ganhos econômicos de até 10% no custo final da mistura.

No contexto internacional, Zhang (2021) demonstrou que a incorporação de agregados reciclados finos oriundos de concreto demolido em argamassas de assentamento na China resultou em aumentos de até 15% na resistência à compressão inicial, atribuídos ao efeito filler e à boa aderência pasta-agregado reciclado. Já na Espanha, Medina (2022) destacou o uso de argamassas de assentamento produzidas com resíduos cerâmicos moídos em restaurações de alvenarias históricas, garantindo compatibilidade química e redução do impacto ambiental.

As NBR 13281-1 e NBR 13281-2 (ABNT, 2023) estabelecem critérios de classificação das argamassas para assentamento e revestimento com base na resistência à compressão e à tração na flexão. Segundo a norma, as argamassas são classificadas em diferentes categorias conforme seus desempenhos mecânicos. A norma define faixas de resistência para cada tipo de argamassa considerando sua aplicação específica, como por exemplo: argamassas para assentamento são classificadas conforme sua resistência à compressão mínima, garantindo estabilidade estrutural na alvenaria; já argamassas para revestimento são avaliadas pela resistência à tração na flexão, essencial para evitar fissuras e garantir aderência ao substrato. Além disso, a norma estabelece métodos de ensaio para

determinar essas propriedades, garantindo assim maior precisão nas especificações dos materiais.

Behnood (2022) reforçou que, em termos internacionais, as normas europeias também seguem essa abordagem, priorizando propriedades como resistência à flexão, aderência e permeabilidade para argamassas de revestimento, pois estas determinam o desempenho em serviço e a durabilidade frente a ciclos de umidade e secagem. Por fim, Tenorio (2025) ressaltou que a tendência atual no desenvolvimento de argamassas é a formulação de misturas com melhor desempenho multidimensional, ou seja, que conciliem resistência mecânica adequada, aderência, durabilidade e sustentabilidade, incluindo o uso de adições minerais recicladas que reduzam o impacto ambiental sem comprometer o comportamento mecânico e reológico das argamassas aplicadas em campo.

### 3.3.3. Permeabilidade

A permeabilidade das argamassas pode ser definida pela passagem de água no estado endurecido através de infiltração sob pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água. A capacidade de absorver água indica o potencial de um material poroso e não saturado de absorver e drenar a água por capilaridade, sendo uma propriedade diretamente ligada à durabilidade dos materiais cimentícios.

A permeabilidade ocorre pelos poros capilares, mas sua intensidade depende das dimensões, distribuições, forma, tortuosidade e continuidade desses poros. Segundo o American Concrete Institute, a durabilidade é definida como a habilidade de resistir aos ataques químicos, ações climáticas e quaisquer processos de deterioração. Esses processos de deterioração estão associados aos poros existentes na argamassa e seu comportamento na presença de água.

Complementando essa definição, Neville (2011) afirmou que a permeabilidade é uma das propriedades mais críticas em materiais cimentícios, pois controla diretamente a velocidade com que agentes agressivos penetram, promovendo reações deletérias como carbonatação, ataque de cloretos e reações álcali-agregado, reduzindo a vida útil dos sistemas construtivos.

A permeabilidade depende das características individuais da pasta e dos agregados. Na pasta, existem os macro poros de dimensões milimétricas que podem ser formados pelo uso de aditivos incorporadores de ar, falhas no adensamento ou pela adição excessiva de água, que forma poros após sua evaporação. Thomas e Jennings (2019) destacam que o processo de hidratação do cimento forma uma microestrutura complexa,

onde a relação água/cimento e o grau de hidratação determinam o volume e a conectividade dos poros capilares remanescentes, sendo esses poros os principais responsáveis pela permeabilidade final da argamassa.

Sobre os materiais que compõem a argamassa, a granulometria dos agregados pode interferir na permeabilidade. Agregados bem graduados reduzem a permeabilidade. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a presença de partículas finas suficientes para preencher os vazios entre os grãos maiores resulta em uma matriz menos porosa e mais densa, diminuindo o coeficiente de permeabilidade e melhorando a durabilidade global do compósito cimentício.

Quanto ao teor de cimento, a permeabilidade é inversamente proporcional: o aumento no consumo desse material diminui a permeabilidade. Zhang (2021) observou que argamassas com teores mais elevados de cimento apresentaram menor absorção de água e menor coeficiente de permeabilidade, desde que a relação água/cimento fosse mantida baixa, evitando formação de poros conectados. Contudo, os autores alertam para o aumento de retração com maiores teores de cimento, gerando microfissuras que podem elevar a permeabilidade ao longo do tempo.

Argamassas e concretos, no entanto, possuem maior permeabilidade que as pastas, o que pode ser explicado pela presença de microfissuras na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Scrivener (2018) reforçou que essa zona de transição possui maior porosidade devido ao empacotamento inadequado de partículas na interface, sendo a principal via de entrada de agentes agressivos e água.

Um ensaio eficiente para analisar a permeabilidade em revestimentos de paredes é o método do cachimbo, que permite determinar a absorção de água e a permeabilidade do revestimento após aplicação na alvenaria. Embora esse método não seja normalizado no Brasil, ele é amplamente utilizado em pesquisas acadêmicas para avaliar o desempenho de revestimentos argamassados.

Zhang (2022) apontou que métodos *in situ*, como o cachimbo, combinados com ensaios laboratoriais de coeficiente de absorção capilar, permitem uma caracterização mais completa do comportamento hidráulico das argamassas, possibilitando o dimensionamento correto dos revestimentos em função das condições climáticas regionais e do desempenho requerido pela edificação.



### **3.4. MODELOS E MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAR DESEMPENHO DE ARGAMASSAS**

Para análise do desempenho de argamassas, além dos ensaios para avaliar resistência mecânica por meio da ruptura de corpos de prova, é importante que se avalie o comportamento em situações que simulem sua utilização na prática. Para isso, alguns testes são realizados em protótipos que simulam a aplicação das argamassas em suas respectivas utilizações.

Dentre as propriedades das argamassas de revestimento, as que se destacam para avaliar o desempenho são a aderência e a permeabilidade, que indica o grau de proteção da argamassa para o tijolo. Segundo Marques (2023), a aderência é definida como a capacidade da argamassa de resistir ao destacamento do substrato sob ação de cargas externas ou variações térmicas, sendo influenciada pela granulometria do agregado, relação água/agregado e presença de aditivos retentores de água. Além disso, autores destacam que a resistência de aderência à tração está diretamente relacionada à durabilidade do revestimento, especialmente em fachadas sujeitas à exposição prolongada a intempéries.

Para as argamassas de assentamento de blocos, a sua análise deve considerar diversos fatores para validar seu desempenho de forma eficaz. A resistência mecânica é um dos principais critérios avaliados, pois determina a capacidade da argamassa de suportar cargas sem deformação e resistir a esforços de flexão sem fissurar, garantindo a estabilidade estrutural da alvenaria ao longo do tempo. Complementando essa visão, Vieira (2022) reforçou que a resistência à compressão das argamassas de assentamento influencia diretamente a capacidade de carga da alvenaria, enquanto o módulo de elasticidade adequado reduz tensões de retração e fissuração.

Outro aspecto relevante é a trabalhabilidade, caracterizada pela facilidade de aplicação da argamassa, influenciada diretamente pela quantidade de água e aditivos na mistura, permitindo um manuseio mais eficiente e reduzindo a perda excessiva de umidade para os blocos cerâmicos, fator que impacta diretamente na qualidade da fixação. Nunes (2021) observou que argamassas com adição de cal hidratada apresentaram melhor trabalhabilidade, maior retenção de água e maior capacidade de acomodação das unidades de alvenaria, resultando em menor fissuração nas primeiras idades.

Por fim, a permeabilidade da argamassa é um elemento crucial, pois avalia sua capacidade de resistir à infiltração de água e impedir a passagem de umidade através das juntas, garantindo durabilidade e minimizando riscos de deterioração causados pela presença excessiva de umidade. Em estudos recentes, Santos (2024) destacou que argamassas

produzidas com substituição parcial de agregados naturais por resíduos cerâmicos moídos apresentaram redução significativa na permeabilidade devido ao efeito filler das partículas finas, melhorando a compacidade e aumentando a durabilidade frente à ação de agentes agressivos externos.

A inter-relação entre essas propriedades determina o desempenho da argamassa e sua eficácia no assentamento de alvenarias cerâmicas, sendo fundamental para assegurar qualidade e longevidade às edificações. Complementando essa abordagem, Zhang (2023) enfatizou que avaliações integradas de resistência, aderência, permeabilidade e módulo de elasticidade em alvenarias experimentais são fundamentais para o desenvolvimento de traços mais sustentáveis, eficientes e compatíveis com os diferentes tipos de blocos disponíveis no mercado atual.

#### 3.4.1. Modelos para argamassas de assentamento e revestimento

A análise do desempenho de argamassas de assentamento e revestimento por meio da construção de alvenarias experimentais, tem permitido uma avaliação mais realista e integrada das propriedades desses materiais ao longo do tempo. Segundo Mohamad (2025), a utilização de prismas e painéis de alvenaria em escala real tem se mostrado eficaz para investigar o comportamento mecânico das argamassas sob diferentes estados de tensão, revelando correlações entre resistência à compressão, módulo de elasticidade e modo de ruptura.

A avaliação do comportamento das argamassas ao longo de períodos prolongados é essencial para compreender sua resistência em fachadas prediais expostas a intempéries e ambientes agressivos. Nesse contexto, Souza (2020) discutiu a implementação de argamassas estabilizadas na construção civil, destacando sua trabalhabilidade e resistência à umidade. Para possibilitar uma análise de longo prazo, pesquisadores têm utilizado alvenarias externas sustentadas por estruturas de concreto armado, permitindo a observação das variações nas propriedades dos revestimentos ao longo dos anos.

A comparação entre alvenarias externas e internas, como realizada por Dias (2020), possibilita uma avaliação mais precisa dos impactos das condições climáticas na permeabilidade, aderência e resistência dos materiais. Estudos como o de Siqueira (2006) investigou a incorporação de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento, verificando sua influência na durabilidade e resistência mecânica. Além disso, a presença de resíduos de vidro e cinzas de madeira em argamassas sustentáveis, como demonstrado por Fernandes (2025), destacou a viabilidade de materiais alternativos na construção civil.

A diversidade de materiais de revestimento, incluindo argamassas naturais, argamassas com fibras, argamassas com resíduos, texturas, pedriscos e materiais cerâmicos, tem sido amplamente estudada para otimizar a durabilidade e o desempenho das alvenarias. Trabalhos como o de Ceotto, (2005) apresentou recomendações técnicas para a execução e avaliação de revestimentos argamassados, enquanto Pereira Junior (2010) discutiu procedimentos executivos para revestimentos externos em edificações.

Essas pesquisas contribuem significativamente para o avanço do conhecimento sobre argamassas de assentamento e revestimento, permitindo a aplicação de materiais mais eficientes e sustentáveis na construção civil.

### **3.5. ARGAMASSA COM AGREGADOS DE RCC**

Nos últimos anos, diversos estudos têm investigado a utilização de resíduos de construção e demolição como agregados em argamassas, buscando alternativas sustentáveis para a construção civil. A influência do uso desses resíduos em propriedades como resistência mecânica, trabalhabilidade e permeabilidade ainda apresenta divergências entre os pesquisadores. Jochem (2023) analisou argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados provenientes de entulhos da construção civil, substituindo o agregado natural por reciclado em proporções de 30% e 50%. Os resíduos utilizados incluíam tijolos, concreto e argamassa, sendo previamente triturados e peneirados para remoção da fração fina. Para a mistura, foi empregado um aditivo incorporador de ar em substituição à cal, com traço em massa de 1:5,7, variando a quantidade de água conforme a substituição do agregado, utilizando fator a/c de 1,08, 1,32 e 1,38 para as argamassas com 0%, 30% e 50% de substituição, respectivamente. Os resultados indicaram que a alta absorção dos agregados reciclados impactou diretamente na consistência das misturas.

Além disso, Delfino (2022) investigou a aderência e resistência mecânica de argamassas álcali-ativadas contendo RCC's. Os ensaios demonstraram que, no estado fresco, a quantidade de ar incorporado diminuiu com o aumento da substituição por resíduos. No estado endurecido, foram avaliadas a resistência à tração e à compressão aos 7 e 14 dias de cura, verificando-se um aumento nos valores de resistência com a incorporação dos resíduos. Para validar o desempenho da argamassa como revestimento, os pesquisadores aplicaram o material em paredes de tijolos e realizaram testes de arrancamento aos 14 dias de cura, obtendo resultados superiores aos mínimos exigidos pelas normas para uso em ambientes internos e externos.

Araújo (2025) analisou a incorporação de resíduos cerâmicos na produção de argamassas de assentamento, verificando como essa substituição afeta características como resistência mecânica e absorção de água. Os agregados utilizados eram provenientes de peças cerâmicas defeituosas descartadas pela indústria, sendo previamente beneficiados para aplicação em misturas cimentícias. Para as formulações, os pesquisadores adotaram um traço de 1:6 em volume, com 15% de água sobre o volume total, variando a substituição do agregado natural em 20%, 35%, 50%, 70% e 100% em comparação com a referência. Durante a mistura, foram adicionadas quantidades extras de água para manter a consistência das argamassas. Os resultados indicaram uma redução na densidade das argamassas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, evidenciando o impacto da substituição dos agregados naturais por resíduos cerâmicos.

Em relação à resistência mecânica, Oliveira (2024) verificou que a incorporação de resíduos cerâmicos resultou em um aumento significativo na resistência à compressão e tração das argamassas. A durabilidade foi analisada por meio de ensaios de capilaridade, demonstrando que o coeficiente de absorção de água variou pouco com o aumento da substituição, mas todas as misturas contendo material reciclado apresentaram menor permeabilidade do que a referência. Os pesquisadores correlacionaram esses resultados à absorção dos agregados, destacando que a menor quantidade de água efetiva nas misturas resultou em argamassas mais compactas, densas, resistentes e menos permeáveis. Complementando esses achados, Zhang (2021) destacou que a utilização de resíduos de concreto reciclado em argamassas de assentamento também contribui para a redução do consumo de agregados naturais e para a melhoria da resistência mecânica inicial devido ao efeito filler e à formação de ligações adicionais na interface pasta-agregado reciclado. Entretanto, os autores ressaltam a importância do controle granulométrico rigoroso dos resíduos, pois partículas muito finas podem aumentar a demanda de água e prejudicar a trabalhabilidade.

Em estudos realizados na Europa, Pacheco-Torgal e Jalali (2010) revisaram pesquisas sobre o uso de resíduos cerâmicos em argamassas e concretos, concluindo que a substituição parcial do agregado natural por agregados cerâmicos reciclados pode resultar em benefícios tanto ambientais, com a redução de impactos pela menor extração de recursos naturais, quanto técnicos, com melhorias na resistência mecânica e no desempenho térmico dos elementos construtivos. Na Espanha, Medina (2018) analisou argamassas contendo resíduos de telhas e blocos cerâmicos moídos, obtendo aumento de até 20% na resistência à compressão em relação à referência e redução significativa na absorção capilar.

Recentemente, Torres (2023) investigou a durabilidade de argamassas produzidas com agregados reciclados mistos, observando que a permeabilidade aos gases e líquidos foi inferior à das argamassas convencionais, em razão da maior finura dos resíduos reciclados que favoreceram a densificação da matriz. Esse resultado reforça a viabilidade técnica e ambiental da prática, desde que acompanhada de caracterização detalhada dos resíduos e adequação das dosagens para cada aplicação específica.

No Brasil, Fonseca (2023) demonstrou a aplicação de agregados reciclados em argamassas de revestimento para habitação de interesse social em Minas Gerais, com redução de até 18% no custo total da obra e aumento de 12% na geração de empregos locais, devido à necessidade de processos de beneficiamento e triagem dos resíduos. Em São Paulo, Costa (2022) relatou que argamassas produzidas com 50% de RCC foram aplicadas em calçadas ecológicas, reduzindo o consumo de areia natural e minimizando a disposição de entulhos em aterros. Na Região Norte do Brasil, especialmente na Região Metropolitana de Belém, estudos como os de Souza (2024) vêm investigando a viabilidade do uso de resíduos de tijolos e blocos cerâmicos triturados como agregado em argamassas de revestimento para prédios públicos e escolas municipais, obtendo resultados positivos em resistência mecânica e aderência, além de impacto econômico na redução de custos com aquisição de areia natural, que enfrenta escassez regional. Lima e Rodrigues (2023) destacam que o reaproveitamento de RCC em argamassas tem potencial para fomentar cooperativas de catadores e pequenas empresas de beneficiamento, promovendo ganhos sociais por meio da inclusão produtiva e geração de renda local, além de minimizar o despejo clandestino de entulhos que afeta canais urbanos e áreas de várzea na região.

Em nível internacional, Shima (2022) demonstrou no Japão a aplicação de agregados reciclados finos de concreto em argamassas de revestimento para edifícios de pequeno porte, apontando redução de até 15% no consumo de cimento devido ao efeito filler e ganhos ambientais pela diminuição de extração mineral em regiões metropolitanas como Tóquio. Na China, Li (2024) relatou argamassas contendo RCC utilizadas em pavimentos permeáveis urbanos para mitigação de enchentes e ilhas de calor, mostrando ganhos sociais e ambientais, além de redução de custos públicos em manutenção de drenagem. Na Tailândia, Chindaprasirt (2021) aplicou argamassas com resíduos cerâmicos moídos em alvenarias estruturais e fachadas, demonstrando desempenho técnico equivalente aos materiais convencionais e promovendo benefícios econômicos ao setor de pré-fabricados leves. Em Singapura, Lim (2023) implementou argamassas recicladas em projetos de habitação social de alta densidade, obtendo redução de 25% nas emissões de carbono

incorporado por m<sup>2</sup> de fachada e aumento na taxa de reciclagem de resíduos da construção civil local.

Na Dinamarca, Nielsen (2023) relataram o uso de agregados reciclados em argamassas de reparo estrutural em edifícios históricos, promovendo economia circular e redução de custos em reabilitações urbanas. Na Austrália, Collins (2022) aplicaram argamassas com RCC em pré-moldados de fachadas para edifícios comerciais em Sydney, apontando economia de 14% em relação ao uso de materiais convencionais e redução significativa nas emissões de CO<sub>2</sub>. Na Nova Zelândia, Thompson (2023) utilizaram agregados reciclados em argamassas de revestimento para residências sustentáveis, relatando ganhos térmicos e acústicos nos ambientes internos. Nos Estados Unidos, especialmente em cidades como Chicago e Nova York, Miller (2022) destacam o uso de argamassas recicladas em projetos LEED de revitalização urbana, com redução de custos de destinação de resíduos e aumento de pontos para certificação ambiental. Em países muçulmanos, como Emirados Árabes Unidos, Arábia Saudita e Marrocos, Khan (2023) relataram aplicações de RCC em argamassas para blocos de vedação e revestimentos, visando atender metas de sustentabilidade do setor de construção, reduzir importações de areia natural e alinhar-se às diretrizes ambientais dos planos estratégicos nacionais, como o Saudi Vision 2030.

Esses resultados gerais indicam que a incorporação de resíduos de construção civil em argamassas pode ser uma alternativa viável e sustentável, proporcionando melhora na resistência mecânica, redução da permeabilidade e ajuste na trabalhabilidade. Além disso, promovem benefícios econômicos pela redução de custos com matérias-primas, sociais pela geração de empregos diretos no processamento de resíduos e inclusão de cooperativas, e ambientais pela redução da exploração de recursos naturais e do volume de resíduos destinados a aterros, reforçando a viabilidade de soluções construtivas mais sustentáveis para o setor (Martins & Almeida, 2024).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são descritas as variáveis de controle adotadas, bem como os métodos de caracterização dos materiais utilizados e os ensaios utilizados.

### 4.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Foi realizado um planejamento experimental visando atender aos objetivos estabelecidos neste estudo, procurando reproduzir, da forma mais fiel possível, as etapas usuais da execução na construção civil. Assim, foram produzidas, em laboratório, argamassas com diferentes traços e composições, destinadas à função de assentamento. Nessas formulações, o agregado natural usual (areia) foi parcialmente substituído por resíduos provenientes da demolição de alvenarias e também por resíduos cimentícios oriundos de rebocos. Para isso, foi gerado em laboratório o respectivo tipo de resíduo, cuja caracterização está apresentada na Figura 03 a seguir.

Figura 03: Identificação do Resíduo Reciclado Utilizado – (a) Resíduo em obra, (b) Resíduo coletado que será beneficiado, (c) Resíduo beneficiado



Fonte: (Clementino, 2025)

O planejamento de execução das argamassas foi feito considerando um traço com proporção cimento agregado de 1:6 (Cimento: Areia em Massa), em peso, objetivando avaliar o desempenho como argamassa de assentamento. Para a pesquisa, foram estudados

quatro percentuais diferentes de substituição de agregado, 10%, 20%, 30%, e 40%, além da argamassa de referência com 0% de substituição. As siglas referentes às misturas das argamassas estudadas estão descritas na Tabela 02 a seguir.

Tabela 02: Nomenclatura das Argamassas Estudadas

Argamassas de Assentamento - Traço 1:6	
AREF	Argamassa de Referência
A10	10% de Agregados Reciclados de Resíduos de Argamassa
A20	20% de Agregados Reciclados de Resíduos de Argamassa
A30	30% de Agregados Reciclados de Resíduos de Argamassa
A40	40% de Agregados Reciclados de Resíduos de Argamassa

Fonte: (Clementino, 2025)

O fluxograma do procedimento experimental realizado nesta pesquisa está representado na Figura 04 a seguir.

Figura 04: Fluxograma do Planejamento Experimental



Fonte: (Clementino, 2025)



## 4.2. MATERIAIS

As argamassas foram produzidas com cimento, areia natural, areia reciclada proveniente do beneficiamento de resíduos de construção civil e de demolição, água e aditivo.

Para a realização do procedimento experimental, utilizou-se o cimento CII F 32, adquirido no mercado de Belém em sacos de 50kg. Os dados referentes as características do material foram fornecidas pelo fabricante. A análise química, física, mecânica e mineralógica, podem ser analisadas na Tabela 03.

Tabela 03: Características físicas, químicas, mecânicas e mineralógicas do cimento CII F 32.

ENSAIO MECÂNICOS		Norma - NBR 16697	
Teste Mecânicos			
1 dia	MPa	17,29	-
3 dias	MPa	27,21	$\geq 10$
7 dias	MPa	30,48	$\geq 20$
28 dias	MPa	36,61	$\geq 32$
ENSAIO FÍSICOS		Norma - NBR 16697	
Teste Físicos			
Peso Litro (g/l)		NA	
Resíduo de Peneiração (%)	90 $\mu\text{m}$	NA	$\leq 12,0$
	75 $\mu\text{m}$	0,77	
	45 $\mu\text{m}$	9,42	
	32 $\mu\text{m}$	20,42	
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,00	
Sup. Específica de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4497,27	$\geq 2600$
Água na Pasta Normal (%)		26,88	
Tempo de Pega (min)	Início	245,64	$\geq 60$
	Fim	309,00	$\leq 600$
Água na Pasta Normal (%)		-	$\leq 5,0$

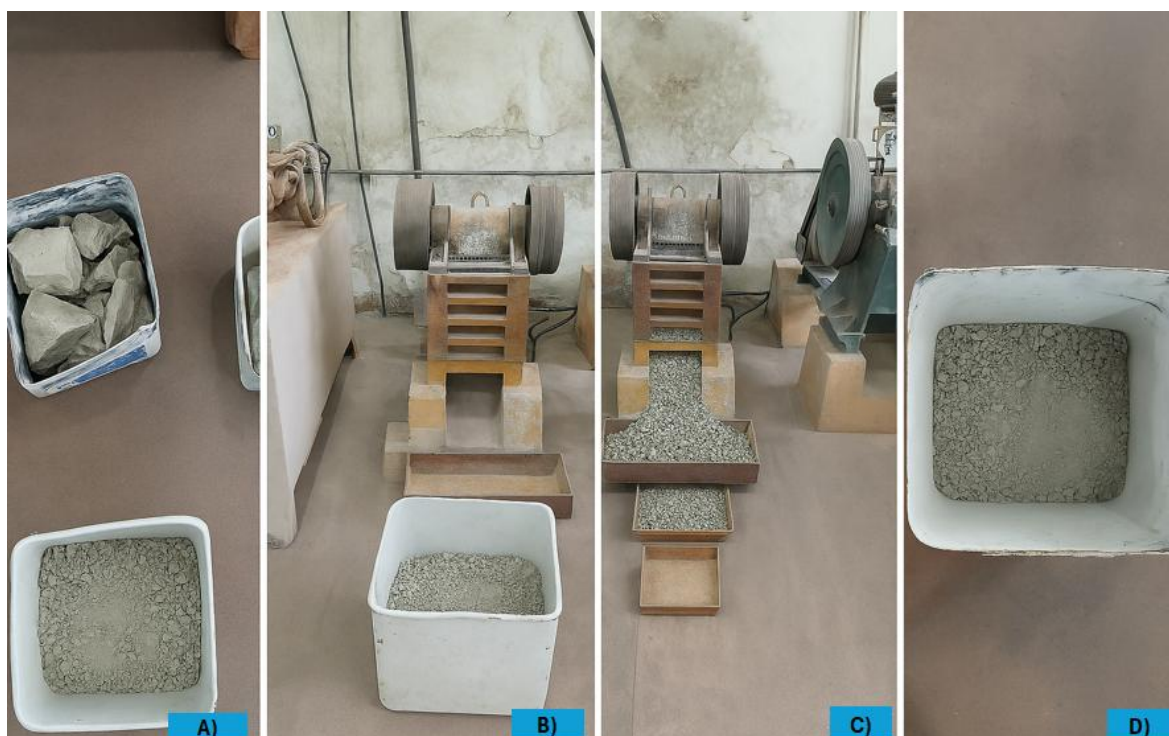
ANÁLISE QUÍMICA				Norma - NBR
Análise Químicas				16697
Perda ao Fogo	%	PF	10,93	$\leq 12,5$
Resíduo Insolúvel	%	RI	3,84	$\leq 7,5$
Óxido de Silício	%	SiO <sub>2</sub>	16,62	
Óxido de Alumínio	%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,27	
Óxido de Ferro	%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5	
Óxido de Cálcio	%	CaO	53,63	
Óxido de Magnésio	%	MgO	5,44	
Sulfatos	%	SO <sub>3</sub>	2,60	$\leq 4,5$
Óxido de Potássio	%	K <sub>2</sub> O	0,98	
Óxido de Sódio	%	Na <sub>2</sub> O	0,25	
Cloretos	%	Cl	0,02	
Anídrico Carbônico	%	CO <sub>2</sub>	10,16	$\leq 11,5$
Cal Livre	%		0,52	
Faturação de Saturação da Cal	%		100,98	
Módulo de Sílica	%		2,46	
Módulo de Alumina	%		1,7	

ANÁLISE MINERALÓGICA				XRD
Silicato Tricálcio	%	C <sub>3</sub> S		44,59
Silicato Bicálcio	%	C <sub>2</sub> S		6,76
Aluminato Tricálcio	%	C <sub>3</sub> A		3,61
Ferro - Aluminato Tretacálcio	%	C <sub>4</sub> AF		6,97

Fonte: (Clementino, 2025)

Para a utilização na confecção das argamassas de assentamento, também foi utilizada uma areia de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Isabel do Pará. O agregado miúdo reciclado é proveniente de entulhos gerados de paredes demolidas (Argamassa de reboco e assentamento de tijolo). Como o processo de beneficiamento do material para apresentar características de uma areia, utilizou-se a britagem, no britador mandíbula, e o peneiramento em um peneirador mecânico. O tempo de britagem por amostra pode variar de 5 a 15 minutos, considerando ajustes na abertura da mandíbula e controle de alimentação. As etapas do processo de beneficiamento são apresentadas na Figura 05.

Figura 05: Processo de beneficiamento da areia reciclada – (a) Resíduo, (b) Britagem no britador Mandíbula, (c) Peneiramento, (d) Resíduo Beneficiado



Fonte: (Clementino, 2025)

Foi realizada a caracterização dos agregados miúdos através dos ensaios realizados no laboratório de materiais de construção na Universidade Federal do Pará (UFPA), os quais estão indicados no Quadro 02.

Quadro 02: Ensaios para caracterização dos índices físicos dos agregados naturais e reciclados

Ensaios	Norma
Determinação da Densidade e a Absorção de Água	NBR 16916 (ABNT, 2021b)
Determinação da Massa Unitária e Índices de Vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Determinação do Teor de Material Pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Determinação da Composição Granulométrica	NBR 17054 (ABNT, 2022)

Fonte: (Clementino, 2025)

A água utilizada na confecção dos substratos das argamassas foi fornecida pela Companhia de Saneamento do Pará. O aditivo utilizado na composição das argamassas produzidas foi o Quimikal MPK 120, onde a massa específica utilizada nas misturas foi de 0,052 %. As características técnicas do aditivo, podem ser analisadas na Tabela 04.

Tabela 04: Características técnicas do aditivo Quimikal MPK 120

Características Técnicas	
Aspecto Físico	Líquido
Cor	Escuro
pH	10,5
Densidade	1,10 g/cm <sup>3</sup>
Composição Básica	Resina natural de pinus Elliotti e resina natural extraída da araucária angustifolia
Sólidos	5% em peso
Solubilidade	Totalmente solúvel em água

Fonte: (Clementino, 2025)

Para análise da alvenaria de vedação, foram utilizados blocos de 6 furos. Vale ressaltar, que os blocos cerâmicos utilizados na alvenaria de vedação, foram caracterizados segundo a NBR 15270-2 (ABNT, 2023), a qual, além de definir termos, os requisitos dimensionais, físicos, e mecânicos exigíveis no recebimento.

## 4.3. MÉTODOS

### 4.3.1. Produção Das Argamassas

Para o preparo da mistura, foram elaborados cinco traços de argamassa para avaliar a influência do resíduo em substituição à areia, sendo: uma de referência (AREF) com 0% de resíduo e outras com os teores 10, 20, 30 e 40% de substituição em relação à massa da areia, levando em consideração a taxa de compensação em virtude da massa específica entre as areias. A notação adotada foi AREF, A10, A20, A30 e A40, que se refere, respectivamente, à argamassa de referência e às argamassas com 10, 20, 30 e 40% de areia

reciclada. A partir de estudo prévio de caracterização do resíduo e da areia, foi adotado o traço unitário em massa de 1:6 (Cimento: Massa em Areia), com fator água/cimento (a/c) fixado em 1,08 para todos os traços, assegurando a uniformidade das condições de consistência e trabalhabilidade durante a preparação das misturas. Na Tabela 05, apresenta-se o consumo de material em kg/m<sup>3</sup>.

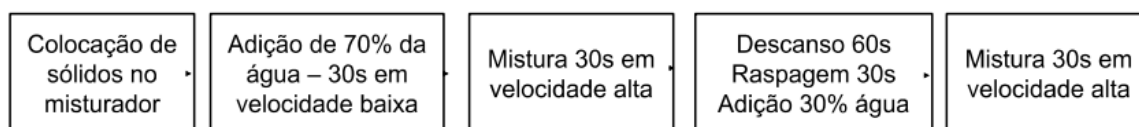
Tabela 05: Consumo de Materiais (kg/m<sup>3</sup>)

Argamassa	MATERIAIS				
	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Resíduo (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (%)	Água (kg/m <sup>3</sup> )
AREF	271	1626	0,00	0,052	292,68
A10	271	1463	155,85	0,052	292,68
A20	271	1301	311,7	0,052	292,68
A30	271	1138	467,55	0,052	292,68
A40	271	976	623,4	0,052	292,68

Fonte: (Clementino, 2025)

Antes da mistura, foi feita uma homogeneização prévia dos sólidos. A mistura foi feita com auxílio da argamassadeira de bancada, de acordo com os procedimentos da NBR 16541 (ABNT, 2016), conforme ilustrado na Figura 06. Os agregados reciclados passaram por um processo de pré-molhagem antes da mistura, por conta da natureza física do agregado reciclado.

Figura 06: Procedimento de mistura adotado para homogeneização das argamassas



Fonte: (Clementino, 2025)

#### 4.3.2. Caracterização das Argamassas

Os ensaios adotados para a caracterização das argamassas no estado fresco foram, o índice de consistência conforme os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016), e estabelecido a determinação da retenção de água nas argamassas, conforme os procedimentos da NBR 13277 (ABNT, 2005). Seguindo a metodologia da NBR 13278 (ABNT, 2005) determinou-se a densidade da massa e o teor de ar incorporado para cada mistura. Essa mistura é um indicador de trabalhabilidade, servindo de parâmetro para

determinar a quantidade de água necessária para a mistura, a fim de que a argamassa alcance trabalhabilidade desejável (ensaio descrito pela NBR 13276 (ABNT, 2016)). Neste trabalho, foi adotada consistência de  $240 \text{ mm} \pm 10$  visando alcançar dessa forma, a trabalhabilidade mínima da argamassa.

Os ensaios foram realizados a fim de obter as variáveis que corroborasse para o entendimento deste estudo, podem ser visualizados seguir no Quadro 03.

Quadro 03: Ensaios realizados durante o estado fresco e endurecido das argamassas

Ensaios	Norma
Determinação do Índice de Consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Argamassa Para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos: Determinação da retenção de água	NBR 13277 (ABNT, 2005)
Densidade da Massa no Estado Fresco	NBR 13278 (ABNT, 2005)
Densidade de Massa no Estado Endurecido	NBR 13280 (ABNT, 2005)
Módulo de Elasticidade Dinâmico	NBR 15630 (ABNT, 2008)
Ensaio de Tração na Flexão e à Compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Absorção de Água por Capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)
Absorção de Água Total, Índice de Vazios e Massa Específica	NBR 9778 (ABNT, 2005)

Fonte: (Clementino, 2025)

De acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) foram moldados corpos de prova com auxílio de formas prismáticas de madeira com medidas de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$  (altura x espessura x comprimento). A argamassa foi colocada nos moldes com auxílio de uma espátula, em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada trinta golpes uniformes feitos através da mesa de consistência. Após o adensamento, foi feito o rasamento do topo dos corpos de prova com uma espátula metálica. Estes permaneceram em temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  em laboratório por 24 horas até a desmoldagem. No total, foram moldados trinta corpos de prova, seis para cada tipo de argamassa. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram submetidos à cura úmida durante 28 dias.

Figura 07: Preenchimento dos moldes com argamassa



Fonte: (Clementino, 2025)

Após os 28 dias, foram realizados ensaios de Densidade da Massa no Estado Endurecido, de módulo de elasticidade dinâmico, de resistência à tração na flexão, resistência a compressão e absorção por imersão e capilaridade. Para cada ensaio foram utilizados três corpos de prova de cada argamassa. A seguir, são apresentados a metodologia utilizada.

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico foi realizado de acordo com o procedimento recomendado pela NBR 15630 (ABNT, 2008), utilizando o equipamento de ultrassom UPV, modelo 58-E48 da marca Controls, com transdutores (receptor e transmissor) de 50 mm de diâmetro e frequência de 54 kHz, com resolução de 0,01  $\mu$ s (Figura 08).

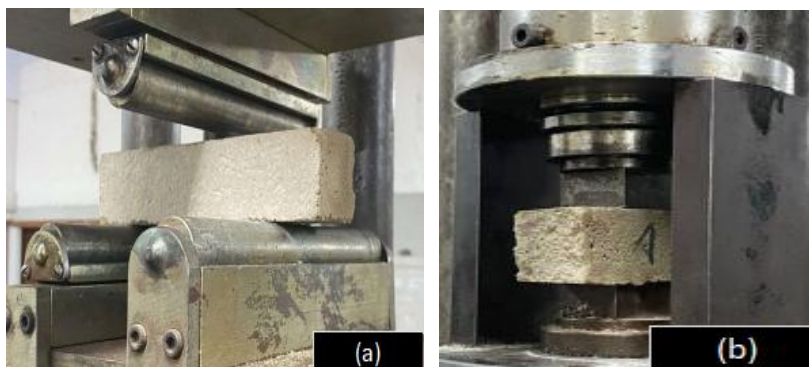
Figura 08: Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas estudadas



Fonte: (Clementino, 2025)

Ensaio mecânicos de compressão e tração na flexão foram realizados nos CP's com idades de 28 dias. Os ensaios de determinação de resistência a compressão e tração na flexão, seguiram as diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005). Os ensaios foram realizados nos CP's de argamassas com a prensa hidráulica elétrica.

Figura 09: Ensaio de tração na flexão nos CP's de argamassa (a): Ensaio de compressão dos CP's de Argamassa (b)



Fonte: (Clementino, 2025)

O ensaio de absorção de água por imersão foi executado segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005). Os corpos de prova foram saturados em água na temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$  por 72 horas. Após a determinação da massa saturada e imersa, os corpos de prova foram secos em estufa a  $105^\circ \text{C}$  por 72 horas.

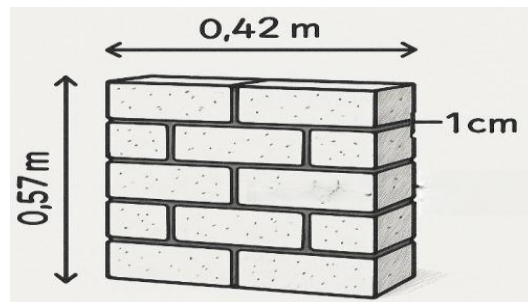
O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado seguindo a NBR 9779 (ABNT, 2012). Para a determinação dessa propriedade, os corpos de prova foram posicionados em um pequeno recipiente preenchido com uma lâmina de água de modo que essa se mantivesse constante a  $5 \pm 1 \text{ mm}$  acima da face inferior, evitando assim, a molhagem de outras superfícies. Durante o ensaio, foi determinada a massa saturada dos corpos de prova em balança analítica com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir da colocação destes em contato com a água e previamente enxugados com um pano úmido.

Para a avaliação de desempenho das argamassas executadas, foram confeccionados cinco mini painéis de alvenaria de tijolos cerâmicos, com dimensões de  $0,42 \times 0,57 \text{ m}^2$ . Para a execução desses painéis, foram utilizados tijolos de alvenaria cerâmica de  $0,14 \times 0,09 \times 0,19 \text{ cm}$ . Quanto à argamassa empregada, cada painel foi produzido com um tipo específico: um deles utilizando a argamassa de referência (AREF), enquanto os demais foram construídos com argamassas recicladas, classificadas como A10, A20, A30 e A40.



Durante a execução, optou-se por juntas de 1 cm, considerando as características da alvenaria cerâmica (Figura 10). Este espaçamento foi escolhido por dois motivos principais: primeiro, a alvenaria cerâmica sofre variações dimensionais devido a fatores como umidade e temperatura, e juntas excessivamente largas podem comprometer a distribuição das tensões, aumentando o risco de fissuras. Em segundo lugar, juntas mais espessas podem dificultar a aderência entre os tijolos e a argamassa, reduzindo a resistência da parede. Por outro lado, juntas mais finas permitem um melhor controle da aplicação da argamassa, minimizando desperdícios e garantindo maior uniformidade na execução dos painéis.

Figura 10: Desenho esquemático demonstrando as dimensões utilizadas nas execuções dos painéis de alvenaria e a espessura das juntas das argamassas



Fonte: (Clementino, 2025)

Figura 11: Mini Painéis Executados para as possíveis análises – (a) Painéis de Alvenaria com Tijolos Cerâmicos Executados, (b) Aplicação da Camada de Chapisco nas superfícies dos Painéis de Alvenaria, (c) Aplicação da Camada de Reboco nas superfícies dos Painéis de Alvenaria



Fonte: (Clementino, 2025)

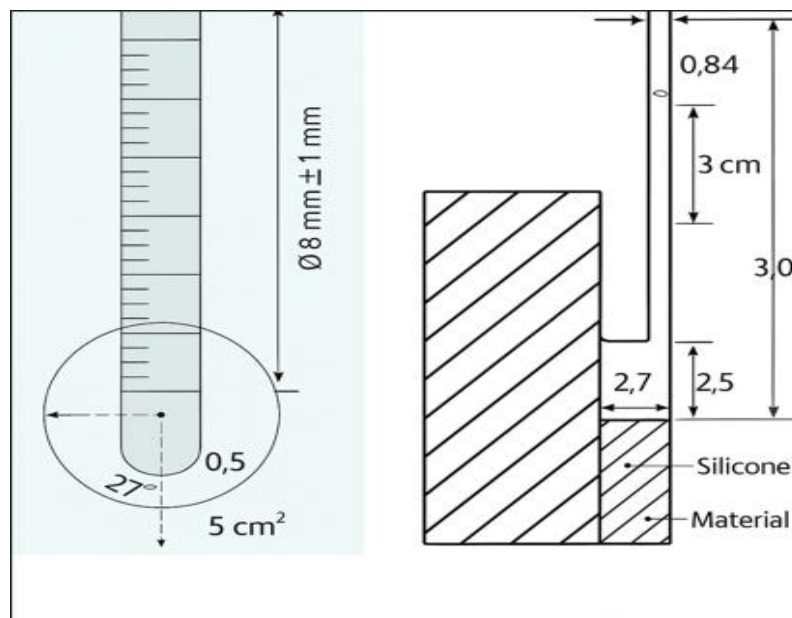
Após a execução dos cinco mini painéis de alvenaria, eles passaram por um período de 28 dias de cura, garantindo que as argamassas das juntas atingissem seu completo endurecimento e alcançassem a resistência final antes da realização do ensaio de permeabilidade.

Completado o período de cura, os painéis foram preparados para o ensaio, iniciando com a limpeza das superfícies, removendo quaisquer resíduos ou contaminantes que pudessem comprometer a precisão dos resultados. Em seguida, para evitar que a água escapasse pelas laterais, as bordas dos painéis foram seladas com um composto de vedação.

Na fase seguinte, foi desenvolvido um sistema de aplicação de pressão, permitindo que uma pressão hidrostática controlada fosse aplicada sobre a superfície dos painéis. Para esta pesquisa, adotou-se o método do cachimbo, utilizando tubos de vidro em formato de "L", uma técnica que possibilitou a medição da quantidade de água infiltrada, indicando a real capacidade de vedação dos materiais analisados.

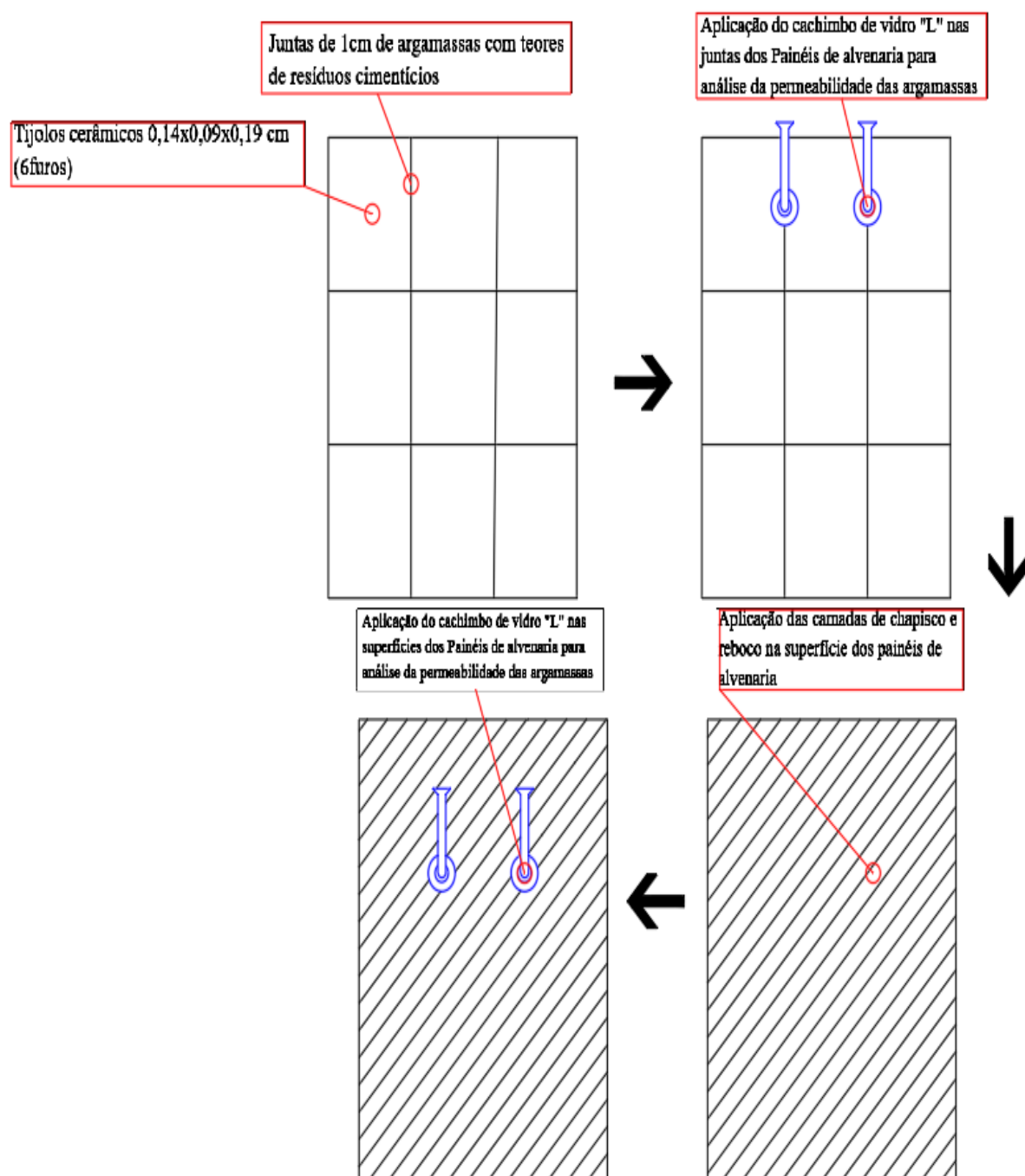
Por fim, foi realizada a análise dos resultados, medindo o fluxo de água e determinando a permeabilidade dos painéis de alvenaria, verificando sua resistência à passagem de água sob pressão e fornecendo dados essenciais para a avaliação da eficiência dos sistemas de vedação.

Figura 12: Desenho esquemático demonstrando a forma de aplicação do cachimbo de vidro



Fonte: (Carvalho, 2022)

Figura 13: Desenho esquemático demonstrando o passo a passo dos procedimentos realizados para a realização do ensaio de permeabilidade nos painéis de alvenaria sem e com revestimentos em suas superfícies.



Fonte: (Clementino, 2025)

Figura 14: Ensaio de Permeabilidade pelo método de cachimbo nas Alvenarias



Fonte: (Clementino, 2025)

Figura 15: Ensaio de Permeabilidade pelo método de cachimbo nos Painéis de Alvenaria já revestidos



Fonte: (Clementino, 2025)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

Na Tabela 06, apresenta-se os resultados de caracterização física dos agregados. Os resultados encontrados de densidade e absorção de água demonstram que o respectivo resíduo possui uma diferença em comparação a areia natural, algo em torno de 3% menor em relação a densidade e 19% em relação a absorção. Vale ressaltar, que o resultado de absorção de água de exatos 9,58% para resíduo reciclado, atende a NBR 15116 (ABNT, 2021), que contempla um limite de 12% para agregados reciclados na utilização em argamassas.

Tabela 06: Resultados encontrados sobre densidade, absorção de água, massa unitária, índice de vazios, teor de material pulverulento dos agregados analisados

Tipo de Agregados	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)	Teor de Material Pulverulento (%)
Natural	2,65	1,85	1495	42,68	1,45
Reciclado	2,54	9,58	1325	47,86	10,61

Fonte:(Clementino, 2025)

A massa unitária do agregado reciclado apresentou um resultado de 11% menor, fato compreensivo, pois a massa unitária dos agregados reciclados tende ser menores do que as dos agregados naturais, devido a sua **maior porosidade** (Agregados reciclados possuem uma estrutura mais porosa, o que reduz sua densidade e, consequentemente, sua massa unitária), **presença de materiais pulverulentos** (Agregados reciclados possuem partículas finas e resíduos de cimento e argamassa, que influenciam sua compactação e reduzem sua massa unitária), **formas irregulares das partículas** (Diferente dos agregados naturais, que possuem uma granulometria mais uniforme e mais arredonda, os reciclados tendem a ter mais formas irregulares, dificultando o empacotamento eficiente e aumentando o índice de vazios), e **menor densidade dos materiais constituintes** (Dependendo a origem do resíduo, os agregados reciclados podem conter materiais menos densos, como cerâmica e o nosso caso, que é a argamassa, que contribuem para a redução da massa unitária). Já no caso do índice de vazios, os agregados reciclados tiveram um resultado de 12% maior em relação ao agregado natural, fato que pode ser justificado, pois os agregados reciclados possuem

partículas mais irregulares e porosas, o que acaba dificultando o empacotamento eficiente e aumenta a quantidade de espaços vazios entre os grãos, além disso, a presença de materiais pulverulentos e resíduos de cimento podem influenciar a distribuição de vazios. O teor de material pulverulento no agregado reciclado foi 7,3 vezes superior ao apresentado pelo agregado natural. Teores de 5% de material fino são considerados ótimos e que esse valor pode chegar até 10% ainda apresentando bons resultados quanto a resistência a aderência, no entanto, é essencial avaliar a distribuição granulométrica e a composição química dos resíduos, pois teores excessivos podem comprometer a trabalhabilidade e aumentar a demanda por água na mistura (Filho, 2020).

Na Tabela 07 e no Figura 16, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de granulometria dos agregados. Percebe-se que a areia natural e areia reciclada apresentam diferentes módulos de finura, enquanto o agregado natural apresenta características de uma areia fina, o agregado reciclado, da maneira que foi beneficiado, apresentou uma granulometria grossa.

Tabela 07: Composição Granulométrica dos Agregados Miúdos Ensaçados

Índice	Agregado Natural	Agregado Reciclado
Módulo de Finura	2,00	3,20
Classificação	Areia Fina	Areia Grossa
Diâmetro Máximo	2,36	4,75

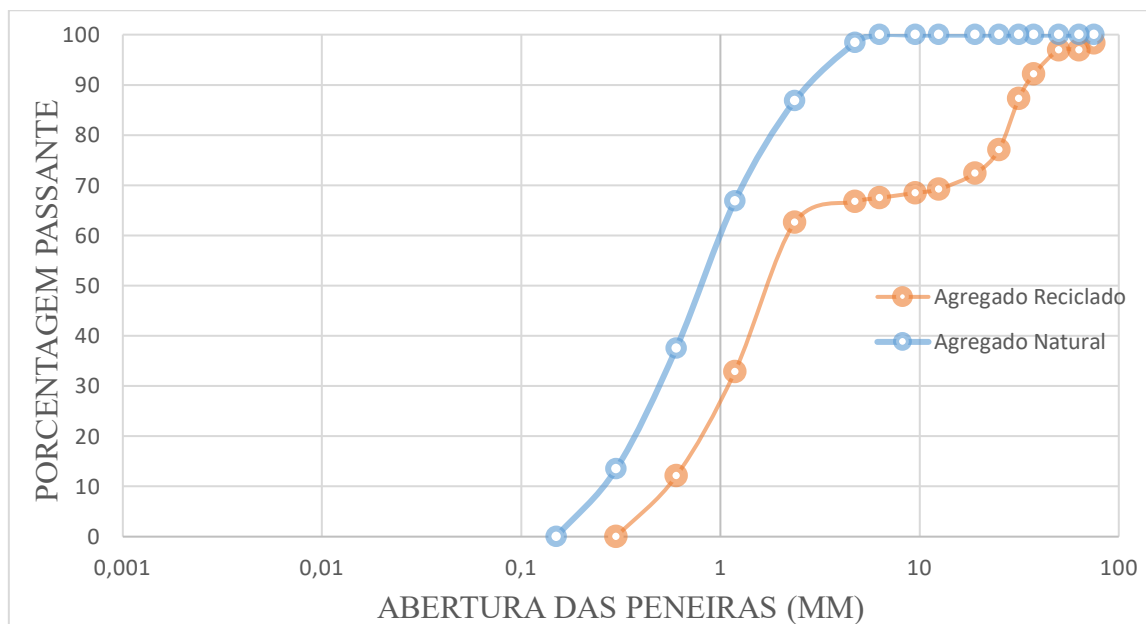
Fonte: (Clementino, 2025)

No que diz respeito as curvas granulométricas, que são uma representação gráfica da granulometria dos agregados, onde constam os limites ótimo e utilizável que os agregados podem atingir. Além disso, os formatos que as curvas podem adquirir as classificam em uniformes, contínuas e abertas sendo os agregados com curva granulométrica contínua são os mais utilizados, pois proporcionam uma distribuição granulométrica mais equilibrada dos grãos, resultando em materiais com **melhor compactação** (Devido a presença de partículas de diferentes tamanhos, este fato permite que os grãos menores preencham os espaços entre os maiores grãos, reduzindo os vazios e aumentando a densidade do material) , **desempenho mecânico** (A Distribuição contínua melhora a ligação entre as partículas, tornando o material mais resistente à compressão e ao desgaste), **menor consumo**

**de cimento** (Como há menores espaços vazios, a necessidade de pasta de cimento para preencher esses espaços é reduzida, tornando a mistura mais eficiente), e **melhor trabalhabilidade** (Materiais com granulometria contínua tendem a ser mais fáceis de aplicar e compactar, facilitando o trabalho dos profissionais da construção).

As curvas granulométricas uniformes e abertas são menos utilizadas, pois, no caso das uniformes, possuem partículas de tamanho semelhante, o que resulta em maior índice de vazios e menor resistência. Já as curvas abertas, por sua vez, apresentam lacunas nas distribuições dos tamanhos dos grãos, fato que pode comprometer a compactação e a estabilidade do material. A Figura 16 apresenta a curva de distribuição granulométrica dos agregados natural e reciclado utilizados nesta dissertação, permitindo visualizar comparativamente o comportamento de cada tipo de agregado em relação à sua distribuição de partículas.

Figura 16: Curva de Distribuição Granulométrica do Agregado Natural e Reciclado Utilizado



Fonte: (Clementino, 2025)

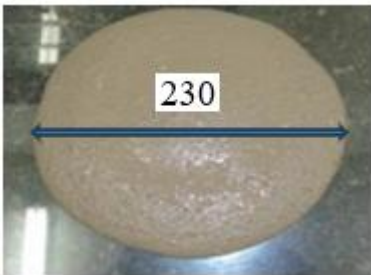
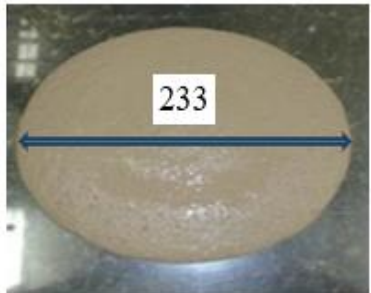
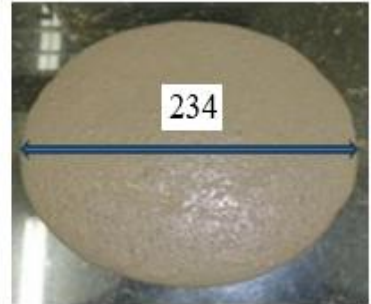


## 5.2. EFEITO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO NAS CARACTERÍSTICAS NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

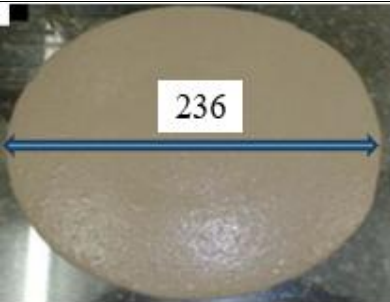
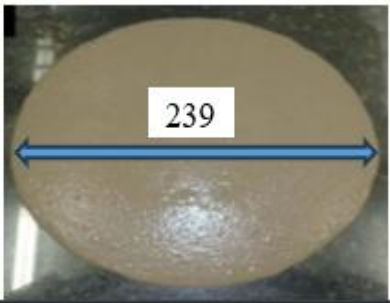
Na Tabela 08, apresenta-se os resultados das argamassas com areia reciclada, percebe-se que com o proporcionamento adequado, é possível produzir argamassas. Conforme esperado, a substituição da areia por material reciclado, leva a uma redução na Densidade das Massas da Argamassas, e Aumento no Teor de Ar Incorporado.

Um fato interessante observado, foi um aumento na retenção de água, à medida que se incorporava resíduo. Apesar do agregado reciclado apresentar maior módulo de finura, há uma tendência de as areias recicladas gerarem finos durante a mistura, esses finos podem ter corroborado para a maior retenção de água.

Tabela 08: Propriedades no estado fresco de argamassa com e sem resíduo

Teor de substituição de Agregado Natural por Agregado Reciclado (%)	Índice de Consistência - Média (mm)	Vista Superior	Retenção de Água (%)	Densidade (kg/cm <sup>3</sup> )	Teor de Ar Incorporado (%)
0% - AREF	230		88,24	1980	11,35
10% - A10	233		89,15	1960	12,38
20% - A20	234		90,15	1920	14,99



Teor de substituição de Agregado Natural por Agregado Reciclado (%)	Índice de Consistência - Média (mm)	Vista Superior	Retenção de Água (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Ar Incorporado (%)
30% - A30	236		91,16	1890	16,25
40% - A40	239		91,36	1850	17,33

Fonte: (Clementino, 2025)

A redução da densidade da massa das argamassas à medida que aumenta o teor de substituição da areia por resíduos cimentícios é um fenômeno amplamente discutido na literatura recente. Estudos como o de Torres (2023) indicam que a incorporação de resíduos reciclados na composição das argamassas resulta em uma diminuição da densidade devido à maior porosidade dos materiais reciclados. No presente estudo, observou-se que a argamassa A40 apresentou uma redução de 15% na densidade em comparação à argamassa de referência (AREF), o que está de acordo com os achados de Balbino (2023), que destacam que agregados reciclados tendem a apresentar menor massa unitária devido à sua estrutura interna mais aberta.

O aumento do teor de ar incorporado nas argamassas com resíduos cimentícios também é um fator relevante. Segundo Carvalho e Eugênio (2016), a presença de partículas finas e irregulares nos resíduos reciclados favorece a retenção de ar na mistura, impactando diretamente na trabalhabilidade e na fluidez da argamassa. Essa característica pode ser explicada pela menor densidade dos agregados reciclados (2,54 g/cm<sup>3</sup>) em comparação à areia natural (2,61 g/cm<sup>3</sup>), conforme observado no presente estudo.

A absorção de água pelos resíduos cimentícios é outro fator que influencia a consistência e a viscosidade das argamassas. Conforme demonstrado por Casali (2020), materiais reciclados apresentam uma maior superfície específica, o que aumenta a interação com a água e contribui para a retenção de umidade. Essa retenção pode modificar a viscosidade da argamassa, tornando-a mais fluida e alterando sua trabalhabilidade. Além disso, a presença de compostos químicos nos resíduos pode afetar a reatividade do cimento, impactando o tempo de pega e a resistência final da mistura.

A maior porosidade das argamassas recicladas também influencia diretamente na redução das cargas estruturais. Segundo Balbino (2023), argamassas menos densas possuem menor massa por unidade de volume, o que pode contribuir para a diminuição da carga total aplicada sobre lajes, vigas e pilares. Essa característica pode ser vantajosa em projetos que buscam otimização estrutural e redução do consumo de materiais.

### 5.3. EFEITO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO NAS CARACTERÍSTICAS NO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

Tabela 09: Propriedades no Estado Endurecido de argamassa com e sem resíduo

Teor de substituição de Agregado Natural por Agregado Reciclado (%)	Densidade de Massa Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência a Tração na Flexão (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)	Absorção Média por Imersão (%)
0% - AREF	1912,37	4,00	15,47	25,00	11,10
10% - A10	1891,43	3,91	14,65	23,00	11,88
20% - A20	1822,96	3,73	13,89	22,00	12,32
30% - A30	1797,45	3,56	13,35	20,00	12,74
40% - A40	1786,7	3,24	12,84	20,00	13,12

Fonte: (Clementino, 2025)

### 5.3.1. Densidade de Massa no Estado Endurecido

Segundo Betioli (2021), essa variação ocorre devido à perda de água por evaporação durante o processo de cura e às reações químicas que resultam na formação de uma estrutura mais porosa. Além disso, a presença de resíduos cimentícios influencia diretamente essa mudança, pois sua granulometria irregular favorece a absorção de água e a interação com os demais componentes da mistura.

Estudos como os de Almeida (2019) indicam que a incorporação de ar durante a mistura e a compactação da argamassa são fatores determinantes na densidade inicial do material. No estado endurecido, a formação da matriz cimentícia e as retrações naturais do processo de cura contribuem para a redução da densidade final, tornando a estrutura mais permeável e menos compacta.

Os resultados obtidos no presente estudo demonstram que, à medida que o teor de resíduos cimentícios aumentou, houve uma redução na densidade da massa no estado endurecido, chegando a 6,4% na argamassa A40 em comparação à argamassa de referência (AREF). Esse comportamento está alinhado com os achados de Torres (2023), que destacam que resíduos cimentícios apresentam maior capacidade de absorção de água, o que impacta diretamente na porosidade da mistura. Além disso, devido à natureza dos resíduos, a eficiência da compactação das misturas foi reduzida, corroborando para uma menor densidade final.

### 5.3.2. Resistência à tração na flexão e à compressão

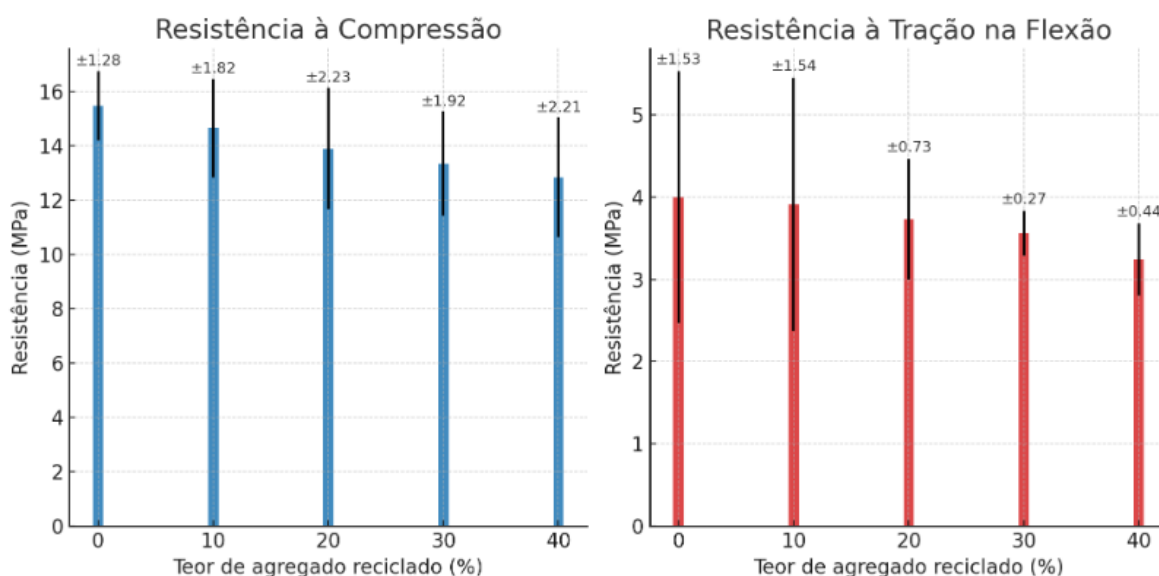
Na Tabela 10 e na Figura 17 são apresentados os resultados de Resistência à Tração na Flexão e à Compressão das argamassas de assentamento com seus respectivos desvios padrões.

Tabela 10: Resultados encontrados de Resistência Mecânica

Resistência à Compressão (MPa)			Resistência à Tração na Flexão (MPa)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
AREF	15,47	1,28	4,00	1,53
A10	14,65	1,82	3,91	1,54
A20	13,90	2,23	3,73	0,73
A30	13,35	1,92	3,56	0,27
A40	12,84	2,21	3,24	0,44

Fonte: (Clementino, 2025)

Figura 17: Gráficos demonstrativos das resistências mecânicas encontradas para as argamassas estudadas



Fonte: (Clementino, 2025)

Os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão demonstraram tendência clara de redução nos valores conforme o aumento do teor de resíduos. Apesar da redução nos valores com o incremento dos resíduos, todos os resultados atendem aos requisitos estabelecidos pela NBR 13281 - Parte 2 (ABNT, 2023), a qual exige valores mínimos de **2 MPa** para compressão e **1 MPa** para tração na flexão para argamassas destinadas ao assentamento de alvenaria de vedação. Portanto, as formulações estudadas demonstram viabilidade técnica para a aplicação proposta.

Corroborando estes achados, estudos recentes como os de Fernandes (2023) e Moura (2022) também observaram reduções graduais na resistência mecânica de argamassas com resíduos de concreto reciclado e metacaulim, respectivamente. Em ambos os casos, a queda nos valores não comprometeu a aplicação em alvenaria de vedação, mantendo os resultados dentro dos limites normativos.

Além disso, Lima (2021) destaca que a incorporação de resíduos cimentícios contribui significativamente para a sustentabilidade da construção civil, reduzindo o impacto ambiental sem prejuízo ao desempenho mecânico, desde que o percentual de substituição seja criteriosamente definido.

Estudos como o de Fonseca (2024) indicam que a incorporação de resíduos reciclados pode comprometer a resistência à tração na flexão devido à maior porosidade e à

menor aderência entre os componentes da mistura. No presente estudo, observou-se que a argamassa com 40% de agregado reciclado apresentou uma redução de 19% na resistência à tração na flexão, o que está alinhado com os achados de Almeida (2024), que destacam que agregados reciclados tendem a apresentar menor coesão estrutural.

A resistência à compressão também foi impactada pelo aumento do teor de agregado reciclado. Segundo Cerqueira (2024), a substituição parcial de agregados naturais por reciclados pode reduzir a resistência à compressão devido à presença de partículas mais irregulares e à menor compactação da matriz cimentícia. No presente estudo, verificou-se que a argamassa com 40% de agregado reciclado apresentou uma redução de 17% na resistência à compressão, o que corrobora os achados de pesquisas recentes que identificaram comportamento semelhante em argamassas com diferentes teores de substituição.

A diminuição da resistência mecânica pode ser explicada pelo aumento da porosidade da mistura, que compromete a estabilidade interna da argamassa e reduz sua capacidade de resistir a esforços mecânicos. Além disso, a zona de transição entre os agregados reciclados e a matriz cimentícia apresentou microfissuras mais espessas, comprometendo a aderência e a resistência do material. Esse efeito foi observado por estudos que analisaram a influência da distribuição granulométrica na compactação da mistura, evidenciando que partículas finas podem tornar a argamassa menos coesa e resistente.

Por fim, a análise estatística ANOVA, considerando o número reduzido de amostras, indicou que, embora tenham sido observadas variações, não foi possível confirmar diferença estatisticamente significativa nos ensaios de tração e compressão entre as argamassas com resíduos e as de referência. Observa-se, contudo, uma tendência de redução de resistência, sugerindo que os resíduos podem influenciar, em algum grau, o comportamento mecânico das argamassas, ainda que não de forma conclusiva.

Tabela 11: ANOVA do efeito do teor de resíduo na resistência à compressão

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor de Resíduos	15,447707	4	3,86193	1,043463	0,43219	3,47805

Fonte: (Clementino, 2025)

Tabela 12: ANOVA do efeito do teor de resíduo na resistência à tração na flexão

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor de Resíduos	1,45336	4	0,36334	0,330065	0,8516	3,47805

Fonte: (Clementino, 2025)

### 5.3.3. Absorção por imersão

Os resultados de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica das argamassas analisadas estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados do ensaio de absorção por imersão

Argamassas	Absorção média por imersão (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica real (kg/m <sup>3</sup> )
AREF	11,10	20,71	2350
A10	11,88	21,15	2300
A20	12,35	21,66	2240
A30	12,74	21,93	2210
A40	13,12	22,05	2170

Fonte: (Clementino, 2025)

Estudos como do Araújo (2024) indicam que a incorporação de resíduos reciclados pode aumentar significativamente o índice de vazios devido à granulometria irregular e à estrutura porosa dos materiais reciclados. No presente estudo, observou-se que a substituição da areia pelo resíduo resultou em um aumento da capacidade de absorção dos índices de vazios, o que está alinhado com os achados de Freitas (2018), que destacam que agregados reciclados tendem a apresentar menor compactação e maior retenção de umidade.

A relação entre porosidade e índice de vazios dos agregados é um fator determinante na estrutura interna das argamassas. Segundo Pereira (2025), a distribuição granulométrica dos resíduos cimentícios influencia diretamente na formação de espaços vazios dentro da matriz cimentícia, tornando a mistura menos compacta e mais permeável. Esse efeito pode ser explicado pela presença de partículas irregulares e de tamanhos variados, que dificultam o empacotamento eficiente dos grãos e aumentam a quantidade de espaços vazios.

Além disso, fatores como compactação da argamassa, absorção de água e trabalhabilidade também impactam a porosidade da mistura. Conforme demonstrado por

Santos (2024), resíduos cimentícios possuem alta capacidade de absorção de água, o que contribui para a formação de poros na estrutura endurecida das argamassas. Esse comportamento pode afetar a consistência da mistura, tornando-a mais fluida e menos coesa, conforme observado por Freitas (2018).

5.3.4. Absorção por capilaridade

Tabela 14: Resultados do ensaio de absorção por capilaridade

Tempo (Horas)	3	6	24	48	72
Absorção por Capilaridade (g/cm²)					
AREF	0,274	0,416	0,784	1,114	1,339
A10	0,288	0,427	0,792	1,198	1,388
A20	0,306	0,448	0,835	1,237	1,453
A30	0,317	0,464	0,864	1,268	1,539
A40	0,351	0,479	0,797	1,161	1,405

Fonte: (Clementino, 2025)

Estudos como os de Melo (2024), indicam que a incorporação de resíduos reciclados pode aumentar significativamente a absorção inicial de água devido à porosidade elevada da matriz cimentícia. No presente estudo, observou-se que a maior diferença na absorção ocorreu nas primeiras três horas de imersão, atingindo 28% para o teor de 40% de substituição, enquanto após 72 horas, a variação foi menor, com um aumento de 15% para o teor de 30%. Esse comportamento está alinhado com os achados de Medeiros (2024), que destacam que a absorção inicial tende a ser mais intensa em materiais com maior teor de resíduos, mas se estabiliza ao longo do tempo.

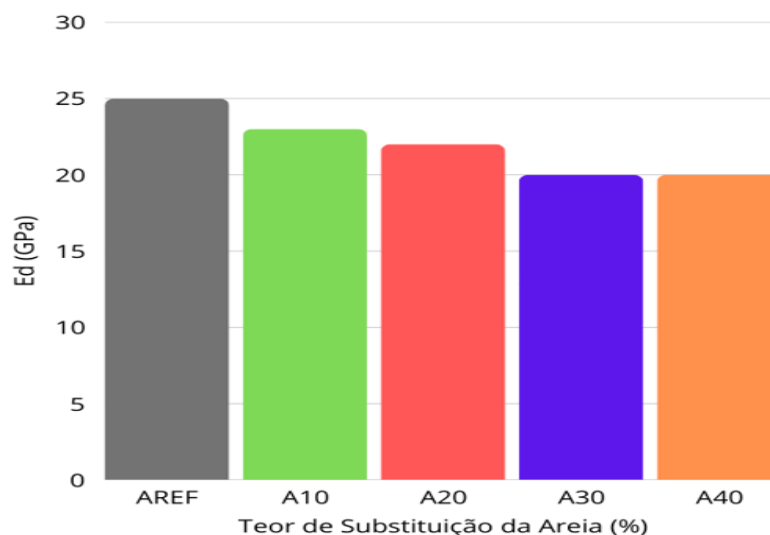
A relação entre porosidade e absorção de água é um fator determinante na estrutura interna das argamassas. Segundo Fernandes (2020), a quantidade de poros interconectados na matriz cimentícia influencia diretamente a taxa de absorção de umidade. Além disso, a composição dos agregados reciclados desempenha um papel fundamental nesse processo, pois resíduos de cimentos hidratados apresentam maior capacidade de retenção de água, conforme observado por Freitas (2018).

Outro aspecto relevante é a influência da rugosidade superficial na absorção de água. Conforme demonstrado por Fioriti (2024), superfícies mais rugosas tendem a reter mais umidade, o que pode impactar a absorção ao longo do tempo. Além disso, fatores ambientais como umidade relativa do ar e temperatura podem afetar significativamente a taxa de absorção de água das argamassas, conforme indicado por Fernandes (2020).

### 5.3.3. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade mede a capacidade das argamassas em absorver deformações e a argamassa de assentamento deve suportar a carga aplicada sem fissurar (Jesus, 2020). O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado aos 28 dias e os resultados são apresentados no Figura 18.

Figura 18: Módulo de Elasticidade Dinâmico ( $E_d$ ) em função do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado aos 28 dias



Fonte: (Clementino, 2025)

A relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a substituição do agregado natural por reciclado é amplamente discutida na literatura recente. Estudos como os de Campelo (2024), indicam que a incorporação de resíduos cimentícios pode reduzir significativamente o módulo de elasticidade devido à alteração da microestrutura da argamassa. No presente estudo, observou-se que as argamassas com 30% e 40% de resíduos apresentaram uma redução de 20% no módulo de elasticidade dinâmico, o que está alinhado com os achados de Negrão (2019), que destacam que agregados reciclados tendem a apresentar menor rigidez estrutural devido à sua granulometria irregular e maior porosidade.



A menor aderência entre os componentes da argamassa também impacta diretamente o módulo de elasticidade. Segundo Pasquali (2019), a zona de transição entre os agregados reciclados e a matriz cimentícia pode apresentar microfissuras mais espessas, comprometendo a capacidade de transferência de tensões. Esse efeito foi observado no presente estudo, evidenciando que a substituição parcial do agregado natural pode enfraquecer a coesão da mistura.

Outro fator relevante é a absorção de água, que influencia negativamente a hidratação do cimento e a formação da estrutura interna da argamassa. Conforme demonstrado por Campelo (2024), materiais reciclados possuem alta capacidade de absorção de água, o que pode comprometer a compactação da mistura e reduzir sua resistência. Além disso, a presença de partículas pulverulentas afeta a distribuição granulométrica, tornando a argamassa menos coesa e impactando diretamente seu módulo de elasticidade.

Para interpretar esses resultados, foram considerados os modelos de previsão do módulo de elasticidade dinâmico apresentados na tabela 15 a seguir:

Tabela 15: Modelos de previsão de módulo de elasticidade dinâmico

Origem / Referência	Equação	Unidade	Observações
Modelo tipo ACI adaptado	$(E_d = k \cdot \sqrt{f_c})$	MPa	Modelo empírico em função da resistência à compressão; (k) entre 3000 e 4500
Modelo tipo potência	$(E_d = \alpha \cdot f_c^\beta)$	MPa	Correlação em forma de potência; ( $\alpha$ ) entre 2000 e 4000, ( $\beta$ ) entre 0,4 e 0,6
ASTM C597 (Ultrassom)	$(E_d = \rho \cdot V^2)$	MPa	A partir da velocidade da onda ((V)) e da densidade (( $\rho$ )) da argamassa
Correlações com ( $f_{tf}$ )	$(E_d = m \cdot f_{tf} + c)$	MPa	Correlação linear com a resistência à tração na flexão (( $f_{tf}$ ))

Fonte: (Clementino, 2025)

A aplicação desses modelos permite estimar o módulo de elasticidade dinâmico a partir de propriedades mecânicas e físicas da argamassa. A redução observada nas amostras com maior teor de substituição pode ser explicada por uma diminuição de  $f_c$  e  $f_{tf}$ , além de alterações na densidade e velocidade de propagação de ondas, conforme os modelos teóricos adotados.

#### 5.4. CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS SEGUNDO A NBR 13281-2 (ABNT, 2023)

A NBR 13281-2 (ABNT, 2023) estabelece requisitos, critérios e métodos de ensaios para argamassas inorgânicas destinadas ao assentamento de unidades de alvenaria (blocos e tijolos), tanto com função estrutural quanto para vedação. Além disso, a norma também abrange argamassas para fixação horizontal (encunhamento) da alvenaria sem função estrutural. A norma apresenta classificação para as propriedades: Retenção de Água, Teor de Ar Incorporado, Densidade de Massa no Estado Fresco e Resistência a Compressão. Na tabela 16 apresenta a classificação das argamassas estudadas de acordo com os critérios da NBR 13281-2 (ABNT, 2023) para os ensaios realizados.

Tabela 16: Classificação das Argamassa segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023)

Requisitos		Argamassas Estudadas				
		AREF	A10	A20	A30	A40
Retenção de Água (U)	Classe	AAV	AAV	AAV	AAV	AAV
	Valor de Referência	$\geq 85$	$\geq 85$	$\geq 85$	$\geq 85$	$\geq 85$
	Clementino 2025	88	89	90	91	91
	Classe	AAV	AAV	AAV	AAV	AAV
Teor de Ar Incorporado (A)	Valor de Referência	$\leq 22$	$\leq 22$	$\leq 22$	$\leq 22$	$\leq 22$
	Clementino 2025	11%	12%	15%	16%	17%
	Classe	DF3	DF3	DF3	DF3	DF3
Densidade da Massa no Estado Fresco (DF)	Valor de Referência	$1800 \leq DF < 2000$	$1800 \leq DF < 2000$	$1800 \leq DF < 2000$	$1800 \leq DF < 2000$	$1800 \leq DF < 2000$
	Clementino 2025	1980	1960	1920	1890	1850

Requisitos		Argamassas Estudadas				
		AREF	A10	A20	A30	A40
Resistência à Compressão (fa)	Classe	AAV	AAV	AAV	AAV	AAV
	Valor de Referência	$2 \leq fa \leq 5$	$2 \leq fa \leq 5$	$2 \leq fa \leq 5$	$2 \leq fa \leq 5$	$2 \leq fa \leq 5$
	Clementino 2025	15,5	14,6	13,9	13,3	12,9

Fonte: (Clementino, 2025)

Como pode ser observado, as argamassas com teor de substituição se igualam da argamassa de referência em todos os critérios previstos para argamassas inorgânicas para assentamento e fixação, foi possível notar que a argamassa de referência apresenta um resultado mais elevado ( $1980 \text{ kg/m}^3$ ), tal fato pode ser justificado pois a densidade da massa no estado fresco das argamassas sem resíduos cimentícios tendem a ser maior porque elas contêm apenas areia natural, que geralmente possui uma massa específica mais elevada do que os resíduos cimentícios, além disso, as argamassas com resíduos apresentam partículas mais porosas, o que aumenta a quantidade de ar retido na mistura e reduz a densidade.

Vale ressaltar também, que os resíduos cimentícios apresentam uma maior capacidade de absorção de água, o que influencia a distribuição dos componentes e reduz a densidade da argamassa fresca. Por fim, quando nós temos a presença de resíduos cimentícios, acaba ocorrendo uma alteração na estrutura internada da argamassa, tornando-a menos compacta, e conseqüentemente reduzindo a densidade.

Em termos de resistência, as argamassas estudadas não atenderam os parâmetros para uma alvenaria de vedação. Uma vez que todos os valores foram superiores a 5 Mpa. Para as misturas desenvolvidas, trabalhou-se com um traço de 1:6, imaginando-se que os altos teores de resíduos, promove pontos de fragilidade entre a interação pasta e agregado.

Um fato interessante a se destacar, é que os dados de características físico mecânicas demonstraram que a mesma argamassa poderia se enquadrar nas classes de uso AAE5, AAE8 e AAE12.

## 5.5. ENSAIO DE PERMEABILIDADE PELO MÉTODO DE CACHIMBO

A grande problemática de agregados de construção civil em matrizes cimentícias é a elevada capacidade de absorção. Por conta disso, avaliou-se o comportamento das argamassas em painéis, os resultados podem ser visualizados na tabela 17.

Tabela 17: Resultados encontrados de Permeabilidade em cada um dos painéis

Painéis Sem Revestimento em sua superfície		Painéis Com Revestimento em sua superfície	
Tipo Painéis	Permeabilidade (ml/min)	Tipo Painéis	Permeabilidade (ml/min)
Painel - AREF	0,04	Painel - AREF	0,00
Painel - A10	0,06	Painel - A10	0,01
Painel - A20	0,06	Painel - A20	0,00
Painel - A30	0,08	Painel - A30	0,01
Painel - A40	0,10	Painel - A40	0,03

Fonte: (Clementino, 2025)

Nota-se que à medida que se aumenta o teor de resíduos, mais permeável ele fica. Contudo, em um sistema com proteção com revestimento, os valores permeabilidades são mais baixos.

Estudos como Melo (2024), indicam que a substituição de agregados naturais por reciclados pode aumentar significativamente a permeabilidade devido à estrutura porosa dos resíduos incorporados. No presente estudo, observou-se que o aumento do teor de resíduos cimentícios resultou em uma maior passagem de água através da argamassa, o que está alinhado com os achados de Fernandes (2025), que destacam que agregados reciclados tendem a apresentar granulometria menos uniforme, dificultando a compactação e aumentando a distribuição de poros.

A presença de fissuras superficiais nas argamassas com maior teor de resíduos cimentícios também foi identificada como um fator relevante para o aumento da permeabilidade. Segundo Nascimento (2023), resíduos cimentícios apresentam partículas finas que influenciam a retração da argamassa durante o processo de cura, favorecendo o

surgimento de fissuras. Esse comportamento compromete a coesão dos materiais, tornando as argamassas mais vulneráveis à absorção de umidade e agravando o processo de infiltração de água.

Outro aspecto importante é a influência das reações químicas na retenção de água das argamassas. Conforme demonstrado por Fernandes (2025), a natureza dos resíduos cimentícios pode favorecer reações químicas que alteram a capacidade de retenção de água, tornando a matriz cimentícia mais permeável. Além disso, a granulometria irregular dos resíduos impacta diretamente a distribuição dos poros e a absorção de água, conforme observado no presente estudo.

Para minimizar os efeitos negativos da permeabilidade e das fissuras, foram aplicadas técnicas de revestimento, como chapisco e reboco, que demonstraram ser eficazes na redução da absorção de água e na melhoria da resistência mecânica. Segundo Oliveira (2019), o uso de aditivos impermeabilizantes, como o SIKA 01, pode contribuir significativamente para a redução da absorção de umidade e para a proteção da superfície contra infiltrações.

Figura 19: Aparecimento de Microfissuras nas juntas nos painéis de alvenaria executados



Fonte: (Clementino, 2025)

A redução da permeabilidade dos painéis de alvenaria ao longo do período de análise confirma a eficácia das técnicas de revestimento na minimização da absorção de água, conforme apontado por Santos (2023) em sua análise sobre métodos de impermeabilização na construção civil. No presente estudo, verificou-se que, apesar da queda na permeabilidade, alguns painéis, como A10, A30 e A40, ainda apresentaram

pequenos índices de umidade. Esse fenômeno pode ser atribuído a fatores como rachaduras e microfissuras no reboco, que podem ter permitido a passagem da umidade, porosidade da alvenaria utilizada, influenciando a absorção de água, e execução e qualidade dos materiais, que impactam diretamente na eficiência da impermeabilização.

Embora chapisco e reboco sejam camadas protetivas essenciais, não garantem impermeabilidade total. Segundo Santos (2023), a qualidade dos materiais e a correta aplicação são determinantes para o desempenho da impermeabilização. Além disso, pesquisas recentes indicam que a natureza porosa da alvenaria pode comprometer a proteção contra infiltrações, exigindo técnicas complementares, como o uso de aditivos impermeabilizantes, para otimizar a barreira contra umidade.

Por fim, a análise estatística ANOVA, considerando o número reduzido de amostras, não indicou diferença significativa entre as misturas analisadas e a referência, sugerindo que, apesar das variações observadas, o impacto estrutural pode ser limitado. Dessa forma, os resultados obtidos apontam em conformidade com a literatura recente, indicando que a impermeabilização da alvenaria depende de múltiplos fatores, incluindo qualidade dos materiais, técnicas de aplicação e características da alvenaria.

Tabela 18: Análise estatística de Permeabilidade em Mini Paredes sem revestimentos

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor de Resíduos	0,0104	4	0,0026	6,0465116	0,00234	2,86608

Fonte: (Clementino, 2025)

Tabela 19: Análise estatística de Permeabilidade em Mini Paredes com revestimentos

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor de Resíduos	0,003	4	0,00075	0,83333	0,51986	2,86608

Fonte: (Clementino, 2025)

Os resultados apontam que em um sistema sem argamassa de revestimento, o teor de resíduos influencia significativamente na permeabilidade do sistema. Já nas condições com argamassa de revestimento, este comportamento não tem influência significativa.

## 5.6. ANÁLISE QUALITATIVA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E DO CUSTO DAS ARGAMASSAS COM E SEM RESÍDUOS

A fim de realizar uma análise qualitativa do impacto ambiental das argamassas com e sem resíduos, coletou-se dados de emissões de CO<sub>2</sub> dos materiais na ferramenta SIDAC e dados de custo utilizando a ferramenta SINAP, e aplicou-se as informações para análise dos painéis.

A crescente demanda por soluções sustentáveis na construção civil tem impulsionado o desenvolvimento de materiais com menor impacto ambiental e melhor desempenho econômico. Neste contexto, foi realizada uma análise comparativa entre argamassas convencionais e aquelas com diferentes teores de resíduos, considerando dois aspectos fundamentais: emissões de CO<sub>2</sub> e custo de execução por metro cúbico.

Os dados obtidos por meio da ferramenta SIDAC indicaram que a argamassa de referência (AREF) apresentou uma emissão de 257 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Já as argamassas com resíduos apresentaram reduções graduais, com os seguintes valores na tabela 20 a seguir.

Tabela 20: Análise qualitativa dos impactos ambientais oriundos da emissão de CO<sub>2</sub> na fabricação das argamassas com resíduos

Argamassas	Emissões Totais de CO <sub>2</sub>
A10	255 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
A20	253 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
A30	252 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
A40	250 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

Fonte: (Clementino, 2025)

Embora as diferenças sejam sutis (cerca de 2,7% de redução no melhor cenário), observa-se uma tendência consistente de redução das emissões à medida que se aumenta o teor de resíduos. Segundo Fontolan (2024), a substituição de agregados naturais por reciclados pode reduzir as emissões associadas à produção em até 8,15%, reforçando a viabilidade ambiental dessa prática. Além disso, Rocha (2022) destaca que a carbonatação natural das argamassas com resíduos pode atuar como medida compensatória no ciclo de vida, contribuindo para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

Já a análise de custos, com base na ferramenta SINAP, revelou que a argamassa de referência possui um custo de R\$ 322,49/m<sup>3</sup>. As argamassas com resíduos apresentaram os seguintes valores.

Tabela 21: Análise qualitativa do custo na fabricação das argamassas com resíduos

Argamassas	Custo (R\$/m <sup>3</sup> )
A10	318,42
A20	314,37
A30	310,29
A40	306,24

Fonte: (Clementino, 2025)

Esses dados evidenciam uma redução progressiva de custos, totalizando uma economia de R\$ 16,25/m<sup>3</sup> no cenário com maior teor de resíduos (A40). Essa tendência está alinhada com os apontamentos de Canedo (2011), que observaram ganhos econômicos significativos com o reaproveitamento de resíduos em argamassas de assentamento, especialmente quando o beneficiamento é realizado na própria obra.

A análise conjunta dos dados ambientais e econômicos permite concluir que a incorporação de resíduos em argamassas representa uma estratégia viável e promissora para a construção civil. Embora as reduções nas emissões de CO<sub>2</sub> sejam modestas em termos absolutos, seu impacto se amplifica em larga escala, especialmente em empreendimentos de grande porte. Do ponto de vista econômico, a redução de custos por metro cúbico reforça a atratividade da solução, contribuindo para a racionalização de recursos e a competitividade do setor.

Além disso, autores como Santoro e Kripka (2016) enfatizam que o cimento é responsável por até 8% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, o que torna qualquer redução significativa em sua utilização de forma direta ou indireta, enfim, um avanço relevante para a sustentabilidade.



## 6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa apresentou um estudo sobre a utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de argamassas, avaliando-se as propriedades dos agregados, as propriedades da argamassa nos estados fresco e endurecido. As conclusões são:

- a) Os agregados reciclados possuem propriedades distintas dos agregados naturais, principalmente em relação à densidade, porosidade, índice de vazios e granulometria. No entanto, atendem às normas técnicas e apresentam potencial de aplicação em argamassas de assentamento, desde que sejam devidamente beneficiados e ajustados conforme as exigências de desempenho mecânico e durabilidade;
- b) A substituição da areia por resíduo reciclado impacta diretamente nas propriedades físicas da argamassa, tornando-se mais leve, mais porosa e com maior retenção de água. Esses fatores podem ter vantagens em determinados contextos construtivos, como a redução do peso estrutural e a possibilidade de ajuste na trabalhabilidade. No entanto, é essencial realizar um controle rigoroso na composição dos resíduos e na distribuição granulométrica para garantir que as alterações não comprometam a qualidade do material;
- c) Os resíduos cimentícios influenciaram a densidade e a resistência das argamassas, principalmente à porosidade elevada e alterações na granulometria. No entanto, a análise estatística ANOVA, indica que, no contexto dos ensaios mecânicos realizados, não houve impacto significativo na resistência final. Dessa forma, a incorporação de resíduos pode ser viável, desde que haja um controle adequado para minimizar efeitos adversos na compactação e porosidade da mistura;
- d) Os resultados indicam que o uso de resíduos cimentícios na argamassa modifica sua estrutura interna, aumentando a porosidade e a absorção de água, principalmente nas fases iniciais de contato com líquidos. A retenção de umidade pode ser vantajosa em alguns casos, mas exige atenção para não comprometer a durabilidade e a resistência do material. Assim, um controle adequado da granulometria e dos processos de compactação, pode ajudar a otimizar a performance da mistura;
- e) A substituição do agregado natural por reciclado impactou o comportamento mecânico da argamassa, reduzindo sua rigidez e capacidade de transferência

de tensões. Apesar das vantagens ambientais, é essencial realizar ajustes na composição e controle da granulometria, para minimizar os efeitos negativos na resistência do material;

- f) A substituição parcial da areia por resíduos cimentícios fez com que não fossem favoráveis os dados para encontrados para alvenaria de vedação, ultrapassando assim, os limites estabelecidos pela NBR 13281-2 (ABNT, 2023).
- g) Os resíduos cimentícios aumentaram a permeabilidade das argamassas devido à estrutura mais porosa, formação de fissuras e distribuição irregular dos agregados. No entanto, a aplicação de técnicas de revestimento demonstrou ser eficaz na redução da absorção de água. Apesar disso, fatores como rachaduras no reboco, porosidade da alvenaria e qualidade dos materiais ainda podem influenciar a taxa de infiltração. Dessa forma, o controle adequado dos resíduos e o uso de revestimentos são essenciais para garantir um desempenho satisfatório.
- h) Em relação à permeabilidade à água, o aumento de teores de substituição fez com que tivesse um aumento da umidade, fato de certa forma até esperado devido à natureza do resíduo. Os valores de permeabilidade à água foram considerados baixos, ou seja, não apresentaram variação considerável nos resultados comparados com a de referência, principalmente avaliando a absorção final, o que se considera positivo. Destaca-se que seria interessante avaliar essas propriedades considerando variações de posição em relação à exposição a intempéries, do período do ano e de substrato para um melhor entendimento de seu comportamento.
- i) A incorporação de resíduos na composição de argamassas revelou uma tendência positiva e consistente sob os pontos de vista ambiental e econômico. Observou-se uma redução gradual, embora modesta, nas emissões de CO<sub>2</sub>, o que sugere que o uso de resíduos pode contribuir para a mitigação dos impactos ambientais associados à construção civil. Essa possível diminuição, por menor que pareça individualmente, pode ganhar relevância em larga escala, especialmente em obras de grande porte, onde o uso cumulativo desses materiais tende a resultar em benefícios ambientais significativos.

- j) Do ponto de vista econômico, os dados apontam uma tendência de redução progressiva no custo por metro cúbico à medida que o teor de resíduos foi aumentado, indicando que essa abordagem pode representar não apenas uma alternativa sustentável, mas também uma opção financeiramente mais competitiva. Essa possível dualidade de ganhos, tanto ambiental quanto financeiro, sugere a viabilidade da solução, embora sejam recomendadas análises adicionais para confirmação.

## **6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Sobre o desempenho das argamassas de assentamento, sugere-se que o ensaio seja repetido utilizando blocos de alvenaria estrutural ao invés de vedação, para analisar a aplicabilidade do material;
- Ainda sobre o desempenho das argamassas de assentamento, sugere-se que seja analisada a aderência entre os blocos;
- Sobre a utilização de resíduos em argamassas de uma maneira geral, sugere-se que sejam analisados outros fatores além das propriedades do material como a viabilidade econômica, métodos de produção e aplicação que se adequem à rotina de um canteiro de obras;
- Estudar quais parâmetros dever ser utilizados para melhor controle de fissuração de argamassas, uma vez que isso impacta em seu desempenho físico e mecânico, além da questão da durabilidade;
- Realizar mais ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e de densidade de massa no estado endurecido para compreender a correlação dessas duas variáveis e o comportamento delas com o teor de substituição de agregado natural pelo reciclado;

## REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C618. Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, Pennsylvania, United States. ASTM. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 376. Materiais metálicos — Calibração de instrumentos de medição de força utilizados para a verificação de máquinas de ensaio uniaxiais. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 7218: Agregado — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. 2. ed. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 13281-2: Requisitos e métodos de ensaio — PARTE 02: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 9778: Argamassa e concretos endurecidos — Determinação da absorção de água por imersão — Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados: Determinação de massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do módulo

de elasticidade dinâmico através da propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 16915: Agregados – Amostragem. 1. ed. Rio de Janeiro, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. 1. ed. Rio de Janeiro, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. 1. ed. Rio de Janeiro, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 16973: Agregado – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. 1. ed. Rio de Janeiro, 2021d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos. 4. ed. Rio de Janeiro, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 17053: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. 1. ed. Rio de Janeiro, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 17054: Agregado – Determinação da composição granulométrica. 1. ed. Rio de Janeiro, 2022c.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO-ANEPAC. Origem dos agregados. 2023. Disponível em: <https://www.anepac.org.br/relacionamento/noticias/item/491-mercado-de-agregados-perspectivaspara-2022>. Acesso em: 29 out. 2023.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO-ANEPAC. Mercado de agregados – perspectivas para 2022. 2022.

Disponível em: <https://anepac.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Anepac-origem-dos-agregados-2023.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2023.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. 21ª edição. São Paulo, 2023.

ABO-EL-ENEIN, S. A. et al. Physico-mechanical properties of composite cement pastes containing silica fume and fly ash. Housing and Building National Research Center, v. 11, p. 7-15, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.02.003>

ARAÚJO, R. D. et al. *Uso de vidro reciclado como agregado miúdo em argamassas: propriedades no estado fresco e endurecido*. Revista Matéria, v. 25, n. 1, p. 1-10, 2020.

ADJOUDJ, M'hamed; EZZIANE, Karim; KADRI, El Hadj; SOUALHI, Hamza. Study of the Rheological Behavior of Mortar with Silica Fume and Superplasticizer Admixtures According to the Water Film Thickness. Ksce Journal Of Civil Engineering, [S.L.], v. 22, n. 7, p. 2480-2491, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-017-0228-3>.

ANTIOHOS, S. K.; PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S. Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. Cement and Concrete Research. V. 61-62, p. 20-27, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.04.001>

AKHTAR, A., SARMAH, A. K., Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. Journal of Cleaner Production, v. 186, p. 262-281, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>.

ARULRAJAH, A., YAGHOUBI, E., WONG, Y.C., HORPIBULSUK, S. Recycled Plastic Granules and Demolition Wastes as Construction Materials: Resilient Moduli and Strength Characteristics. Construction and Building Materials, 147, 639-647, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.178>.

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. A.; MACEDO, M. (2011). O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. Gestão e Sociedade, 5(11), 121-136.

AUDO, M. et al. Characterization of ready-mixed concrete plants sludge and incorporation into mortars: Origin of pollutants, environmental characterization and impacts on mortars characteristics. *Journal of cleaner production*, v. 183, p. 153-161, 2018.

ABRECON. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduo da Construção Civil e Demolição. Mercado dos resíduos da construção civil, 2021. Disponível em: <https://abrecon.org.br/reciclagem-de-entulho-residuos-da-construcao-e-demolicao-rd/mercado/>. Acesso em 30 abr. 2023.

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição, “Entrevista: Gilberto Meirelles - Mercado de reciclados”, In: Revista Pini, n. 134. Setembro de 2012.

AZEVEDO, R. C.; ENSSLIN, L. Metodologia da pesquisa para engenharias. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2020. 196 p.

ÂNGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduo de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concreto. [Tese Doutorado] – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

ALMEIDA, R. Avaliação do uso de resíduos cerâmicos como agregado fino em argamassas na Região Metropolitana de Belém – PA. *Revista Engenharia Sustentável*, v. 5, n. 2, p. 112-123, 2024.

ARAÚJO, R. R. Utilização de resíduos de pedreiras como substituição de areia natural em argamassas. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 46, n. 4, p. 55-66, 2018.

BEHNOOD, A. *A review on the use of slags in concrete and cement pastes*. *Construction and Building Materials*, v. 267, 2022.

BRAVO, M. et al. *Recycled aggregates from construction and demolition waste in precast concrete products*. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, 2021.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BELHADJ, B.; HOU ESSOU, J.; MONTRELAY, N.; QUÉNEUDEC, M. Effect of substitution of cement by mineral powders on the physicommechanical properties and microstructure of sand concretes. *Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research*, v. 5, n. 4, p. 18–29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.30564/jaeser.v5i4.5248>

BETIOLI, A. M.; FORTUNATO, M.; MARTINS, B.-H. R.; CASALI, J. M.; ROCHA, J. C.; COLLODETTI, G. Efeito da composição granulométrica e da área superficial específica de resíduos de polimento de porcelanato em argamassas autoadensáveis. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 385-402, jul./set. 2020. ISSN 1678 8621 DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300435>

BHAGATH SINGH, G. V. P.; SUBRAMANIAM, K. VL. Direct decomposition Xray diffraction method for amorphous phase quantification and glassy phase determination in binary blends of siliceous fly ash and hydrated cement. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, v. 6, n. 2, p. 111-125, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/21650373.2016.1177478>

BONAVETTI, V.; DONZA H.; RAHHAL V.; IRASSAR E. Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. *Journal of Cleaner Production*, v. 30, n. 5, p.703-708, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S00088846\(00\)00217-9](https://doi.org/10.1016/S00088846(00)00217-9)

BONATO, M. C. Reaproveitamento de areia descartada de fundição em blocos de concreto e argamassas. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 3, p. 87-98, 2020.

BARBISAN, Ailson Oldair et al. Impactos ambientais causados pela construção civil. *Unoesc & Ciência-ACSA*, v. 2, n. 2, p. 173-180, 2023

BAKCHAN, A.; FAUST, K. M.; LEITE, F. Seven-dimensional automated construction waste quantification and management framework: Integration with project and site planning. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 146, n. April, p. 462–474, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.020>



BOHNENBERGER, J. C., PIMENTA J. F. P., ABREU M. V. S., COMINI U. B., CALIJURI M. L., MORAES A. P., PEREIRA I. S.. Identificação de áreas para implantação de usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição com uso de análise multicritério. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 1, p. 299 311, jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s167886212018000100222>.

BARRETO, A. C.; AMORIM, E. F. Desempenho técnico de misturas de solo com RCD para uso em obras de pavimentação. *Holos*, v. 7, n. 36, 2020.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

BEJA, I. A. Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos. [Dissertação de Mestrado] – Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2014.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil (Literature review: reuse of construction and demolition waste in the construction industry). *Cerâmica*, v. 61, p. 178-189, 2020.

BRASIL. Resolução CONAMA nº. 307, de 05 de julho de 2002. “Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil”, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2002.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria Nº 888, de 04 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021> 318461562. Acesso em: 09 de jan. 2024.

BITTENCOURT, D. M. A. Classificação dos solos. 2016. Apresentação do Power Point. Disponível em:

[https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17430/material/PUC\\_GEOI\\_05\\_Cap3\\_Classifica%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17430/material/PUC_GEOI_05_Cap3_Classifica%C3%A7%C3%A3o.pdf). Acesso em 30 nov. 2023.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Construção Civil é a locomotiva do crescimento, com emprego e renda. CBIC, 2020.

CAMPOS, H. F. Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: estudo experimental. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações (fundamentos). Vol. 1. 6. ed., Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2007. 234p.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. In: Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, pp. 13-21. ISBN: 978-65 87108-26-1.

CASTRO, A. M. et al. Desafios e alternativas para escassez de areia natural na Região Metropolitana de Belém – PA. *Revista Norte de Engenharia Civil*, v. 3, n. 1, p. 1-14, 2023.

COSTA, C.; CARVALHO, P. A.; BORDADO, J.C.; NUNES, A. Estudo de argamassas de base cimentícia por microscopia electrónica de varrimento. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, v. 21, p. 31-35, 2009.

COSTA, D. et al. Potencial de agregados reciclados em argamassas autonivelantes e de injeção. *Revista Materiais*, v. 28, n. 2, p. 75-89, 2022.

CORREIA, L. S. Problemas de abastecimento de areia natural em Recife e alternativas sustentáveis. *Construção & Tecnologia*, v. 19, n. 1, p. 44-56, 2022.

COX, K. G.; BELL, J. D.; PANKHURST, R. J. 1979. The Interpretation of the Igneous Rocks. Allen & Unwin. London. 450pp.

CRAIG, R. F. Mecânica dos solos. 7. ed., Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2007. 365p.

CALKINS, Meg. Materials for sustainable sites: a complete guide to the evaluation, selection, and use of sustainable construction material. Hoboken: Wiley, 2009.

CARASEK, Helena. Aderência de argamassas a base de cimento Portland a substratos porosos – Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. 1996. 285 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade da massa das argamassas de revestimentos. 03. Ed. Rio de Janeiro: Revista Matéria, 2016. 714 – 732 p. v. 21.

CARASEK. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Chechela (org). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2016.

CASALI, Juliana Machado. et al. Avaliação das propriedades do estado fresco e endurecido da argamassa estabilizada para assentamento e revestimento. In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2011, Porto Alegre, 2011.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. Cement and Concrete Research, v.31, n. 10, p. 1411–1420, 2001.

CRAUSS, C.; Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2010.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 307 – Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente, 2002. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/>. Acesso em 13 abr. 2023.

CONCEIÇÃO, M. M. M. et al. Diagnóstico dos resíduos de demolição e construção no Brasil Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 9, p. 87466-87481, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n9-080>

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (ed), Concreto: ensino, pesquisa e realizações. 1 ed., p. 345-379, São Paulo: IBRACON. 2005.

DE MARCO JÚNIOR, P.; PAGLIA, A. P. Parte 1: Estatística e interpretação de dados. In: Material de apoio para análises estatísticas. Goiânia, Abr. 2009. p. 2-22. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/85/o/Apostila\\_de\\_estat%C3%ADstica.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/85/o/Apostila_de_estat%C3%ADstica.pdf). Acesso em: 17 dez. 2024

DIAS, F. et al. Aproveitamento de lamas de britagem de rocha como agregados finos em argamassas. *Revista Construção Sustentável*, v. 12, n. 3, p. 78-91, 2024.

DORFMAN, Gabriel. História do Cimento e do Concreto: desde os primórdios até a primeira guerra. Brasília: Unb, 2003.

DOWNS, R. T.; HALL-WALLACE, M. O banco de dados de estrutura cristalina do mineralogista americano. *American Mineralogist*, v. 88, p. 247-250, 2003.

DO Ó, Sávio Wanderley. Análise da retenção de água em argamassas de revestimentos aditivadas. 2004. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Estruturas e construção civil, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DOCE OBRA. [S. I.], 06 jan. 2022. Disponível em: <https://casaconstrucao.org/materiais/como-fazer-concreto/>. Acesso em: 04 mar. 2022.

DUBAJ, Eduardo. Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre. 2000. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

DHIR, R. K. et al. Use of Recycled Aggregates in Mortar. *Sustainable Construction Materials*, 143–179. Dóid:10.1016/b978-0-08-100985-7.00006-6, 2020.

DINIZ, M. de F. G.; CASTRO, T. LOPES de; RESENDE, J. M. B. B.; MENDES, G. G. Utilização dos Resíduos Sólidos da Construção Civil na Pavimentação de Estradas Vicinais. 2º. Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu, Brasil, 2019. IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY – EEA. Well-being and the environment: building a resource-efficient and circular economy in Europe. Copenhagen, Denmark, 2014. Disponível em: . Acesso em: jun. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. Directive on Waste. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling>. Acesso em: 12 nov. 2024.

FARINHA, C. B., SILVESTRE J. D., BRITO, J., VEIGA M. R. Life Cycle Assessment of Mortars with Incorporation of Industrial Wastes. *Fibers*, v. 7, n. 59, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib7070059>.

FARIA, P. Utilização de agregados reciclados em argamassas de reabilitação patrimonial em Portugal. *Revista Construção e Sustentabilidade*, v. 7, n. 2, p. 44-57, 2020.

FERNANDEZ, J. L. B. Resíduos sólidos da construção civil: análise do gerenciamento em obras de reforma, de micro e de pequenos portes. Dissertação de mestrado – Universidade Católica do Salvador. Salvador/BA, 2018.

FENAUX, M.; REYES, E; GÁLVEZ, J. C.; MORAGUES, A. Modelling the transport of chloride and other ions in cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, v.97, p. 33 –42, 2019.

FERREIRA, A. C. A. et al. Gestão de Resíduos Sólidos na Construção Civil. *Revista Pensar Engenharia*, v. 2, p. 1–14, 2014.

FERREIRA, M. et al. Economic and environmental benefits of recycling construction waste. *Sustainability*, v. 15, n. 5, p. 1675-1689, 2023.

FONSECA, M. J. M.; MAINTINGUER, S. I. Aplicação da logística reversa na construção civil como mecanismo ambiental sustentável em políticas públicas/Application of reverse logistics in civil construction as a sustainable environmental mechanism in public policies. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 1, p. 140-149, 2018.

FONSECA, L.; CHAVES, M.; GOMES, P. Construção com terra crua estabilizada em Moçambique: técnicas e viabilidade. *Construction and Building Materials Journal*, v. 33, p. 201-210, 2021.

GARCIA, L.; TORRES, J. Circular economy in construction: A framework for sustainable resource management. *Journal of Cleaner Production*, v. 340, p. 135-143, 2023.

GARCIA, L.; TORRES, J. Circular economy in construction: A framework for sustainable resource management. *Journal of Cleaner Production*, v. 340, p. 135-143, 2023.

GARCIA, L.; TORRES, J. Circular economy in construction: A framework for sustainable resource management. *Journal of Cleaner Production*, v. 340, p. 135-143, 2023.

GARCIA, L.; TORRES, J. Circular economy in construction: A framework for sustainable resource management. *Journal of Cleaner Production*, v. 340, p. 135-143, 2023.

GOBBO, L. A.. Aplicação da difração de raios x e método de Rietveld no Estudo de cimento Portland. 273 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (Usp), São Paulo, 2009.

GOUGH, D.; OLIVER, S.; THOMAS, J. An introduction to systematic reviews. Sage, 2017.

GOBBE, R. *Agregados reciclados: aplicações e viabilidade técnica*. Revista Engenharia Civil, v. 31, p. 55-70, 2022.

GOMES, M. H. *Caracterização de agregados reciclados para uso em concretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GOMES, J. S. Argamassas com agregados reciclados em Portugal: estado da arte. *Revista Portuguesa de Engenharia Civil*, v. 29, n. 1, p. 9-23, 2021.

GUIMARÃES, R. et al. Alternativas à escassez de areia natural na Região Metropolitana de Belo Horizonte – MG. *Revista Engenharia Civil e Meio Ambiente*, v. 10, n. 4, p. 33-48, 2023.

JANTSCH, Ana Cláudia Akele. Análise do desempenho de argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes. 2015. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7900/JANTSCH,%20ANA%20CLAUDIA%20AKELE.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2021.

JONES, R.; ZHAO, L. Circular economy in the construction sector: Reducing environmental impact through sustainable practices. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 87, p. 144-152, 2022.

JONES, R.; ZHAO, L. Circular economy in the construction sector: Reducing environmental impact through sustainable practices. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 87, p. 144-152, 2022.

KHAN, K. S.; et al. Five steps to conducting a systematic review. *Journal of the Royal Society of Medicine*, v. 96, n. 3, p. 118-121, 2003.

KHAN, K. S.; KUNZ, R.; KLEIJNEN, J.; BEFORE, G. Five steps to conducting a systematic review. *Journal of the Royal Society of Medicine*, v. 96, n. 3, p. 118-121, 2003.

LACERDA, M. V. Análise do desempenho de argamassas de revestimento com agregados reciclados. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 13, n. 2, p. 320-333, 2020.

LIMA, P. R. Desempenho de argamassas produzidas com resíduos industriais como agregados alternativos. *Revista Ambiente Construído*, v. 24, n. 1, p. 121-134, 2024.

LOZOVEY, G. L. Análise do uso de agregados reciclados em argamassas de revestimento. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 3, 2021.

MAITLO, G. H.; et al. Plastic Waste Recycling, Applications, and Future Prospects for a Sustainable Environment. *Sustainability*, v. 14, n. 18, p. 11637, 2022.

MARQUES, T. A. Utilização de resíduos de construção civil em argamassas de revestimento: propriedades e viabilidade ambiental. *Revista Brasileira de Materiais de Construção*, v. 19, n. 2, p. 105-119, 2023.

MAZZILLI, F. R. Técnicas de restauro em edificações históricas com argamassas de cal e agregados reciclados. *Revista Patrimônio Histórico & Restauro*, v. 8, n. 1, p. 59-73, 2022.

MACHADO, F. B.; NARDY, A. J. R.; ROCHA JUNIOR, E. R. V.; MARQUES, L. S.; OLIVEIRA, M. A. F. D. Geologia e litogeoquímica da Formação Serra Geral nos estados de Mato grosso e Mato Grosso do Sul. *Geociências*, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 523-540, 2009.

MATTA, Vanessa Ribeiro Peixoto da et al. Efeitos da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) no desempenho de argamassas de cimento Portland no estado endurecido. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, [S. l.], v. 9, n. 1, 2013. DOI: <https://doi.org/10.17271/19800827912013597>

MERCANTE, I. C. et al. *Impacto ambiental do uso de resíduos reciclados em argamassas de revestimento*. *Ambiente Construído*, v. 22, n. 1, p. 45-58, 2022.

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J.. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 4, p. 125-139, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400189>

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MERKYS, A. et al. COD:CIF:Parser: um analisador CIF de correção de erros para a linguagem Perl. *Journal of Applied Crystallography*, v. 49, n. 1, p. 292-301, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1107/S1600576715022396>.



MERKYS, A. et al. Algoritmo baseado em isomorfismo de gráfico para verificação cruzada de descrições químicas e cristalográficas. *Journal of Cheminformatics*, v. 15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13321-023-00692-1>.

MORAIS, B. B. et al. Análise das propriedades do concreto com variação dos tipos de cimento. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, ano 05, ed. 05, v. 01, p. 05-25, maio 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/tipos-de-cimento>. Acesso em: 05/01/2024.

MATUTI BRUNA. Reutilização de Resíduos de Construção Civil e Demolição na Fabricação de Tijolo Cerâmico – Manaus, 2022.

MARTINS FILHO. Influência do Teor do Material Fino na Aderência de Revestimentos Contendo RCD. – 3. Ed. João Pessoa: XIV Simpósio Brasileiro de Tecnologias das Argamassas, 2021.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. *Construction and Building Materials*, v.23, n. 3, p. 1476–1484, 2009.

MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V.; RICHTER, K.; SOUZA, W. B.; KLEIN, N. S. Ensaios de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 8, n. 2, p. 54-63, 2014.

MINITAB, INC. Software Minitab 17.3.0. United States, 2016.

MOTOKI, A. Apostila didática para a disciplina Petrologia I: Descrição Petrográfica de Rochas Ígneas. Rio de Janeiro: Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), 2004. 4 v.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEMECEK, J.; KRUIS, J.; KOUDELKA, T.; KREJČÍ, T. Simulation of chloride migration in reinforced concrete. *Applied Mathematics and Computation*. v.319, p.575 585, 2018.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOBREGA, A.K.C et al. Caracterização do resíduo de pó de pedra ornamental adicionado à argamassa em substituição parcial ao cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis- SC. Anais eletrônicos [...]. Florianópolis- SC: Associação Brasileira de engenharia química, 2014.

NUNES, V. S. Avaliação do efeito da substituição parcial do cimento por resíduo de calcário nas propriedades mecânicas e térmicas de concretos leves. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2020.

NEWCOMB. Earth Is Running Out Of Sand. Which is, You Know, Pretty Concerning: Sand is the Second most-used resource after water, but it's uregulated and ripping eviroments apart. Popular Mechanics, 2022.

ODLER, I. Hydration, setting and hardening of Portland cement. In: LEA, F. M. The chemistry of cement and concrete. 4. ed. [S.l.]: Elsevier, 2003. p. 157-250.

OLIVEIRA, Leonardo Soares de. Metaestabilidade estrutural do sistema Ni-Ti-Ge induzida por mechanical alloying. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017.

OLIVEIRA, D. R. Impactos da escassez de areia natural no mercado da construção civil em São Paulo. *Revista Engenharia & Construção*, v. 27, n. 3, p. 88-99, 2021.

OLIVEIRA, G. et al. Avaliação de argamassas de assentamento com resíduos cerâmicos moídos. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 48, n. 2, p. 143-156, 2023.

PAYA, J.; BORRACHERO, M.V.; MELLADO, A., ORDONEZ.L.M. Determination of amorphous sílica in rice husk ash by a rapid analytical method. *Cement and Concrete Research*. v. 31, p.227-231. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00466-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00466-X)

PAGE, C. L.; LAMBERT, P.; VASSIE, P. R. W. Investigations of reinforcement corrosion.1. The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete. *Materials and Structures*, v.24, p.243-252, 1991.

PEDRO, D. et al. *Performance of structural concrete with recycled aggregates: A review*. *Cement and Concrete Research*, v. 152, 2022.

PENG, J; HU, S.; ZHANG, J.; CAI, C. S.; LI, L. Y. Influence of cracks on chloride diffusivity in concrete: A five-phase mesoscale model approach. *Construction and Building Materials*. v.197, p. 587-596, 2019.

PEDROSO, F.L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Concreto & Construções*, São Paulo, n. 53, p. 14-19, jan./mar. 2009. Disponível em: [http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/rev\\_construcao/pdf/revista\\_concreto\\_53.pdf](http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf). Acesso em: 09/08/2023

QUEIROZ, R, C. Geologia e geotécnica básica para engenharia civil. São Paulo: Blucher, 2016.

QUIRÓS, M. et al. Usando strings SMILES para a descrição da conectividade química no Crystallography Open Database. *Journal of Cheminformatics*, v. 10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13321-018-0279-6>.

RAISI, E. M.; AMIRI, J. V.; DAVOODI, M. R. Mechanical performance of selfcompacting concrete incorporating rice husk ash. *Construction and Building Materials*. v. 177, p. 148–157, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.053>

RAHHAL V.; TALERO R., Early hydration of portland cement with crystalline mineral additions. *Cement and Concrete Research*. v. 35, p. 1285 – 1291, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.12.001>

RATTANASHOTINUNT, C.; TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKKUL, C.; CHEEWAKET, T.; CHINDAPRASIRT, P. Investigation on the strength, chloride

migration, and water permeability of eco-friendly concretes from industrial by-product materials. *Journal of Cleaner Production* v. 172, p. 1691- 1698, 2018.

RÊGO, João Henrique da Silva. As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento: aspectos de microestrutura das pastas. 2004. 301 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2004.

RIBEIRO, A. V. S., et al. Influência de adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa de elevada resistência à compressão. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1215>

RIBEIRO, D. V.; Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado. 2010. 222f. (Tese de doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHAB, J. A.; MORELLIA, M. R. Chloride Diffusivity in Red Mud-Ordinary Portland Cement Concrete Determined by Migration Tests. *Materials Research*. 14(2): 227-234, 2011.

ROSSETTI, L.; LIMA, E. F.; WAICHEL, B. L.; HOLE, M. J.; SIMÕES, M. S.; SCHERER, C. M. S. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 355, p. 98–114, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008>

SANTIAGO, C. Argamassas tradicionais de cal [online]. Salvador: EDUFBA, 2007. 202 p. ISBN 978-85-232-0471-6. Available from SciELO Books.

SARAYA, M.E., Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study. *Construction and Building Materials*, v. 72, p. 04–112, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.071>

SCHERER, C.; LIMA, L. F. de; ZORZI, J. E. Effect of partial replacement of cement by fine powders on the corrosion resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 401, p. 132982, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132982>

SILVA, R. V. et al. *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. *Construction and Building Materials*, v. 236, 2021.

SANTOS, M. et al. Uso de agregados reciclados em obras de reabilitação urbana na Europa. *Revista Engenharia Civil Internacional*, v. 15, n. 2, p. 78-90, 2022.

SILVA, L. C. Avaliação de argamassas recicladas de revestimento e assentamento. *Revista Materiais e Construção*, v. 31, n. 1, p. 17-32, 2025.

SILVA, P. S. Utilização de resíduos em argamassas de revestimento: propriedades e sustentabilidade. *Construção Sustentável*, v. 18, n. 4, p. 201-214, 2024.

SOUZA, F. R. et al. *Viabilidade econômica do uso de agregados reciclados em argamassas de assentamento*. *Revista Materiais*, v. 28, n. 4, p. 23-32, 2023.

SOUZA, M. et al. Areia de fundição em argamassas para alvenaria estrutural: estudo de caso em Curitiba. *Revista Engenharia Sustentável*, v. 6, n. 2, p. 66-77, 2024.

SHAHRIAR, A.; NEHDI, M. L. Optimization of rheological properties of oil well cement slurries using experimental design. *Materials and Structures*, v. 45, n. 9, p. 1403-1423, Feb. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9841-2>

SIDDIQUE, S.; JANG, J. G.. Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar. *Journal of Building Engineering*, [S.l.], v. 31, p. 1-8, Setp. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2020.101322>.

SILVA, J. P.; SANTOS, Y. R.; BELLO, M. I. M.. Aplicação da ANOVA e dos testes de Fisher e Tukey em dados de recalque de edificios de múltiplos pavimentos. *Principia*, [s. l], v. 59, n. 3, p. 829-845, 30 set. 2022.

SILVA, K. D. do C. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lâ de rocha, fibra de vidro e lâ de vidro. Ouro Preto, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SIQUEIRA, W. F.; HENTGES, T. I. Estudo de concreto de alto desempenho com utilização de filer basáltico e filer cerâmico. In: 62º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Florianópolis. Anais [...]. IBRACON, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.155>

SINGH, M.; SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D.. An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. Construction and Building Materials, v. 134, p. 471-488, 2017.

SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades tecnológicas e microestrutura de piso cerâmico vitrificado. Cerâmica, São Paulo, v. 57, p. 212-218, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000200013>

SOUTSOS, M. N. et al. Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. Construction and Building Materials, v. 25, n. 2, p. 726-735, 2011.

SOUZA, F. da S. et al. Mapping and recycling proposal for the construction and demolition waste generated in the Brazilian Amazon. Conservation and Recycling, v. 176, p. 105896, 2022.

SOUZA, J. G. G. Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto: aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. Brasília, 2001. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

SPEAKMAN, S.. A. Profile fitting for analysis of XRPD data using highscore plus v3. Massachusetts institute of technology: Center For Materials Science And Engineering At Mit, Massachusetts, 2012. 57 slides, color.

VARDHAN, K. et al. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 615-621, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.071>

VAITKUS, A.; MERKYS, A.; GRAŽULIS, S. Validation of the crystallography Open Database using the Crystallographic Information Framework. *Journal of Applied Crystallography*, v. 54, n. 2, p. 661-672, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1107/S1600576720016532>.

VAITKUS, A. et al. A workflow for deriving chemical entities from crystallographic data and its application to the Crystallography Open Database. *Journal of Cheminformatics*, v. 15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13321-023-00780-2>.

VILLAR-COCIÑA, E. et al. A comparative study on the pozzolanic activity between bamboo leaves ash and silica fume: kinetic parameters. *Fume: Kinetic Parameters. Waste and Biomass Valorization*. v. 11, p. 1627–1634, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00556-y>

VIEIRA, A. et al. Benefícios econômicos e ambientais do uso de agregados reciclados na construção civil. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 49, n. 1, p. 101-114, 2023.

WAMBUCO. Manual Europeu de Resíduos da Construção de Edifícios – Volume III. União Europeia, 2019.

WERNICK, Eberhard. Rochas magmáticas: conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica. Rio de Janeiro, ed. Unesp, p. 336, 2003

WU, Z. et al. An off-site snapshot methodology for estimating building construction waste composition-a case study of Hong Kong. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 77, p. 128-135, 2019.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, (WBCSD). The cement sustainability initiative, our agenda for action. 2002.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S.; Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) Results for concrete containing mineral admixtures. *ACI Materials Journal*, v.97, n.2, p.221-232, 2000.

YUAN, H.; SHEN, L. Trend of the research on construction and demolition waste management. *Waste management*, v. 31, n. 4, p. 670-679, 2011.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 3, p. 532-539, 2005, DOI:

YADAV, V. S.; PRASAD, M.; KHAN, J.; AMRITPHALE, S. S.; SINGH, M.; RAJU, C. B. Sequestration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) using red mud. *Journal of Hazardous Materials*, v. 176, n. 1-3, p. 1044–1050, 2010.

YOON, S. Simulation of Chloride Ingress through Surface-Coated Concrete during Migration Test Using Finite-Difference and Finite-Element Method. *International Journal of Polymer Science*, 2017.

KARPINSKI LUISETE. Levantamento da Geração dos Resíduos da Construção Civil no Município de Passo Fundo – RS, 2021.

KARPINSKI, Luisete Andreis. et al. Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental. Porto Alegre: Edipucrs, 2009. 163 p.

HE, L.; YUAN, H. Investigation of construction waste recycling decisions by considering consumers' quality perceptions. *Journal of Cleaner Production*, v. 259, id. 120928, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120928>.

WAMBUCO. Manual Europeu de Resíduos da Construção de Edifícios – Volume III. União Europeia, 2019.

WU, Z. et al. An off-site snapshot methodology for estimating building construction waste composition-a case study of Hong Kong. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 77, p. 128-135, 2019.



SALAHUDDIN H., QURESHI L.A., NAWAZ A., R. S. S. Effect of recycled fine aggregates on performance of Reactive Powder Concrete. *Construction and Building Materials*, v. 243, 2020.

TANG Q., MA Z., WU H., W. W. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, v. 114, 2020.

TAVARES, L. M. et al. *Environmental and mechanical benefits of recycled aggregates in concrete*. *Journal of Cleaner Production*, v. 374, 2023.

WANG X., YU R., SHUI Z., SONG Q., LIU Z., BAO M., LIU Z., W. S. Optimized treatment of recycled construction and demolition waste in developing sustainable ultra-high performance concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 221, p. 805–816, 2019.

ZACCHEI, E.; NOGUEIRA, C. G. Chloride diffusion assessment in RC structures considering the stress-strain state effects and crack width influences. *Construction and Building Materials*, v.201, p. 100–109, 2019.

ZORDAN, S. E. A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto. Campinas, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

ZHANG, J. X. et al. Composition design and performance characterization of a novel backfilling concrete derived from urban construction waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 190, p. 508-516, 2018

ZHENG, L. et al. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. *Construction and Building Materials*, v. 136, p. 405-413, 2017.

ZHAO Z., COURARD L., GROSLAMBERT S., JEHIN T., LÉONARD A., X. J. Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 157, 2020.

ZHAO, Z.; REMOND, S.; DAMIDOT, D.; XU, W. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, v. 81, p. 179-186, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>

## ANEXO - A

Tabela 22: Determinação da Composição Granulométrica do Agregado Miúdo Reciclado

Determinações	Abertura da Peneira	Porcentagem (%)		Método de Ensaio
	ABNT (mm)	Retida	Acumulada	
Composição Granulométrica	4,75	0,77	29,88	NBR 17054 (ABNT, 2022)
	2,36	0,97	30,85	
	1,18	0,77	31,62	
	0,6	4,17	35,79	
	0,3	29,76	65,55	
	0,15	20,72	86,27	
	Fundo	12,07	98,34	
Módulo de Finura	3,20			
Zona Granulométrica	Zona 2 (Fina)			

Fonte: (Clementino, 2025)

Tabela 23: Determinação da Composição Granulométrica do Agregado Miúdo Natural

Determinações	Abertura da Peneira	Porcentagem (%)		Método de Ensaio
	ABNT (mm)	Retida	Acumulada	
Composição Granulométrica	4,75	0	0	NBR 17054 (ABNT, 2022)
	2,36	1,6	1,6	
	1,18	11,6	13,2	
	0,6	20	33,2	
	0,3	29,3	62,5	
	0,15	24	86,5	
	Fundo	13,5	100	
Módulo de Finura	2,00			
Zona Granulométrica	Zona 2 (Fina)			

Fonte: (Clementino, 2025)

## **ANEXO – B**

## Resistência à Compressão nas Argamassas de Assentamento

One-way ANOVA   Effects   Tukey's pairwise   Residuals   Kruskal-Wallis   Mann-Whitney pairwise   Dunn's post hoc

Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

Copenhaver-Holland 1988 ▾

	A	B	C
A		0,002179	0,008924
B	6,268		0,7097
C	5,136	1,132	

Close   Copy   Print   Help

## Resistência à Tração na Flexão nas Argamassas de Assentamento

One-way ANOVA
Effects
Tukey's pairwise
Residuals
Kruskal-Wallis
Mann-Whitney pairwise
Dunn's post hoc

Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

Copenhaver-Holland 1988

	A	B	C
A		0,01873	0,1186
B	4,552		0,5578
C	3,059	1,493	

Close

Copy

Print

Help

### Permeabilidade nas Mini Paredes sem revestimento

One-way ANOVA   Effects   **Tukey's pairwise**   Residuals   Kruskal-Wallis   Mann-Whitney pairwise   Dunn's post hoc

Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

Copenhaver-Holland 1988

	A	B	C	D	E
A		0,9084	0,517	0,5907	0,0704
B	1,215		0,9453	0,9712	0,3184
C	2,256	1,041		0,9999	0,7361
D	2,083	0,8678	0,1736		0,6647
E	3,992	2,777	1,736	1,909	

Close   Copy   Print   Help

## Permeabilidade nas Mini Paredes com revestimento

One-way ANOVA   Effects   Tukey's pairwise   Residuals   Kruskal-Wallis   Mann-Whitney pairwise   Dunn's post hoc

Tukey's Q below the diagonal, p(same) above the diagonal.  
Significant comparisons are pink.

Copenhaver-Holland 1988

	A	B	C	D	E
A		0,5094	0,5094	0,5094	0,5094
B	2,274		1	1	1
C	2,274	0		1	1
D	2,274	0	0		1
E	2,274	0	0	0	

Close   Copy   Print   Help