



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

PALOMA SUELLEN LIMA DE SOUSA

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE ARGAMASSAS COM RESÍDUO DE  
VIDRO**

ANANINDEUA  
2025

PALOMA SUELLEN LIMA DE SOUSA

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE ARGAMASSAS COM RESÍDUO DE VIDRO**

Trabalho de curso, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais, pela Universidade Federal do Pará.

Orientadora: Profa. Dra. Verônica Scarpini  
Candido

Coorientadora: Ma. Damares da Cruz Barbosa  
Nascimento

PALOMA SUELLEN LIMA DE SOUSA

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE ARGAMASSAS COM RESÍDUO DE VIDRO**

Trabalho de Curso, apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, pela Universidade Federal do Pará.

**Data de aprovação:**

**Conceito:**

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dra. Verônica Scarpini Candido  
FEMat/CAMPANIN/UFPA - Orientadora

---

Ma. Damares da Cruz Barbosa Nascimento  
PPGCEM/IME - Coorientadora

---

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
FEMat/ CAMPANIN/UFPA - Examinador Interno

---

Ma. Miriane Alexandrino Pinheiro  
PRODERNA/ITEC/UFPA - Examinadora Externa

## DEDICATÓRIA

À minha sobrinha, Anna Sophia, que apesar de não saber, não me deixou desistir, da graduação e da vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que pela sua infinita bondade me fizestes chegar até aqui, e a Nossa Senhora, minha grande e fiel intercessora, que por sua intercessão me deste colo e conforto nos momentos difíceis durante esta jornada.

À minha avó Maria, por ter me criado, que sob muita luta e esforço nunca me deixou faltar nada, principalmente carinho e amor, me mostrastes o caminho dos estudos desde muito cedo e cumpriu muito bem enquanto pode, saudades eterna!

Ao meu pai, que incansavelmente enfrenta lutas diárias me apoiando, para que este sonho se mantivesse vivo.

À minha sobrinha, Anna Sophia, que desde o seu nascimento me trouxe alegria e paz, obrigada por me mostrar a docilidade do amor e o quanto ele pode se expandir.

À minha irmã, Priscilla Suellen e meu cunhado, Nathan Ferreira, pelo apoio e incentivo de sempre.

Aos meus demais familiares, estendo meus agradecimentos, de modo especial as minhas tias, Doralice, Eliana e Valquíria, pelo apoio nos momentos difíceis e por segurarem minha mão e não me deixarem desistir.

Aos meus amigos da T20, Manoel, Sarah, e Giovana, muito obrigada pelas infinitas aulas particulares quando a disciplina apertava, pelos momentos de leveza e alegria em sala, o processo ficou mais leve com vocês, muito obrigada pela companhia diária de vocês.

As minhas amigas, Gabrielly Batista e Cláudia Luiza, que se tornaram irmãs, por me acolherem tão bem enquanto morávamos juntas, obrigada pela amizade e carinho de sempre, tão preciosa é a amizade de vocês, obrigada por todas as nossas aventuras e trocas de conhecimento.

A minha grande parceira e amiga, Sinara Barbosa, que sempre me apoia, obrigada pela paciência, por vibrar junto comigo e por todas as gargalhadas diárias.

Aos meus amigos de laboratório, Manoel, Edson, Sarah, Giovana, Daiane, Rayanne, Fábio, Naylanda, Vitor e Marcelo, muito obrigada por compartilharem alegria, conhecimentos e desafios diários juntos, a jornada ficou mais leve com vocês.

Ao grupo de pesquisa em materiais compósitos (GPMCOMP), que me acolhe desde 2023, proporcionando conhecimentos.

A minha orientadora, Professora Verônica Scarpini, por ser um reflexo de mulher inspiradora e por todo conhecimento repassado, obrigada pela orientação, pelos momentos descontraídos na hora do café, pelos puxões de orelhas e por esses anos de acolhimento no

grupo, saiba que a senhora sempre terá uma fã em Belém do Pará.

Ao professor Alisson Rios, por ser minha porta de entrada ao GPMCOMP, por sua primeira aula tão inspiradora de materiais compósitos a minha turma, muito obrigada pelos ensinamentos repassados dentro e fora de sala.

Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia de Materiais, de modo especial ao Professor Deibson Costa e ao Professor Edemarino Hildebrando, por todo conhecimento repassado durante a graduação, seja dentro ou fora de sala de aula, muito obrigada.

A todos, muito obrigada!

## EPÍGRAFE

“Depois do medo, vem o mundo”.

- Clarice Lispector

## RESUMO

O crescente volume de resíduos sólidos e a demanda por soluções ambientalmente responsáveis têm incentivado a busca por materiais alternativos capazes de reduzir o consumo de recursos naturais na construção civil. Entre esses materiais, o resíduo de vidro moído destaca-se pela disponibilidade, estabilidade química e elevado teor de sílica amorfa, características que justificam sua investigação como substituto parcial do agregado miúdo em argamassas. O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento físico, mecânico e microestrutural de argamassas nas quais a areia foi parcialmente substituída por resíduo de vidro nos teores de 10%, 20%, 30% e 40% em massa. Inicialmente, procedeu-se à caracterização física das matérias-primas, verificando que o vidro apresenta maior finura e angularidade em relação à areia natural, fatores que influenciam diretamente a compactação e a demanda de água das misturas. A análise granulométrica confirmou a predominância de partículas finas no resíduo, enquanto a determinação da massa específica indicou valores compatíveis com os de agregados miúdos utilizados na construção civil. No estado fresco, observou-se que o aumento do teor de vidro provocou elevação nos tempos de início e fim de pega, consequência da baixa absorção de água e da menor reatividade inicial do material vítreo. Nos ensaios físicos, houve redução da absorção de água e do índice de vazios, além de um discreto aumento da massa específica, indicando maior densificação da matriz cimentícia. A resistência à compressão demonstrou melhora significativa nos teores intermediários, especialmente em 20% e 30%, devido ao efeito de preenchimento das partículas finas de vidro e à contribuição pozolânica tardia da sílica amorfa. O teor de 30% apresentou o melhor desempenho geral, combinando maior resistência mecânica, menor porosidade e microestrutura mais compacta. As imagens de microscopia eletrônica de varredura evidenciaram refinamento da matriz e presença de produtos hidratados associados à interação entre cimento e partículas de vidro. A análise estatística (ANOVA e teste de Tukey) confirmou diferenças significativas entre os grupos, consolidando o teor de 30% como a condição mais eficiente. Os resultados obtidos mostram que a substituição parcial da areia por vidro moído é tecnicamente viável até 30%, proporcionando melhorias relevantes no desempenho do material e contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil.

**Palavras-chave:** Argamassa; Resíduo de vidro; Propriedades mecânicas; Caracterização física.

## ABSTRACT

The increasing volume of solid waste and the demand for environmentally responsible solutions have encouraged the search for alternative materials capable of reducing the consumption of natural resources in civil construction. Among these materials, ground glass waste stands out for its availability, chemical stability, and high amorphous silica content, characteristics that justify its investigation as a partial substitute for fine aggregate in mortars. The objective of this study was to evaluate the physical, mechanical, and microstructural behavior of mortars in which sand was partially replaced by glass waste at levels of 10%, 20%, 30%, and 40% by mass. Initially, the physical characterization of the raw materials was carried out, verifying that glass presents greater fineness and angularity compared to natural sand, factors that directly influence the compaction and water demand of the mixtures. The granulometric analysis confirmed the predominance of fine particles in the waste, while the determination of specific gravity indicated values compatible with those of fine aggregates used in civil construction. In the fresh state, it was observed that increasing the glass content led to longer setting times, a consequence of the low water absorption and lower initial reactivity of the vitreous material. In physical tests, there was a reduction in water absorption and void index, as well as a slight increase in specific gravity, indicating greater densification of the cementitious matrix. Compressive strength showed significant improvement at intermediate contents, especially at 20% and 30%, due to the filling effect of fine glass particles and the late pozzolanic contribution of amorphous silica. The 30% content showed the best overall performance, combining higher mechanical strength, lower porosity, and a more compact microstructure. Scanning electron microscopy images showed matrix refinement and the presence of hydrated products associated with the interaction between cement and glass particles. Statistical analysis (ANOVA and Tukey's test) confirmed significant differences between the groups, consolidating the 30% content as the most efficient condition. The results obtained show that the partial replacement of sand with ground glass is technically feasible up to 30%, providing relevant improvements in material performance and contributing to more sustainable practices in civil construction.

**Keywords:** Mortar; Glass waste; Mechanical properties; Physical characterization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Ligação dos cristais de etringita com a interface .....	19
Figura 2 — Fissura horizontal na argamassa de revestimento.....	20
Figura 3 — Fissura mapeada.....	21
Figura 4 — Emissões totais de CO <sub>2</sub> .....	24
Figura 5 — Fluxograma de obtenção do cimento.....	26
Figura 6 — Estrutura interna da matriz cimentícia.....	30
Figura 7 — Descarte do vidro.....	32
Figura 8 — Fluxograma das etapas de produção do vidro.....	33
Figura 9 — Beneficiamento do resíduo: (a) Moinho de jarro da moagem; (b) Agitador mecânico.....	39
Figura 10 — Argamassadeira.....	42
Figura 11 — Aparelho vicat.....	43
Figura 12 — Ensaio mecânico de compressão: (a) Máquina de ensaios; (b) Corpo de prova sendo ensaiado.....	45
Figura 13— Análise granulométrica: (a) Areia; (b) Resíduo de vidro.....	49
Figura 14 — Ensaio de resistência à compressão.....	54
Figura 15 — Microscopia Eletrônica de Varredura: (a) Argamassa de referência, (b) 10%, (c) 20%, (d) 30% e (e) 40%.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do cimento.....	25
Tabela 2 - Principais tipos de cimento portland.....	28
Tabela 3 - Materiais utilizados na obtenção da argamassa.....	38
Tabela 4 - Abertura de peneira na distribuição granulométrica.....	40
Tabela 5 - Massa específica dos agregados.....	48
Tabela 6 - Ensaio de vicat.....	51
Tabela 7 - Ensaios físicos da argamassa.....	53
Tabela 8 - Anova de resistência mecânica.....	61
Tabela 9 – Teste de Tukey.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação de Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CH	Hidróxido de Cálcio
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DMC	Dimensão Máxima Característica
DMS	Diferencia Mínima Significativa
EGE	Efeitos de Gases Estufa
GPa	Giga Pascal
GPMCOMP	Grupo de Pesquisa em Materiais Compósitos
LACMAT	Laboratório de Caracterização de Materiais
LAPTEC	Laboratório de Práticas Tecnológicas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MF	Módulo de Finura
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
RAS	Reação Álcali Sílica
UFPA	Universidade Federal do Pará
ZT	Zona de Transição
ZTI	Zona de Transição Interfacial

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>18</b>
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIAL TEÓRICO</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Argamassa</b>	<b>19</b>
3.1.1	Características da Argamassa	19
3.1.2	Componentes da argamassa	24
<b>3.2</b>	<b>Matérias Primas da Argamassa</b>	<b>25</b>
3.2.1	Cimento Portland	25
3.2.1.1	Classificação e tipos de cimento portland	28
3.2.2	Agregados	30
3.2.2.1	Classificação dos agregados	30
3.2.2.2	Propriedades dos agregados	31
3.2.2.3	Impactos ambientais da extração de agregados naturais	33
<b>3.3</b>	<b>Resíduo de vidro como Alternativa Sustentável</b>	<b>34</b>
3.3.1	Uso sustentável do vidro	37
3.3.2	Aplicação do Resíduo de Vidro na Construção Civil	38
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais utilizados</b>	<b>40</b>
4.1.1	Cimento Portland	40
4.1.2	Agregado miúdo	41
4.1.3	Água	41
4.1.4	Resíduo de vidro	41

<b>4.2 Métodos</b>	<b>41</b>
4.2.1 Beneficiamento do resíduo de vidro	41
4.2.2 Caracterização física das matérias-primas	42
4.2.2.1 Massa específica	42
4.2.2.1.1 Massa específica dos agregados	42
4.2.2.2 Análise Granulométrica dos agregados	43
4.2.3 Obtenção da argamassa	44
4.2.4 Ensaio no estado fresco	45
4.2.4.1 Tempo de pega	45
4.2.5 Absorção de Água, índice de vazios e massa específica	46
4.2.6 Ensaio mecânico de compressão	47
4.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	48
4.2.8 Análise de variância (ANOVA)	48
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>49</b>
<b>5.1 Caracterização Física das matérias primas</b>	<b>49</b>
5.1.1 Massa específica	49
5.1.1.2 Massa específica dos agregados	49
5.1.2 Análise granulométrica dos agregados	50
<b>5.2 Ensaio no estado fresco</b>	<b>52</b>
5.2.1 Tempo de pega	52
<b>5.3 Ensaio Físicos</b>	<b>54</b>
5.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica	54
<b>5.4 Ensaio mecânico de compressão</b>	<b>56</b>
<b>5.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b>	<b>59</b>
<b>5.6 Análise de variância (ANOVA)</b>	<b>62</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>66</b>
<b>7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>68</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A intensificação da geração de resíduos de vidro e os impactos ambientais associados à extração de matérias-primas e à produção de cimento, têm impulsionado pesquisas por soluções mais sustentáveis na construção civil (Sindicato nacional da indústria do cimento 2023 relatório anual annual report). Nesse cenário, a incorporação de resíduo de vidro em argamassas destaca-se como alternativa viável para reduzir o consumo de recursos naturais e as emissões de CO<sub>2</sub>, considerando que a indústria cimenteira figura entre as principais responsáveis por essas emissões (Horszczaruk; Brzozowski, 2019). Na literatura é indicado que a substituição parcial de cimento ou agregados por resíduos industriais ou urbanos pode diminuir o consumo energético e os impactos ambientais, além de promover a valorização de frações de vidro que ainda são destinadas a aterros sanitários (Lopez; Charbel el-fata, 2024).

Em escala mundial, a utilização de vidro moído ou fragmentado em argamassas e cimentos tem sido investigada com diferentes proporções de substituição, frações granulométricas e tipologias de ensaios, visando avaliar suas propriedades físico-mecânicas e desempenho ao longo do tempo (Benyahia; Salhi; Boubekour, 2022), (Ogrodnik *et al.*, 2024). Essa motivação ambiental e tecnológica torna o tema central para a pesquisa atual, sendo pertinente também ao contexto brasileiro, considerando a disponibilidade de resíduos e a demanda por materiais mais sustentáveis.

A literatura recente sobre argamassas com resíduo de vidro destaca que, quando o resíduo é finamente moído e aplicado como substituto parcial do cimento, observam-se melhorias ou efeitos aceitáveis em propriedades mecânicas, desde que em baixas proporções (Bameri *et al.*, 2025). Em estudos com substituição de 5 % em massa de cimento por vidro em pó, verificou-se melhoria no desempenho das argamassas em termos de densidade e resistência à flexão (Nagrockiené, Barkauskas 2021). Em contrapartida, em proporções mais elevadas, de 10 % a 30 % ou mais em massa, geralmente observa-se redução das resistências mecânicas ou das propriedades de trabalhabilidade das argamassas ou concretos (Zhang *et al.*, 2021). Em estudos foi verificado que argamassas com 10 %, 20 % e 30 % em massa de vidro apresentaram redução de 26 % na resistência à flexão e de 18 % na compressão para 10 % de vidro, e até 30 % e 24 % para 20 % de vidro, respectivamente, em relação a argamassa de referência (Ogrodnik, *et al.*, 2024). Outro aspecto estudado é o comportamento frente a reação álcali-sílica, que ocorre quando o resíduo de vidro atua como agregado fino. Pesquisas recentes apontam que a forma, granulometria, tratamento e proporção do vidro são fundamentais para controlar a reação

(Mokoni, Ekolu, Quainoo *et al.*, 2019). Além disso, investigações sobre durabilidade, microestrutura, absorção de água, comportamento a elevadas temperaturas e resistência a ciclos de gelo-degelo têm sido realizadas, todos indicadores relevantes para a viabilidade tecnológica do material (Sedaghatdoost *et al.*, 2021).

Embora diversos estudos apresentem resultados promissores, ainda existem lacunas relevantes que justificam a presente pesquisa. A maioria das investigações concentra-se em concretos, enquanto as argamassas, sobretudo as de revestimento e assentamento, permanecem pouco exploradas, especialmente em contextos tropicais e com materiais brasileiros. Fatores como a granulometria, a forma e o tipo do vidro, além da proporção de substituição, variam amplamente entre os trabalhos, o que dificulta a comparação e a definição de parâmetros de aplicação. Ademais, propriedades tecnológicas essenciais das argamassas com resíduo de vidro, como trabalhabilidade, aderência, resistência mecânica, permeabilidade e estabilidade dimensional, ainda demandam avaliação sistemática (Bekerè; Malaiškienė, 2025).

Diante disso, o objetivo deste estudo consiste em investigar as propriedades tecnológicas de argamassas com diferentes teores de resíduo de vidro, avaliando características no estado fresco e no estado endurecido, além de analisar a influência da granulometria e proporção de substituição do vidro no desempenho mecânico, buscando definir recomendações de uso viável.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o comportamento físico e mecânico de argamassas à base de cimento Portland produzidas com diferente teores de substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro, de modo a verificar seu potencial de aplicação na construção civil.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Obtenção da argamassa com percentuais de substituição do agregado miúdo de areia por resíduo de vidro em 10, 20, 30 e 40% de resíduo de vidro, a fim de verificar como o aumento de teor de vidro influencia a composição e o comportamento do material;
- Realizar as caracterizações físicas de absorção de água, índice de vazios e massa específica, com o propósito de identificar alterações na porosidade e na estrutura interna das argamassas decorrentes da substituição pelo resíduo de vidro;
- Realizar a caracterização mecânica por compressão da argamassa em todos os teores de substituição da areia comercial pelo resíduo de vidro, buscando compreender o quanto o teor de vidro afeta a resistência mecânica e o potencial de aplicação do material na construção civil;
- Avaliar o desempenho da argamassa no estado fresco, através do ensaio de vicat, em todos os percentuais de substituição;
- Avaliar o aspecto da fratura dos corpos de prova por Microscopia eletrônica de Varredura (MEV);
- Avaliar estatisticamente os resultados obtidos mecanicamente.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Argamassa**

##### **3.1.1 Características da Argamassa**

A argamassa é uma mistura amplamente utilizada na construção civil, composta por aglomerantes inorgânicos, como cimento e cal, agregados miúdos, geralmente areia, e água (Silva, 2023). Essa composição pode incluir aditivos e adições com o objetivo de melhorar as suas determinadas propriedades, como a trabalhabilidade, aderência, impermeabilidade, retração e resistência mecânica à tração na flexão, e à compressão. Seu uso se dá principalmente no assentamento de tijolos e blocos, em revestimento de superfícies e na regularização de bases, sendo essencial para a solicitação mecânica desejada e durabilidade das edificações (Kubica, Galman 2022; Salustio *et al.*, 2022).

Entre as características fundamentais da argamassa, destaca-se a trabalhabilidade, que se refere à facilidade de manuseio e aplicação no estado fresco. A eficácia da trabalhabilidade é essencial para garantir que a argamassa se espalhe de maneira uniforme e adequada sobre as superfícies, facilitando o acabamento desejado (Liu *et al.*, 2024).

A resistência mecânica da argamassa é uma propriedade determinante para sua durabilidade, sendo influenciada diretamente pela relação água/cimento, pela granulometria do agregado e pelo tempo de cura, pela distribuição do tamanho de grão que afeta o empacotamento das partículas, a porosidade e a ligação entre as mesmas, enquanto o tempo de cura é incisivo para a completa reação de hidratação do cimento, que gera a resistência mecânica (Zhao *et al.*, 2023; Kaptan, 2025). Após o endurecimento, a argamassa deve ser capaz de suportar tensões mecânicas sem sofrer degradação precoce, o que é essencial para a segurança estrutural da construção (Subramanian *et al.*, 2024).

A retração da argamassa, que ocorre devido à perda de água durante o processo de cura, pode resultar em fissuração, comprometendo seu desempenho mecânico, sendo um fator comum, como a água, na formação da resistência, impactada diretamente pela hidratação, quanto a origem das patologias, devido a retração (Alhamaydeh; Maky; Elkafrawy *et al.*, 2023; Ferrández *et al.*, 2024). Outro fator relevante é a impermeabilidade da argamassa, que influencia diretamente na proteção das edificações contra a umidade. Uma argamassa com alto coeficiente de absorção de água pode permitir a infiltração de umidade, ocorrendo por conta dos poros da argamassa que se saturam com água, criando um caminho para a umidade se mover e penetrar na estrutura da parede através do efeito da capilaridade, favorecendo o surgimento de patologias como eflorescências e desagregações (Aceituno *et al.*, 2023). O controle desse parâmetro pode

ser realizado por meio da escolha de aditivos hidrofugantes e do uso de aglomerantes adequados (Humad *et al.*, 2023). Por fim, a plasticidade da argamassa, que está relacionada à sua capacidade de se deformar sem ocorrer segregação dos componentes, é um fator essencial para a facilidade de aplicação e para a uniformidade do revestimento, uma argamassa com boa plasticidade reduz o esforço necessário para sua aplicação e contribui para um acabamento mais homogêneo (Ruano *et al.*, 2024; Grandes *et al.*, 2021).

A retração plástica, observada nas primeiras horas após o assentamento, é amplificada por fatores como baixa umidade relativa do ar, vento intenso e altas temperaturas superficiais, que aceleram a evaporação da água da mistura (Kannan, Al-Kutti, 2022). Por outro lado, a retração por secagem ocorre em idades mais avançadas, causada pela saída lenta da água dos poros capilares do cimento hidratado, levando à contração estrutural, em ambos os casos, o controle da retração é fundamental para evitar a formação de fissuras estruturais e não estruturais, que comprometem a aderência do revestimento e favorecem a penetração de umidade e agentes agressivos, acelerando o processo de degradação (Long *et al.*, 2023).

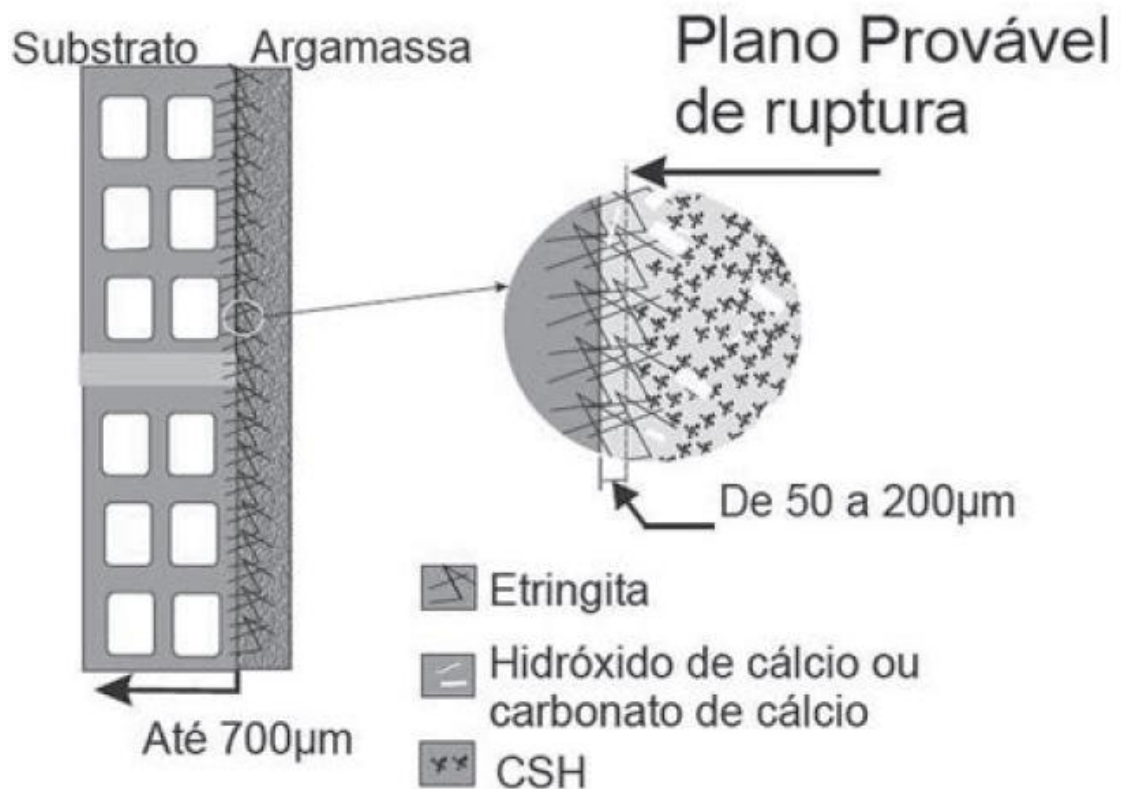
A compreensão detalhada das propriedades da argamassa é indispensável para o controle de qualidade e desempenho das construções, uma vez que cada característica física e mecânica está diretamente relacionada à durabilidade e funcionalidade do sistema construtivo. A trabalhabilidade, sendo uma delas, é a propriedade que expressa a facilidade de misturar, aplicar e adensar a argamassa no estado fresco (Chen *et al.*, 2020). Essa característica depende fortemente da consistência da mistura e da retenção de água, fatores que influenciam o tempo de manuseio e o acabamento superficial (Gutiérrez *et al.*, 2024; Mehdizadeh *et al.*, 2021). A retenção de água adequada é fundamental para garantir hidratação uniforme e boa aderência, sendo que valores muito baixos comprometem a coesão, enquanto valores excessivos dificultam a ancoragem da argamassa no substrato (Marvila *et al.*, 2021). Outros autores também destacam que a trabalhabilidade ideal é obtida pelo equilíbrio entre fluidez e coesão, permitindo a aplicação contínua e uniforme do revestimento (Mondal *et al.*, 2022).

A aderência é outra propriedade essencial da argamassa, sendo a responsável pela fixação entre o material e o substrato, essa propriedade resulta de uma combinação de efeitos físicos, químicos e mecânicos, influenciada pela absorção de água da base, rugosidade da superfície e composição da mistura (Guerroui; Benouis, 2023). A resistência de aderência é fortemente afetada pelo tipo de acabamento e pela orientação solar da fachada, sendo que mais de 60% dos ensaios realizados em argamassas de revestimento não atingiram o valor mínimo exigido em norma (Salustio *et al.*, 2022). Além disso, estudos reforçam que a correta preparação da base e a compatibilidade entre substrato e argamassa são determinantes para evitar

destacamentos e fissuras, garantindo a durabilidade do sistema construtivo (Kubica & Galman, 2022).

Na figura 1, observa-se um fator importante durante o processo de aderência em argamassas, onde apresenta-se a zona de transição interfacial (ZTI) entre o substrato (geralmente o concreto ou outro material base) e a argamassa de revestimento, uma região crítica para o desempenho mecânico e a durabilidade do sistema. Essa zona, caracteriza-se por uma microestrutura heterogênea e distinta da matriz da argamassa, devido à maior relação água/cimento local e à deposição seletiva de produtos de hidratação (Scrivener *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2021).

Figura 1 — Ligação dos cristais de etringita com a interface.



Fonte: Carasek; Cascudo; Scartezini, (2001).

Pode-se observar também a presença de etringita, hidróxido de cálcio (ou carbonato de cálcio em função da carbonatação superficial) e C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que são os principais compostos resultantes da hidratação do cimento Portland. O C-S-H constitui a fase responsável pela coesão e resistência da pasta, enquanto o hidróxido de cálcio atua como um subproduto mais cristalino e menos denso, podendo fragilizar a ZTI (Mehta; Monteiro, 2014; Zhang *et al.*, 2020).

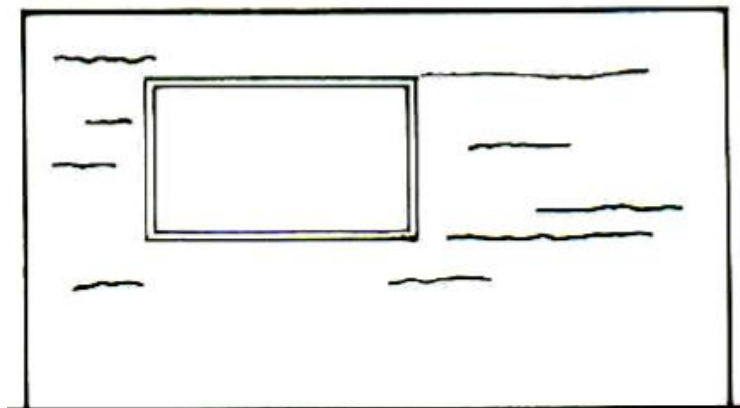
O plano provável de ruptura da interface, que indica a região onde há acúmulo de cristais de etringita e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , acabam reduzindo a aderência e favorecem a fissuração sob tensões mecânicas ou térmicas. Essa concentração de compostos menos densos e com menor ligação química explica a ocorrência comum da falha de adesão que ocorre na interface e se ausenta na massa da argamassa (Quarcioni *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2023).

A resistência mecânica representa a capacidade da argamassa endurecida de suportar esforços de compressão, tração e flexão sem apresentar falhas estruturais. Essa propriedade está diretamente ligada à relação água/cimento, à granulometria dos agregados e às condições de cura (Zhao *et al.*, 2023). Demais autores demonstraram que a resistência de argamassas com agregados reciclados finos varia significativamente em função da absorção de água e da porosidade, destacando a importância do empacotamento das partículas e da densidade da microestrutura (Martínez-García *et al.*, 2021). Outros autores, complementam que a cura adequada promove a hidratação completa do cimento, resultando em maior resistência e estabilidade volumétrica ao longo do tempo (Subramanian *et al.*, 2024).

Existem diversas manifestações patológicas, entre elas as fissuras horizontais e as fissuras mapeadas que estão diretamente relacionadas às propriedades fundamentais da argamassa e às condições de execução e exposição (Miloš Drdácý *et al.*, 2024). Essas fissuras representam respostas físicas do material às variações volumétricas e às tensões internas que podem surgir ao longo do tempo, influenciadas por fatores como trabalhabilidade, retração, aderência e impermeabilidade (Grassl; Wong; Buenfeld, 2009).

Na figura 2, é apresentada fissuras horizontais ocasionadas no bloco de assentamento revestido pela argamassa.

Figura 2 — Fissura horizontal na argamassa de revestimento.



Fonte: Thomaz (1990).

Na figura 2, é possível observar as fissuras horizontais, que apresenta falhas possivelmente associadas à perda de aderência entre a argamassa e o bloco de assentamento, situação comum quando há diferença significativa entre as taxas de absorção de água dos materiais ou quando a cura é insuficiente, essa descontinuidade mecânica cria zonas de concentração de tensões, especialmente nas interfaces, levando ao surgimento de fissuras paralelas ao plano de aplicação (Quarcioni *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2023).

Na figura 3, é apresentada fissuras mapeadas com trincas iniciais nos cantos superiores.

Figura 3 — Fissura Mapeada.



Fonte: Cerâmica roja (2006).

Na fissura mapeada, evidenciada na figura 3, revela um comportamento típico de retração plástica e por secagem. Esse tipo de trinca, caracterizado por um padrão irregular semelhante à pele de crocodilo, decorre da rápida evaporação da água superficial antes da completa hidratação do cimento, especialmente em condições de alta temperatura e baixa umidade relativa (Silva *et al.*, 2022). Nessa fase, a argamassa ainda fresca sofre contração sem que haja resistência interna suficiente para conter o movimento das partículas, originando a rede de microfissuras interconectadas (Kannan, Al-Kutti, 2022).

As fissuras horizontais e mapeadas representam manifestações diretas das propriedades da argamassa e de sua interação com o meio. Enquanto as fissuras horizontais indicam problemas de aderência e resistência, as fissuras mapeadas traduzem efeitos de retração plástica, agravada por condições ambientais adversas e controle inadequado da cura. A compreensão dessas relações é essencial para o diagnóstico de patologias e para o aprimoramento das formulações e técnicas de aplicação, garantindo maior durabilidade e desempenho dos sistemas de revestimento (Szelağ, 2020).

As fissuras de retração podem se manifestar em diferentes formas, dependendo da distribuição das tensões e das condições ambientais. As chamadas fissuras mapeadas, caracterizadas por uma rede irregular e aleatória de trincas finas, estão associadas à retração plástica que ocorre quando a evaporação da água superficial é mais rápida que a reposição da água de exsudação, levando à separação das partículas cimentícias (Silva *et al.*, 2022).

A impermeabilidade da argamassa está relacionada à sua capacidade de resistir à penetração de água e agentes agressivos, as argamassas muito porosas facilitam o surgimento de patologias como eflorescências e destacamentos, uma vez que os poros permitem a ascensão capilar da umidade (Aceituno *et al.*, 2023). Outros autores verificaram que o uso de nanopartículas e adições minerais, como cinza de casca de arroz, reduz significativamente a permeabilidade e a absorção de água, promovendo maior densificação da microestrutura (Grandes *et al.*, 2021). Da mesma forma, relatórios técnicos confirmam que aditivos viscosificantes alteram a distribuição de poros e aumentam a resistência à penetração de água, melhorando o desempenho frente a ciclos de molhagem e secagem (P. Maravelaki-Kalaitzaki *et al.*, 2023).

### 3.1.2 Componentes da argamassa

Cada componente da argamassa exerce uma função específica na mistura, sendo fundamental compreender suas características para a obtenção de argamassas com desempenho adequado.

O ligante é o elemento responsável por promover a coesão entre as partículas da argamassa e a adesão ao substrato. Os ligantes mais comuns são o cimento Portland e a cal hidratada, podendo ser utilizados isoladamente ou em combinação. O cimento Portland que é um ligante hidráulico devido a sua capacidade de endurecer por reações químicas em contato com a água, formando uma massa que confere resistência mecânica e durabilidade à argamassa endurecida, enquanto a cal contribui para a plasticidade e a retenção de água no estado fresco, além de reduzir a fissuração por retração devido ao seu comportamento mais dúctil (Silva *et al.*; 2021; Pavia; Brennan, 2018).

Os agregados miúdos, geralmente areias naturais ou artificiais, desempenham a função de esqueleto granular, conferindo estabilidade dimensional à mistura, reduzindo a retração e contribuindo para o preenchimento do volume, o que possibilita economia de ligante. A granulometria e a forma das partículas de areia influenciam diretamente a trabalhabilidade, a permeabilidade e a resistência da argamassa (Li *et al.*, 2021; Burgmann, Breit 2023).

A água, por sua vez, é indispensável para iniciar as reações químicas de hidratação do cimento, além de proporcionar a plasticidade necessária para o manuseio e a aplicação da argamassa. O teor de água deve ser rigorosamente controlado, uma vez que o excesso prejudica a resistência mecânica e aumenta a porosidade do material endurecido (Kim *et al.*, 2014).

Por fim, a utilização de aditivos e adições minerais tem se intensificado como estratégia para aprimorar as propriedades das argamassas, adequando-as a requisitos específicos de desempenho. Aditivos incorporadores de ar podem ser um exemplo de aumento de trabalhabilidade e elevam a resistência de ciclos de gelo e degelo, os retardadores são empregados para controlar o tempo de pega, enquanto adições minerais como metacaulim, cinza volante ou resíduos reciclados, contribuem para reduzir impactos ambientais e simultaneamente, melhorar determinadas características técnicas. (Oliveira *et al.*, 2023).

## **3.2 Matérias Primas da Argamassa**

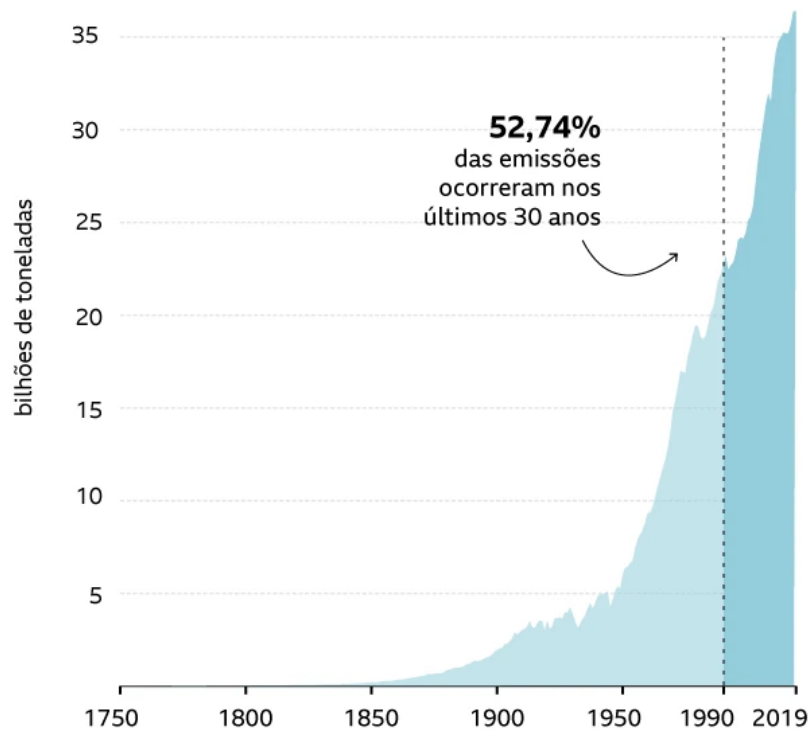
### **3.2.1 Cimento Portland**

O cimento Portland é o principal material aglomerante utilizado na construção civil, sendo responsável pela coesão e resistência mecânica de concretos e argamassas. Sua produção envolve a calcinação de matérias-primas ricas em carbonato de cálcio e silicatos a altas temperaturas, resultando no clínquer, que é posteriormente moído e combinado com gesso e outras adições minerais. Devido às suas propriedades hidráulicas, o cimento Portland endurece e desenvolve resistência em contato com a água, tornando-se um dos materiais mais versáteis e amplamente empregados na engenharia civil (Neville, Brooks, 2021).

Entre suas principais vantagens, destacam-se a alta resistência mecânica, a boa durabilidade, a disponibilidade global e a compatibilidade com diversos agregados e aditivos, o que permite sua aplicação em diferentes tipos de obras, desde estruturas simples até sistemas estruturais complexos (Scrivener; Juilland; Monteiro, 2015). Além disso, o cimento Portland apresenta excelente capacidade de moldagem e aderência, possibilitando ampla adaptabilidade no campo da construção (Liu; Bameri, 2025).

No entanto, seu uso apresenta desvantagens relevantes do ponto de vista ambiental e de desempenho. O processo de fabricação do clínquer é altamente intensivo em energia e responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, devido à queima de combustíveis fósseis e à decomposição do calcário (IEA, 2023).

Na figura 4, é apresentado a emissão de CO<sub>2</sub> ocasionada nos últimos anos, dando ênfase aos últimos trintas anos.

Figura 4 — Emissões totais de CO<sub>2</sub>.

Fonte: Global carbon project.

Ademais, o cimento Portland apresenta propensão à retração e fissuração durante o processo de cura, o que pode comprometer a durabilidade das estruturas se o controle tecnológico não for adequado (Giroto; Barbosa; Geraldo, 2014). Também pode ocorrer redução da resistência em ambientes agressivos, como os que apresentam sulfatos, cloretos ou variações térmicas elevadas, que favorecem processos de deterioração (Liu *et al.*, 2023).

Em razão desses fatores, a busca por materiais alternativos e adições minerais, como cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica ativa e resíduo de vidro tem crescido significativamente. Esses materiais contribuem para reduzir a pegada de carbono e melhorar a microestrutura do cimento, promovendo desempenho técnico (Negin Marandi; Shararsh Shizad, 2025).

O cimento Portland é composto principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio, cujas proporções variam de acordo com a formulação desejada. Os principais compostos presentes no cimento são:

Tabela 1 — Principais compostos do cimento.

<b>Composto</b>	<b>Fórmula</b>
Alite	$C_3S$
Belita	$C_2S$
Aluminato tricálcico	$C_3A$
Ferri-aluminato tetracálcico	$C_4AF$

Fonte: Adaptado de V. bindiganavile; M. Hoseini (2008).

A Alite, se torna responsável pelo desenvolvimento inicial de resistência mecânica, já a Belita contribuirá para uma resistência a longo prazo (Scrivener *et al.*, 2020). O aluminato tricálcico reage rapidamente com a água e influenciará na trabalhabilidade da argamassa, podendo reduzir a durabilidade devido à suscetibilidade a sulfatos (Cunha *et al.*, 2021). Por sua vez o Ferri-aluminato tetracálcico irá conferir coloração e menor impacto na resistência mecânica do material (Souza; Ferreira, 2020).

O processo de fabricação do cimento Portland segue as seguintes etapas principais:

1. Extração e preparação das matérias-primas: O calcário e a argila são extraídos, triturados e misturados em proporções adequadas (Panagoda *et al.*, 2023)
2. Pré-homogeneização e moagem crua: Os materiais são moídos e misturados de forma homogênea (Siame *et al.*, 2024).
3. Clínquerização: A mistura é levada a fornos rotativos a temperaturas em torno de  $1.450^{\circ}C$ , onde ocorre a formação dos compostos cimentícios e a produção do clínquer (Akramjonovich & Jaksilikovna, 2025).
4. Moagem do clínquer: O clínquer é resfriado e moído com gesso (para controle do tempo de pega) e, em alguns casos, adições minerais (Junaid *et al.*, 2024).
5. Armazenamento e distribuição: O cimento finalizado é estocado e distribuído em sacos ou a granel (EMEP/EEA 2023).

A Figura 5, apresenta-se um fluxograma que sintetiza os processos de obtenção do cimento convencional do mercado.

Figura 5 — Fluxograma de obtenção do cimento.



Fonte: The Engineering Community (2018).

O processo de hidratação do cimento Portland envolve uma série de reações químicas que resultam na formação de um material endurecido (Pacheco *et al.*, 2021). As reações principais incluem:

Hidratação da Alite ( $C_3S$ ) e da Belita ( $C_2S$ ): Consistindo na formação do gel de Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), responsável pela resistência mecânica e na produção de portlandita ( $Ca(OH)_2$ ), que confere alcalinidade ao concreto e argamassa, contribuindo para a passivação (Silva; Costa, 2023).

Hidratação do  $C_3A$  e do  $C_4AF$ : Atuando na formação de aluminatos hidratados, como etringita e monossulfatoaluminato, que afetam a estabilidade volumétrica e a resistência química do material. A resistência mecânica do cimento Portland aumenta com o tempo, sendo influenciada pela relação água/cimento, pelas condições de cura e pela presença de adições minerais (Mehta & Monteiro, 2020).

### 3.2.1.1 Classificação e Tipos de Cimento Portland

No Brasil, os tipos de cimento Portland são regulamentados pela norma ABNT NBR 16697 (2018) - Cimento Portland: requisitos, que estabelece as características físico-químicas mínimas para cada classe e suas respectivas aplicações. Essa normatização segue padrões

equivalentes aos adotados em outros países, como a norma americana ASTM C150 (2020) ou a europeia EN 197-1, e tem por objetivo garantir segurança, durabilidade e desempenho adequado das obras de engenharia.

A seguir, apresenta-se a Tabela 2, com os principais tipos de cimento Portland previstos pela legislação brasileira, suas composições e usos típicos.

Tabela 2 – Principais tipos de cimento portland.

<b>Tipos de Cimento Portland</b>	<b>Componentes</b>	<b>Utilização</b>
CP I Comum	Sem adições minerais significativas	Para concretos e argamassas de uso geral
CP II Composto	Escória de alto-forno, pozolanas ou filler calcário	Para usos com melhor durabilidade e sustentabilidade
CP III de Alto-Forno	Até 70% de escória de alto-forno	Para maior resistência a ataques químicos e durabilidade
CP IV Pozolânico	Pozolanas	Para reduzir a permeabilidade do concreto
CP V de Alta Resistência Inicial	Clínquer com dosagens específicas	Para pré-moldados e concretagem rápidas
Cimentos Especiais		Para condições ambientais severas

Fonte: Aatoria (2025).

Cada tipo de cimento apresenta características distintas que devem ser compatibilizadas com as condições específicas de uso. O CP I é recomendado para obras em condições normais de exposição, quando não há necessidade de propriedades especiais de durabilidade ou de resistência inicial elevada, sendo indicado para concretos e argamassas de uso geral. Já o CP II, com adições minerais moderadas, apresenta menor permeabilidade e maior durabilidade, o que o torna mais adequado para estruturas sujeitas a ambientes moderadamente agressivos. O CP III, de alto-forno, destaca-se pelo elevado teor de escória, proporcionando concretos com excelente resistência a agentes agressivos, baixo calor de hidratação e elevada durabilidade, características ideais para grandes volumes e ambientes extremamente agressivos. O CP IV, com pozolanas, também confere elevada impermeabilidade e resistência química, sendo largamente empregado em obras hidráulicas, barragens e fundações em solos com teores elevados de sulfatos. Por sua vez, o CP V oferece rápido ganho de resistência nos primeiros dias de cura, o que favorece sua aplicação em pré-moldados e em situações que exigem

execução em climas frios (Mehta; Monteiro; 2014) . Os cimentos especiais atendem demandas específicas, como resistência a sulfatos em ambientes marinhos, baixo calor de hidratação para concretagens maciças ou estética diferenciada com o uso de cimento branco (Helene; Pereira 2015).

Além das vantagens técnicas, a incorporação de adições minerais, como escória de alto-forno e pozolanas aos cimentos compostos, contribui para reduzir o impacto ambiental associado à produção de cimento Portland, diminuindo a emissão de dióxido de carbono por tonelada de produto fabricado (Santos, 2021). Esse efeito positivo decorre da menor necessidade de clínquer, cuja produção é responsável pela maior parcela das emissões do setor. Assim, o emprego adequado de cimentos com adições minerais não apenas aumenta a durabilidade e o desempenho do concreto, mas também colabora para metas de sustentabilidade ambiental (Justnes; Nygard; Ostnor, 2020).

### 3.2.2 Agregados

Os agregados são componentes fundamentais das argamassas, responsáveis por conferir volume, estabilidade e resistência mecânica à mistura. Por ocuparem a maior parte do volume total, cerca de 70% a 80%, sua correta seleção é essencial para garantir as propriedades tecnológicas desejadas do produto final (Neville; Brooks, 2019). Além de reduzirem o custo do material ao substituir parte do ligante, os agregados também contribuem para a estabilidade dimensional e para a resistência à fissuração das argamassas (Oliveira *et al.*, 2021). A adequada granulometria e proporção dos agregados permite controlar as deformações por retração e distribuir tensões internas, prevenindo o surgimento de fissuras (Martins; Almeida, 2022).

#### 3.2.2.1 Classificação dos agregados

Os agregados utilizados na construção civil podem ser classificados de acordo com sua granulometria, origem e forma dos grãos (Santos *et al.*, 2021). Quanto à granulometria, podem ser classificados como agregados miúdos, com partículas menores que 4,75 mm, caso das areias naturais, artificiais e pó de pedra, amplamente utilizados em argamassas por conferirem coesão e plasticidade à mistura (ABNT NBR NM52 2013). Já os agregados graúdos apresentam dimensões superiores e são mais comuns em concretos estruturais, enquanto agregados ultrafinos, como cinzas volantes e sílica ativa, são utilizados para melhorar a compacidade e a densidade da matriz (Ferreira; Moura, 2023). Quanto à origem, podem ser naturais, extraídos

diretamente de jazidas e leitos de rios após peneiramento e lavagem; reciclados, obtidos a partir de resíduos sólidos urbanos e industriais como o concreto demolido, escória e vidro moído; ou artificiais, fabricados industrialmente, como argila expandida, perlita e vermiculita (Cunha *et al.*, 2020). A forma das partículas também influencia o desempenho da argamassa: grãos arredondados favorecem a trabalhabilidade, enquanto grãos angulosos melhoram o intertravamento e a resistência mecânica; partículas alongadas ou laminadas são indesejáveis por comprometerem a coesão e a homogeneidade da mistura e as propriedades mecânicas (Burgmann, Breit 2023; Ali *et al.*, 2023; Haddad *et al.*, 2020).

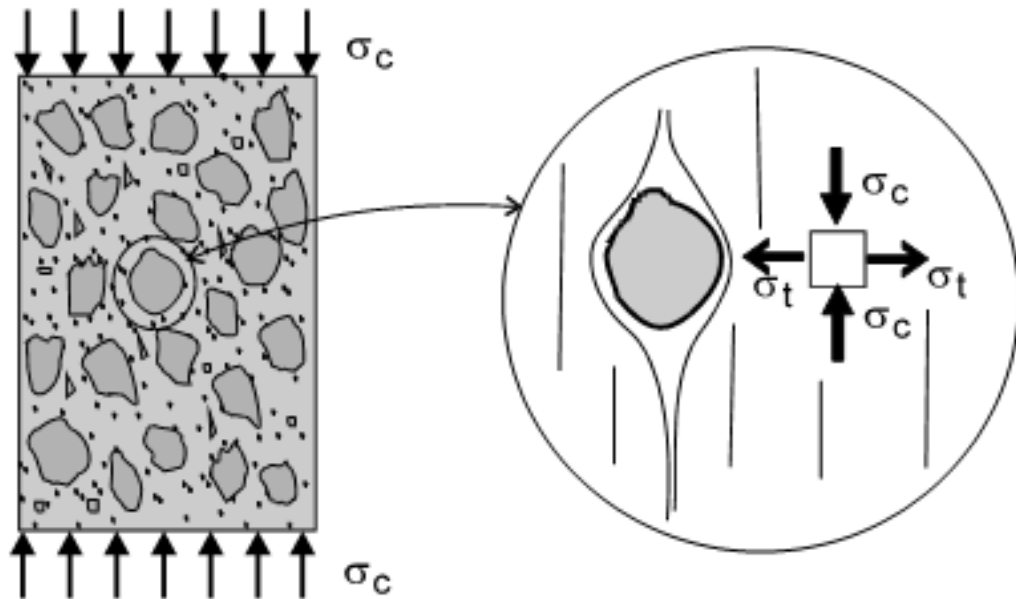
### 3.2.2.2 Propriedades dos agregados

As propriedades físicas, químicas e mecânicas dos agregados têm papel determinante no desempenho das argamassas (Santos *et al.*, 2021). A granulometria deve ser bem graduada para reduzir os vazios, aumentar a compacidade e diminuir o consumo de ligante e de água, além de evitar segregação e retração excessiva (Almeida; Rocha, 2022). A massa específica dos agregados impacta a densidade da argamassa final, e sua absorção de água deve ser baixa para que a quantidade de água disponível para hidratação do cimento não seja comprometida (Costa *et al.*, 2023). Além disso, os agregados devem ser isentos de impurezas como materiais orgânicos, argilas ou sais, que podem prejudicar a aderência entre os componentes e reduzir a durabilidade da argamassa (Pereira; Moura, 2020).

Os agregados cumprem múltiplas funções dentro da composição das argamassas. Além de preencherem o volume da mistura e reduzirem o consumo do ligante, eles melhoram a resistência mecânica ao transferirem as tensões na matriz cimentícia e aumentam a estabilidade dimensional ao reduzirem a retração (Ferreira; Oliveira, 2021). Também ajudam a limitar a formação de fissuras e conferem maior resistência ao desgaste, além de reduzir significativamente o custo final do produto, já que o cimento é substituído por um material mais barato e abundante (Nascimento *et al.*, 2022).

Na figura 6, é apresentado a distribuição de agregados na matriz cimentícia.

Figura 6 — Estrutura interna da matriz cimentícia.



Fonte: Civil, 2025.

O tamanho máximo e a forma geométrica das partículas de agregado exercem influência determinante sobre a trajetória de fissuração, a tenacidade e a energia de fratura de argamassas e concretos em particular, partículas maiores e mais irregulares (menos convexas) favorecem o desvio da fissura, bifurcação e maior consumo de energia no processo de fratura, enquanto partículas muito pequenas ou esféricas reduzem essa interação, resultando em menor tenacidade (Wei *et al.*, 2020).

No formato angular ou áspera do agregado, há um aumento do intertravamento e a resistência da interface matriz-agregado, promovendo mecanismos de arrancamento ou fratura de partícula em vez de uma trinca evidente na matriz (Ribeiro *et al.*, 2011). Em contrapartida, o controle inadequado do tamanho, pode gerar, agregados muito grandes ou com má aderência, podendo ocasionar concentrações de tensões, fissuração precoce na zona de transição (ZT) e queda de desempenho global (Sandeep Kumar Dubey; Ray, 2023). Portanto, a escolha de uma distribuição granulométrica adequada, seja o tamanho máximo compatível com a escala da argamassa ou forma favorável das partículas constitui um fator crítico para incrementar a resistência à fratura e a durabilidade das matrizes cimentícias.

### 3.2.2.3 Impactos ambientais da extração de agregados naturais

A extração em larga escala de agregados naturais como areia, cascalho e brita, tem se mostrado um dos maiores desafios ambientais da construção civil contemporânea. Embora esses materiais sejam fundamentais para a produção de argamassas, concretos e outros elementos construtivos, seu aproveitamento sistemático gera consequências ambientais substanciais que ultrapassam o âmbito técnico e atingem ecossistemas, comunidades humanas e a infraestrutura de regeneração da natureza (Santos; Fraile; Ferreira, 2025).

Inicialmente, a retirada de sedimentos de leitos de rios, margens fluviais e zonas costeiras provoca a erosão acelerada de margens, o aprofundamento e alargamento de canais, a alteração dos regimes naturais de sedimentação e até mesmo a perda de vegetação ripária. Esse processo compromete a estabilidade das margens e reduz a capacidade de retenção hídrica e de regulação de cheias das bacias (Wiejaczka *et al.*, 2018; De *et al.*, 2022). A deposição irregular de sedimentos e a alteração da morfologia fluvial causam, além disso, impactos diretos na biodiversidade aquática como em peixes, macro invertebrados e vegetação de ribanceira são severamente afetados (Environmental impact of aggregate mining & dredging UKGBC, 2024; Khyati Poonia; Kansara; Choudhary, 2024).

No que diz respeito à qualidade da água e aos recursos hídricos, esse tipo de extração contribui para o aumento da turbidez, a suspensão de sólidos e contaminantes, a redução da profundidade do lençol freático e o risco de intrusão salina em zonas costeiras ou estuarinas (Whiting; North, 2023). Essas alterações afetam diretamente o abastecimento de água para consumo humano e para atividades agrícolas, especialmente em comunidades ribeirinhas ou costeiras dependentes dos ecossistemas locais (Sand The Hidden Risk In Your Supply Chains TDi Sustainability, 2025).

Além disso, a mineração de agregados naturais implica transformação da paisagem terrestre e remoção de cobertura vegetal, acarretando perdas de habitat, degradação de solo e diminuição na infiltração de águas pluviais. A compactação do solo residual e a exposição da rocha ou sedimento favorecem processos erosivos e assoreamento de cursos d'água (Vijerathne; Wahala; Illankoon, 2024; Sebben; Savaris; Lindino, 2024).

Do ponto de vista das emissões de gases de efeito estufa (EGE) e da pegada de carbono da cadeia de produção, o transporte de grandes volumes de material (areia/carregamentos de caminhões) e o uso intensivo de maquinaria geram liberação significativa de CO<sub>2</sub> e outros poluentes atmosféricos. Estima-se que os impactos da extração de agregados contribuam de

forma relevante para o consumo de energia fóssil e para categorias de impacto ambiental como escassez de recursos fósseis e acidificação do solo (De Bortoli, 2023).

No âmbito social e regulatório, impactos como a remoção de recursos de comunidades locais, conflitos por direitos de exploração e degradação estética e funcional de paisagens naturais, por exemplo praias, margens de rios e áreas turísticas têm sido observados com frequência (Call for better management of coastal sand mining to halt ‘dire’ consequences, 2023).

Diante desse cenário, torna-se notório investir em alternativas sustentáveis à extração convencional de agregados naturais, como reutilização de resíduos de demolição, implementação de agregados reciclados, produção de areia artificial e adoção de economia circular no setor de construção. Estudos recentes apontam que a substituição parcial dos agregados virgens por reciclados pode reduzir até 40 % a acidificação e eutrofização atribuíveis à produção de agregados, além de diminuir a demanda por novas jazidas (Linares *et al.*, 2024; Marvila *et al.*, 2022)

Assim, a questão da extração de agregados naturais não se limita à disponibilidade técnica do material, mas exige uma abordagem sistêmica que envolva gestão ambiental, certificações, controles de impacto e inovações tecnológicas para garantir que a infraestrutura construída não comprometa os recursos e ecossistemas.

### **3.3 Resíduo de Vidro como Alternativa Sustentável**

O Brasil produz aproximadamente 1,3 milhão de toneladas de vidro por ano, com taxas nacionais de reciclagem entre 11,2% e 25% (Duarte; Correa, 2023). Estudos revelam que 3.600 toneladas foram recicladas em Curitiba em 2022, enquanto quase um bilhão de garrafas são descartadas anualmente em São Paulo, das quais cooperativas reciclam de 5,5 a 25 toneladas por mês (Diniz *et al.*, 2023), (Oliveira; Nicoletti, 2024). Na figura 7, é possível observar um cenário típico de descarte inadequado do vidro.

Figura 7 — Descarte do vidro.



Fonte: Pixel4, [s.d.]

O vidro é um dos materiais mais presentes na vida cotidiana, utilizado em embalagens, utensílios domésticos, fachadas e janelas, entre outras aplicações (Giroto; Barbosa; Geraldo, 2014). Sua produção industrial utiliza grandes quantidades de areia sílica, barrilha e calcário, processados em fornos a temperaturas elevadas (Silva; Lima, 2021). Apesar de suas vantagens funcionais, o descarte do vidro pós-consumo representa um grande desafio ambiental, pois ele é um material inerte e praticamente não biodegradável, podendo permanecer nos aterros sanitários por centenas de anos (Almeida *et al.*, 2023). Essa problemática evidencia a necessidade de adotar práticas mais sustentáveis para o gerenciamento do resíduo de vidro, alinhadas aos ODS 11, Cidades e comunidades sustentáveis, ODS 12, Consumo e produção responsáveis e ODS 13, Ação contra a mudança global do clima, propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015).

O vidro é um material sólido não cristalino (amorfo) que resulta do resfriamento de uma massa fundida de óxidos, sem permitir a cristalização regular de seus constituintes. A sua estrutura interna caracteriza-se pela ausência de ordem de longo alcance típica dos cristais, o que confere características físicas únicas (R. ravinder *et al.*, 2021; Soda-Lime Glass: Composition, Properties, and Applications, 2024).

O vidro pode ser definido como uma rede contínua de átomos em desordem que se comporta como sólido à temperatura ambiente, mas que originalmente era líquido a temperaturas elevada (Neuville, 2022).

A produção industrial do vidro, demandam várias etapas a serem seguidas, como serão apresentadas a seguir na figura 8.

Figura 8 — Fluxograma das etapas de produção do vidro.



Fonte: Adaptado de Fabris; Sabbadini; Costa (2022).

Na seleção das matérias primas, são usados predominantemente quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) como agente formador de rede, óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ou carbonato de sódio (soda ash) como fundente para reduzir a temperatura de fusão, e cal ( $\text{CaO}$ ) como estabilizador da rede de silicato (Deng *et al.*, 2024). Para a fusão, as matérias-primas são aquecidas em forno a temperaturas elevadas, tipicamente entre  $1.400\text{ }^\circ\text{C}$  e  $1.600\text{ }^\circ\text{C}$ , até a obtenção de uma massa líquida homogênea, após a fusão, ocorrem processos de refinamento para remover bolhas e inclusões (Inside chemistry, 2016; Acers bulletin, 2025).

Na formação a massa líquida é moldada ou conformada pelo processo adequado, flotação para vidro plano, laminação, moldagem por sopro ou prensagem, até chegar ao formato desejado (Alamo *et al.*, 2024). Após a conformação, o vidro é gradualmente resfriado em forno denominado lehr para eliminar tensões internas residuais, o recozimento entra como parte essencial do processo assegurando a estabilidade dimensional e evitar fraturas espontâneas por tensões internas (Zheng *et al.*, 2024). Após o recozimento, o vidro é inspecionado quanto a defeitos de superfície, cortado, pólido ou tratado conforme aplicação, em alguns casos, tratamentos químicos adicionais para reforço (Bukieda *et al.*, 2020).

As propriedades mecânicas e funcionais do vidro possuem papel determinante em sua aplicação. O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, do vidro do tipo soda-cal, situa-se normalmente entre 70 e 72 GPa, o que demonstra sua elevada rigidez mesmo sendo um material

amorfo (Glass.org, 2024). Essa característica confere ao vidro uma estabilidade dimensional considerável, embora sua estrutura desordenada o torne suscetível a falhas superficiais.

A resistência à compressão é consideravelmente alta, podendo ser superior a 1000 MPa, mas as falhas normalmente se iniciam por mecanismos intergranular e propagação de fissuras superficiais (Makeitfrom, 2024).

Em termos de dureza, o vidro soda-cal apresenta valores entre 5 e 6 na escala de Mohs, o que o classifica como um material de elevada rigidez superficial, adequado para aplicações arquitetônicas e estruturais (Continental trade, 2024). No entanto, a fragilidade inerente do vidro, decorrente de sua natureza amorfa e da presença de microfissuras, o torna sensível a tensões concentradas, reduzindo sua resistência efetiva e exigindo controle rigoroso de defeitos superficiais durante a produção (Jiang *et al.*, 2022).

Para melhorar seu desempenho, tratamentos térmicos como a têmpera são amplamente empregados, promovendo a criação de tensões compressivas nas superfícies do vidro e aumentando substancialmente sua resistência à flexão. Ensaio recentes apontam que o vidro temperado pode alcançar valores de resistência à tração até quatro a cinco vezes superiores ao vidro recozido, atingindo patamares próximos de 180 MPa (Karlsson *et al.*, 2022; Makeitfrom, 2024).

### 3.3.1 Uso sustentável do vidro

Resíduos de vidro comprovadamente têm aplicações sustentáveis na construção civil. Estudos apontam que até 20% dos resíduos de vidro podem ser incorporados à alvenaria cerâmica para atender aos padrões técnicos, e demais estudos conclui que a substituição de 5% a 10% de feldspato por resíduos de vidro plano em cerâmicas sanitárias produz resultados aceitáveis (Zaccaron *et al.*, 2019), (Cavalcanti, 2023). A infraestrutura de coleta inadequada, o baixo valor de mercado, os desincentivos econômicos e as restrições tecnológicas limitam a reciclagem.

O uso sustentável do vidro baseia-se na reciclagem e no reaproveitamento desse material como forma de minimizar os impactos ambientais decorrentes de sua produção e descarte (Abreu *et al.*, 2020). A reciclagem do vidro reduz significativamente o consumo de matérias-primas virgens e de energia, já que a fusão do caco de vidro ocorre a temperaturas mais baixas do que a fusão dos componentes primários, diminuindo também a emissão de gases de efeito estufa (Câmara Brasileira do vidro, 2022). Assim, além de evitar o envio de toneladas de

resíduos para aterros, a reciclagem contribui para a conservação de recursos naturais, beneficiando diretamente o meio ambiente (Unep, 2021).

Do ponto de vista social, a coleta e a reciclagem de vidro também fomentam a economia local, gerando emprego e renda para cooperativas de catadores e pequenas indústrias de beneficiamento, contribuindo para o alcance do ODS 8, trabalho decente e crescimento econômico (Ipea, 2021). Ao promover a reciclagem e o uso responsável do vidro, a construção civil pode integrar práticas sustentáveis à sua cadeia produtiva, reforçando seu papel estratégico no desenvolvimento sustentável (Gonçalves *et al.*, 2021).

Para que o vidro pós-consumo possa ser reutilizado de forma eficiente, ele deve passar por etapas de coleta, separação e processamento. A coleta seletiva é o primeiro passo, podendo ser feita por programas públicos, privados ou por cooperativas. Na sequência, o vidro é triado para remoção de contaminantes como metais, papéis, plásticos e cerâmicas, que comprometem sua qualidade (Abividro, 2023).

Após a triagem, o vidro é moído em granulometrias específicas conforme a finalidade da aplicação. Para a utilização em argamassas e concretos, é fundamental que a moagem produza partículas bem distribuídas e homogêneas, com dimensões que permitam sua adequada integração à matriz cimentícia. Partículas mais finas podem inclusive contribuir com efeito pozolânico, melhorando a microestrutura e a durabilidade do compósito, além de reduzir a reação álcali-sílica (RAS), (Tashima *et al.*, 2017). Esse processamento transforma um resíduo ambientalmente problemático em um insumo industrial valioso, reduzindo pressões sobre os recursos naturais e apoiando os objetivos do ODS 12 (Unep, 2021).

Além da moagem, o vidro reciclado pode ser classificado por cor ou por tipo (sódico-cálcico, borossilicato, entre outros), conforme exigências específicas de cada aplicação. No caso da construção civil, o vidro sódico-cálcico, utilizado em embalagens, é o mais comum e mais estudado como agregado alternativo para argamassas (Tashima *et al.*, 2017).

### 3.3.2 Aplicação do Resíduo de Vidro Na Construção Civil

A construção civil é responsável por uma parcela significativa do consumo de recursos naturais e da geração de resíduos sólidos em escala global (Ghosh; Chandra, 2018). Nesse cenário, a incorporação de resíduos reciclados às suas cadeias produtivas é uma estratégia prioritária para atender às demandas por sustentabilidade e responsabilidade socioambiental (Wrap, 2021). O resíduo de vidro moído tem sido estudado como substituto parcial dos

agregados miúdos em argamassas e concretos, com resultados promissores em termos técnicos e ambientais (Zhu *et al.*, 2021).

O vidro moído apresenta características granulométricas e químicas compatíveis com a areia natural, além de propriedades específicas que podem contribuir para a densificação e impermeabilização da matriz cimentícia (Pereira; Castro; Santos, 2022). Estudos demonstram que a utilização de teores adequados de vidro moído melhora a trabalhabilidade e mantém, ou até melhora, a resistência mecânica em determinadas condições, especialmente quando as partículas são suficientemente finas (Ibrahim, 2021), (Leite; Rangel, 2021), (Tamanna; Tuladhar; Sivakugan, 2020). O uso do resíduo também contribui para reduzir a reação álcali-silica quando associado a adições minerais suplementares, garantindo a durabilidade do material (Schmidt; Nascimento; Melo, 2018).

Além dos benefícios técnicos, a aplicação do vidro reciclado na construção civil promove a conservação de jazidas de areia e outras fontes naturais, reduz os impactos associados ao transporte de grandes volumes de agregados e proporciona um destino ambientalmente adequado para um resíduo urbano de difícil degradação. Essa prática reforça o compromisso do setor com os princípios do desenvolvimento sustentável e contribui diretamente para os ODS 11 e 12, ao promover cidades mais limpas, reduzir a pressão sobre aterros sanitários e integrar práticas de economia circular aos processos construtivos (Uhhabitat, 2020).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais foram realizados no laboratório de Práticas tecnológicas (LAPTEC) e no Laboratório de Caracterização dos Materiais (LCMAT) da Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará (UFPA), campus Ananindeua.

Inicialmente, houve a seleção e caracterização dos materiais constituintes, empregados na obtenção da argamassa com resíduo de vidro, seguida pela determinação do teor adequado de cada componente, de acordo com o traço selecionado. Os materiais utilizados incluíram água, cimento Portland CII F 32 que por sua vez foi selecionado por ser um cimento versátil e de bom desempenho, incluindo fundações, contrapisos, lajes e argamassas de assentamento e revestimento, areia fina e resíduo de vidro. Posteriormente, foram produzidas argamassas, de acordo com o traço selecionado dos materiais e os teores de substituição da areia natural pelo resíduo de vidro. As argamassas produzidas foram então submetidas a ensaios para avaliação do potencial uso do resíduo como agregado miúdo, abrangendo propriedades mecânicas, índices físicos, incluindo absorção de água, porosidade e massa específica, além da análise morfológica.

### 4.1 Materiais utilizados

Para produção da argamassa portland, foram utilizados os seguintes materiais apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Materiais utilizados na obtenção da argamassa.

<b>Materiais</b>
Cimento Portland CP II F 32
Areia fina
Água
Resíduo de vidro

Fonte: Autora (2025).

#### 4.1.1 Cimento portland CP II F32

O cimento Portland utilizado, foi o composto de CP II F 32, sendo um tipo de cimento que contém adições de filler-calcário, que é indicado para obras residenciais, industriais e prediais, foi adquirido comercialmente.

#### 4.1.2 Agregado miúdo

A areia selecionada para utilização como agregado miúdo, foi uma areia de origem comercial do município de Ananindeua do estado do Pará.

#### 4.1.3 Água

A água utilizada é proveniente do sistema de abastecimento público do município de Ananindeua, do estado do Pará.

#### 4.1.4 Resíduo de vidro

O resíduo de vidro utilizado é proveniente de garrafas inteiras, sem deterioração, que apresentasse formato similar ao obtido comercialmente e deste modo foi selecionado como objeto de estudo para potencial substituição de agregado miúdo, proveniente de garrafas de vidro recuperadas em ruas do município de Marituba, do estado do Pará.

### 4.2 Métodos

#### 4.2.1 Beneficiamento do resíduo de vidro

O processo de beneficiamento do vidro teve início com o recebimento do material em forma de garrafas inteiras. Para iniciar o processo, foi realizado uma quebra manual do material, para que partículas menores de vidro fossem inseridas ao jarro diretamente, pois estudos indicam que partículas de vidro moído, podem apresentar aumento da resistência à compressão e menor expansão, o material passou pelo processo de moagem em um moinho de jarro da marca Marconni, disponível no Laboratório de Práticas Tecnológicas da UFPA, durante um período de 1 hora. A moagem visou principalmente a redução do tamanho do vidro, o jarro do moinho, com capacidade de 4,5 litros, foi preenchido com 2/3 do seu volume, pela amostra a ser moída. Durante a moagem, foram utilizadas bolas de alumina, 7 bolas nos tamanhos de 40 mm e 11 bolas de 20 mm, para garantir uma moagem eficiente e homogênea.

Posteriormente, o resíduo foi submetido a um peneiramento, em agitador mecânico de modelo Retsch e marca JICA, utilizando as peneiras para a distribuição granulométrica, essa etapa é fundamental para garantir que o material atinja a granulometria desejada e seja adequado para as etapas subsequentes do processo.

Figura 9 – Beneficiamento do resíduo: (a) Moinho de jarro da moagem; (b) Agitador mecânico



(a)

(b)

Fonte: Autoria (2025).

Tabela 4 – Abertura de peneira na distribuição granulométrica.

<b>Abertura de peneiras utilizadas</b>
9,5 mm
6,3 mm
4,75 mm
2,36 mm
1,18 mm
600 $\mu\text{m}$
300 $\mu\text{m}$
150 $\mu\text{m}$

Fonte: Autoria (2025).

#### 4.2.2 Caracterização Física das matérias primas

##### 4.2.2.1 Massa Específica

##### 4.2.2.1.1 Massa específica dos agregados

A determinação da massa específica e da massa específica aparente do agregado miúdo foi conduzida em conformidade com os procedimentos normativos estabelecidos pela ABNT NBR NM 52 (2013). O ensaio foi realizado empregando-se um frasco de Chapman, previamente limpo e preenchido com água destilada, por sua reação neutra, mantida à temperatura ambiente para minimizar variações de densidade da água e assegurar maior precisão nas medições volumétricas.

Inicialmente, procedeu-se à pesagem de uma amostra representativa seca em estufa, composta por 500 g de agregado miúdo, utilizando balança de precisão da marca Bel e modelo

S2202H, devidamente calibrada com precisão de 0,01g. A amostra seca foi cuidadosamente introduzida no frasco de Chapman, o qual já continha água até uma marca de referência inicial. Em seguida, completou-se o frasco com água destilada até a marca de nível final. Durante o procedimento, foram realizadas as leituras do volume inicial de água ( $V_i$ ) no frasco, antes da adição do agregado, e do volume final ( $V_f$ ), após a introdução do material. A diferença entre essas duas leituras volumétricas corresponde ao volume efetivamente ocupado pelos grãos do agregado, permitindo calcular a sua massa específica.

O valor da massa específica ( $\rho$ ) do agregado miúdo, expresso em  $\text{g/cm}^3$ , foi obtido por meio da Equação 1, reproduzida a seguir:

$$\rho = \frac{m}{(v_f - v_i)} \quad (1)$$

onde:

$\rho$  é a massa específica do agregado, em  $\text{g/cm}^3$ ;

$m$  é a massa seca da amostra, em gramas;

$V_f$  é o volume final no frasco, após a introdução do agregado, em  $\text{cm}^3$ ;

$V_i$  é o volume inicial de água no frasco, em  $\text{cm}^3$ .

#### 4.2.2.2 Análise granulométrica dos agregados

A análise granulométrica dos agregados miúdos foi realizada em conformidade com os procedimentos descritos na ABNT NBR 17054 (2022).

A determinação da composição granulométrica foi conduzida por meio do método de peneiramento a seco, utilizando amostras representativas devidamente homogeneizadas. As amostras foram previamente secas em estufa à temperatura controlada de  $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , durante um período mínimo de 24 horas, para garantir a eliminação completa da umidade.

Para cada tipo de agregado avaliado, areia natural e resíduo de vidro, foram preparados dois lotes de amostras de 200 g cada. As amostras secas foram submetidas ao peneiramento em um conjunto de peneiras padronizadas da série normal, dispostas em ordem decrescente de abertura nominal, conforme especificado na norma técnica. O processo de agitação foi realizado mecanicamente, utilizando um agitador vibratório de laboratório modelo Retsch e marca JICA, durante o tempo de 15 minutos para assegurar a completa separação dos grãos segundo suas dimensões.

Após a conclusão do peneiramento, o material retido em cada peneira foi cuidadosamente coletado, pesado em balança de precisão 0,01g da marca BEL Engineering de

modelo S2202H, os resultados foram registrados individualmente para posterior análise. Com base nos dados obtidos, foi possível traçar a curva granulométrica de cada agregado, determinar a dimensão máxima característica (DMC) e calcular o módulo de finura (MF), parâmetros que são essenciais para a classificação do agregado quanto à sua graduação.

Os resultados obtidos a partir dessas análises forneceram subsídios para a adequada caracterização dos agregados quanto ao seu comportamento granulométrico e para a avaliação de sua conformidade em relação às exigências normativas, bem como para a definição de sua aplicabilidade em misturas cimentícias e concreto.

#### 4.2.3 Obtenção da argamassa

A proporção básica da mistura foi definida no traço 3:1, o qual avaliou a influência de diferentes teores de resíduo sobre o desempenho mecânico das argamassas. Com o objetivo de investigar a viabilidade técnica da substituição parcial ou total da areia pelo resíduo de vidro, foram estabelecidos cinco níveis de substituição: 10, 20, 30 e 40% em massa.

As operações de mistura foram realizadas utilizando um argamassadeira de Contenco e modelo Pavitest, como mostra a figura 10, localizado no Laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará, campus Ananindeua.

Figura 10 – Argamassadeira



Fonte: Autora (2025).

Foram moldados, ao todo, 105 corpos de prova cilíndricos de argamassa. Os corpos de prova de argamassa foram preparados para atender tanto aos ensaios mecânicos quanto aos ensaios físicos relacionados à absorção de água e porosidade.

O processo de moldagem seguiu, as orientações da ABNT NBR 573 (2016). Os moldes metálicos foram revestidos internamente com uma fina película de desmoldante, para facilitar a retirada dos corpos de prova após a cura inicial. Em seguida, os moldes foram preenchidos manualmente com as misturas previamente homogeneizadas, sendo submetidos à compactação mecânica por meio de um agitador de bancada, eliminando bolhas de ar e garantindo a densificação uniforme do material. A superfície superior foi regularizada com régua metálica, de modo a nivelar os espécimes antes de sua cura.

Os corpos de prova permaneceram nos moldes por um período inicial de 24 horas, em repouso sobre superfície horizontal e rígida, em condições ambiente. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e transferidos para a água e mantidos imersos à temperatura ambiente, por, 7, 14 e 28 dias de cura.

Para cada teor de resíduo de vidro da argamassa e da argamassa de referência, foram moldados 21 corpos de prova cilíndricos com dimensões de  $\text{Ø}5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 7 corpos de prova para cada período de cura, 7, 14 e 28 dias.

#### 4.2.4 Ensaio no estado fresco

##### 4.2.4.1 Tempo de pega

Para a determinação dos tempos de início e de fim de pega das argamassas, empregou-se o método da agulha de Vicat, conforme os procedimentos prescritos na ABNT NBR 16607 (2018). O ensaio foi conduzido utilizando-se o aparelho de Vicat (Figura 11), constituído por um molde tronco-cônico, com 4 cm de altura e 8 cm de diâmetro, acoplado a uma agulha metálica com diâmetro de 1 mm. As argamassas a serem testadas foi previamente preparada segundo o método de substituição dos agregados, assegurando homogeneidade e reprodutibilidade da amostra.

Figura 11 – Aparelho vicat



Fonte: Autora (2025).

Após o preparo, a argamassa fresca foi cuidadosamente moldada no interior do tronco-cônico, e o ensaio de penetração foi iniciado imediatamente, com medições realizadas em intervalos regulares de 5 minutos. O tempo de início de pega ( $T_i$ ) foi definido como o intervalo entre o início da mistura e o instante em que a agulha de Vicat deixava de penetrar livremente, estabilizando a uma distância de  $6 \pm 2$  mm da base do molde. Já o tempo de fim de pega ( $T_f$ ) correspondeu ao intervalo decorrido desde a mistura inicial até o momento em que a penetração da agulha não ultrapassava 0,5 mm, caracterizando o endurecimento suficiente para suportar cargas iniciais, o procedimento foi aplicado na argamassa de referência e nas argamassas com substituição parcial nos teores de 10, 20, 30 e 40% de resíduo de vidro, para cada teor de substituição, cada condição experimental foi testada em triplicata.

#### 4.2.5 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os ensaios destinados à avaliação da porosidade das argamassas, por meio da determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica, foram realizados em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 9778 (2009) - Argamassas e Concretos Endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

Após a moldagem e o período de cura, as amostras foram secas em estufa da marca SOLIDSTEEL, à  $100 \pm 5$  °C, por 72h. Transcorrido esse tempo, as amostras foram pesadas em balança de precisão para determinação da massa seca ( $m_s$ ).

Na sequência, os corpos de prova foram imersos em água potável, mantida à temperatura controlada de  $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ , permanecendo nessa condição por 72 horas. Após o período de imersão estática, as amostras foram submetidas a um tratamento adicional de ebulição em água por 5 horas consecutivas, mantendo-se o nível de água constante durante todo o processo. Em seguida, os corpos de prova foram deixados em repouso à temperatura ambiente, e, então, foram determinadas as massas imersas ( $m_i$ ) e saturada ( $m_{sat}$ ) com auxílio de balança hidrostática.

A partir dos valores experimentais obtidos, os parâmetros de interesse foram calculados utilizando as seguintes expressões: absorção de água dos corpos de prova (Equação 2), índice de vazios (Equação 3), além da massa específica, considerando as condições seca e saturada (Equações 4 e 5, respectivamente).

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

$$l_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3)$$

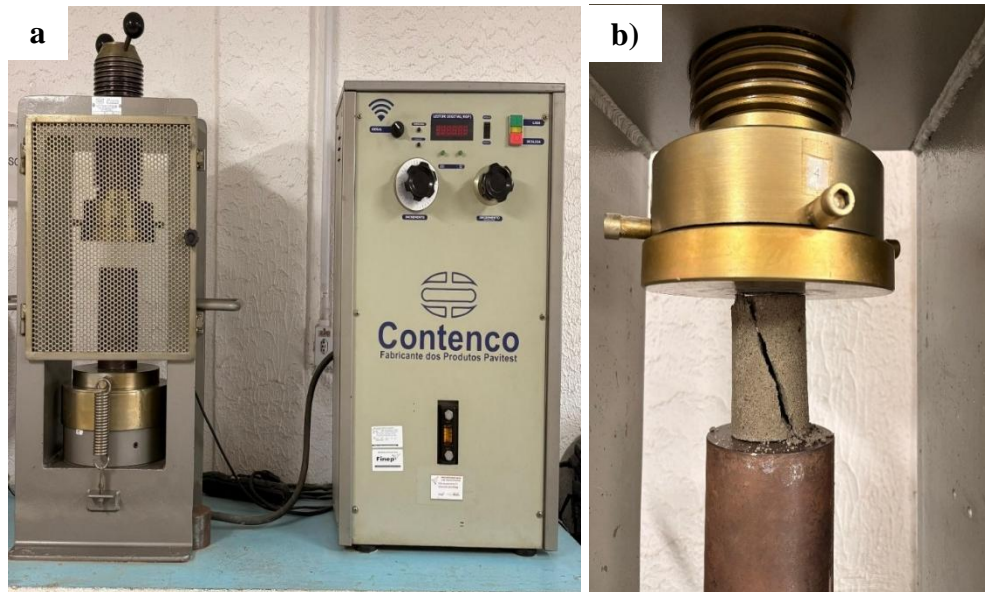
$$p_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (4)$$

$$p_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (5)$$

#### 4.2.6 Ensaio mecânico de compressão

A determinação da resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos foi realizada seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 5739 (2018) - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, utilizando uma prensa hidráulica elétrica, da marca Contenco, com capacidade nominal de 100 tf no Laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará (UFPA), campus Ananindeua. Na figura 12 é possível observar a máquina utilizada e o ensaio de compressão.

Figura 12 – Ensaio mecânico de compressão: (a) Máquina de ensaios; (b) Corpo de prova sendo ensaiado.



Fonte: Autora (2025).

#### 4.2.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada no Laboratório de microscopia eletrônica de varredura do Instituto Federal do Pará (IFPA) utilizando um microscópio eletrônico de varredura TESCAN. O ensaio foi conduzido em fragmentos de corpos de prova fraturados durante o teste de resistência à compressão.

#### 4.2.8 Análise de variância (ANOVA)

Com base nos resultados obtidos a partir do ensaio mecânico em compressão, foi realizado um tratamento estatístico para avaliar as diferenças entre os grupos de amostras. A análise de variância (ANOVA) foi empregada para comparar as médias de diferentes grupos de amostras e determinar se há diferenças significativas entre eles.

Para realizar a comparação múltipla entre as médias dos grupos, será utilizado o teste de Tukey, que é um método estatístico amplamente utilizado para avaliar as diferenças entre as médias de diferentes grupos. O teste de Tukey permitirá identificar quais grupos de amostras apresentam diferenças significativas entre si, com um nível de confiabilidade elevado de 95%. O nível de significância adotado para a análise estatística será de  $p < 0,05$ , o que significa que qualquer diferença observada entre as médias dos grupos será considerada estatisticamente significativa se a probabilidade de ocorrer por acaso for inferior a 5%.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização física das matérias primas

#### 5.1.1 Massa específica

##### 5.1.1.2 Massa específica dos agregados

Os resultados obtidos para a massa específica dos agregados utilizados neste estudo, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Massa específica dos agregados.

<b>Material</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Areia comercial	2,67 ± 0,32
Resíduo de vidro	2,58 ± 0,12

Fonte: Autora (2025).

Os resultados são de 2,67 g/cm<sup>3</sup> para a areia comercial e 2,58 g/cm<sup>3</sup> para o resíduo de vidro moído. Esses valores são coerentes com a literatura para materiais de natureza similar, indicando que ambos atendem aos requisitos técnicos para uso como agregado miúdo em argamassas (Aygün, 2021).

A areia natural apresentou massa específica dentro da faixa típica para areias quartzosas, normalmente entre 2,60 e 2,70 g/cm<sup>3</sup>, como descrito por Neville e Brooks (2010). Esse valor confirma que a areia utilizada possui densidade compatível com os agregados comercializados para fins de construção civil no Brasil, em conformidade com a NBR 7211 (ABNT, 2019), a qual não estipula valor mínimo para a massa específica, mas ressalta a necessidade de controle dessa propriedade para fins de dosagem.

O resíduo de vidro apresentou valor levemente inferior ao da areia, com 2,58 g/cm<sup>3</sup>. Essa diferença é possivelmente explicada pela morfologia das partículas do vidro moído, que tendem a ser mais angulosas e menos uniformes que os grãos naturais de areia, o que resulta em maior volume de vazios e, conseqüentemente, menor densidade aparente (Shi *et al.*, 2005). Segundo Taha e Nounu (2009), resíduos de vidro provenientes de embalagens comuns moídos a granulometrias adequadas para uso em argamassas apresentam massas específicas variando entre 2,50 e 2,60 g/cm<sup>3</sup>, valores consistentes com os aqui obtidos. De maneira semelhante, estudos conduzidos por Ali *et al.*, (2021) também identificaram valores na faixa de 2,55 a 2,59 g/cm<sup>3</sup> para resíduos de vidro reciclado, reforçando a viabilidade do seu uso como substituto parcial da areia.

Além disso, Corinaldesi *et al.*, (2005) observaram que as partículas de vidro apresentam menor esfericidade e maior rugosidade superficial, o que contribui para maior atrito interno e pode reduzir levemente a densidade do agregado. Essa característica pode ser vantajosa para o desempenho mecânico da argamassa, já que a forma angular do vidro pode melhorar a aderência na matriz cimentícia (Federico; Chidiac, 2009).

A leve redução na densidade do resíduo de vidro em comparação à areia pode impactar a densidade final da argamassa e o consumo de ligante para manter a trabalhabilidade. Contudo, como discutido por Du e Tan (2014), argamassas com agregados reciclados levemente menos densos não apresentam perdas significativas de resistência quando bem dosadas e controladas, oferecendo ganhos ambientais por reduzirem a extração de agregados naturais.

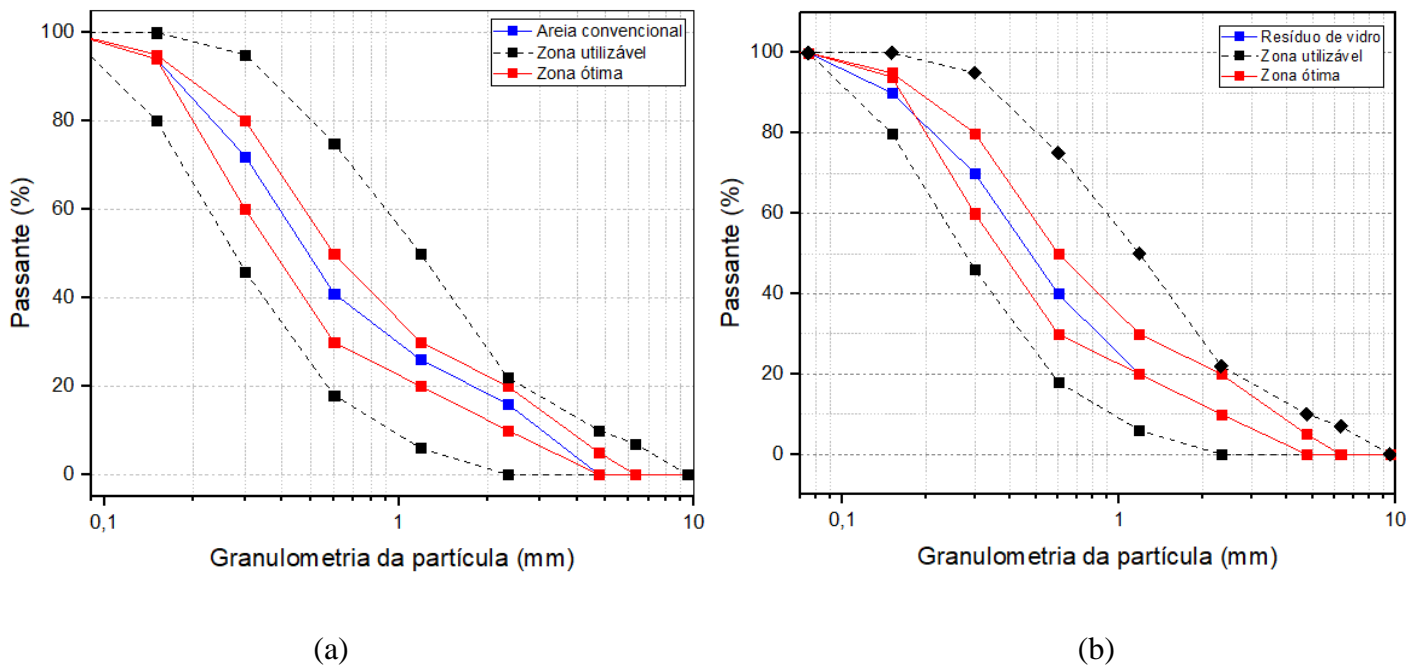
### 5.1.2 Análise granulométrica dos agregados

Os resultados provenientes dos ensaios granulométricos realizados com os agregados destinados à produção das argamassas são apresentados na figura 13. A figura exhibe, respectivamente, as curvas de distribuição granulométrica da areia natural e do resíduo de vidro.

Na figura 13 a, referente à areia natural, observa-se que a curva granulométrica permanece, em sua maior parte, dentro da faixa considerada adequada pela norma, mostrando uma distribuição equilibrada de partículas entre 0,15 mm e 2,36 mm. Esse equilíbrio contribui para um bom empacotamento e menor porosidade, o que tende a melhorar o desempenho mecânico do material. Pesquisas apontam que concretos produzidos com agregados bem graduados podem alcançar até 15% de aumento na resistência à compressão em comparação com misturas compostas por agregados desuniformes (Dilbas, 2022). Demais autores, de modo semelhante verificaram que o tamanho e a distribuição das partículas, tanto em areias naturais quanto em areias de vidro, têm influência direta sobre a densidade do material, reforçando a importância do controle granulométrico para a qualidade do material (Ferreira *et al.*, 2023).

Por outro lado, percebe-se que a curva da areia convencional se aproxima do limite inferior da zona útil, o que indica uma leve predominância de partículas finas. Essa característica aumenta a área superficial do material e exige mais pasta para recobrimento, o que pode comprometer a fluidez e a trabalhabilidade da mistura (Chu, Bui e Nguyen, 2023). Misturas com excesso de finos também tendem a demandar mais água e aditivos plastificantes, o que pode levar à retração e à formação de fissuras nas idades iniciais, o empacotamento ideal depende de um equilíbrio entre partículas grossas e finas, capaz de reduzir o consumo de cimento e garantir uma estrutura mais compacta, durável e estável (Abushama *et al.*, 2023).

Figura 13 – Análise granulométrica: (a) Areia; (b) Resíduo de vidro.



Fonte: Aatoria (2025).

Para a curva granulométrica do resíduo de vidro na figura 13 b, tende a se concentrar na faixa de partículas mais finas, quando comparada à da areia natural. Esse comportamento é característico de materiais frágeis que, ao serem moídos, resultam em partículas angulares e com elevada área superficial específica (Siddika *et al.*, 2021), onde também observaram que a finura do vidro moído afeta diretamente sua atividade pozolânica e o comportamento reológico das misturas, sendo as faixas de 38–75  $\mu\text{m}$  as mais eficientes para equilibrar trabalhabilidade e reatividade sílica-cálcica. De modo semelhante, autores confirmaram que partículas de vidro mais finas atuam como fillers e promovem melhor empacotamento, reduzindo a permeabilidade e aumentando a resistência à compressão de matrizes cimentícias permeáveis (Li *et al.*, 2021).

O comportamento observado também está em consonância com os resultados obtidos por de autores que identificaram que o uso combinado de areia e de pó vidro, em substituições parciais ao cimento e areia, melhora significativamente a compactidade e o desempenho mecânico, desde que a distribuição granulométrica seja controlada (Bajikerikar *et al.*, 2023). Essa melhoria decorre do efeito de preenchimento proporcionado pelas partículas finas, que ocupam os vazios entre os grãos maiores, reduzindo a porosidade total da matriz (Abushama *et al.*, 2023).

No entanto, uma proporção excessiva de partículas muito finas pode elevar a demanda de água e comprometer a trabalhabilidade, de acordo com estudos que ressaltam, que, em argamassas com teores elevados de vidro moído fino, há tendência ao aumento da viscosidade e à diminuição da fluidez (Tong *et al.*, 2024). Em outro estudo, foi observado que o excesso de partículas com diâmetro inferior a 45  $\mu\text{m}$  pode causar segregação e dificultar o adensamento, impactando negativamente a resistência à compressão e à flexão (Khan *et al.*, 2023).

O resíduo de vidro, quando devidamente moído e classificado, pode atuar como substituto parcial da areia, favorecendo a densificação da matriz, reduzindo a porosidade e contribuindo para a sustentabilidade ambiental por meio da reutilização de resíduos sólidos (Sathiparan *et al.*, 2024; Siddika *et al.*, 2021).

## 5.2 Ensaio no estado fresco

### 5.2.1 Tempo de pega

Os resultados do ensaio de tempo de pega das argamassas, determinados pelo método Vicat, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Ensaio de vicat

Teores da argamassa	Ensaio	$T_i$ (Minutos)	$T_f$ (Minutos)
Argamassa de referência (0%)	1	110	165
	2	125	170
	3	125	170
10%	1	130	180
	2	135	175
	3	125	175
20%	1	135	180
	2	130	185
	3	140	185
30%	1	140	185
	2	140	180
	3	145	190
40%	1	130	185
	2	135	180
	3	145	195

Fonte: Autora (2025).

Os resultados obtidos para o tempo de pega das argamassas, mostraram que a substituição parcial da areia por resíduo de vidro promoveu um aumento gradual nos tempos de

início (Ti) e fim (Tf) de pega em comparação com a argamassa de referência. A argamassa sem adição de vidro apresentou tempos médios de início e fim de pega em torno de 120 e 168 minutos, respectivamente. Já para os teores de 10%, os tempos se elevaram para cerca de 130 minutos no início e 175 minutos no fim; para 20%, os valores médios foram de aproximadamente 135 e 183 minutos; para 30%, atingiram cerca de 142 e 185 minutos; enquanto para 40% os tempos chegaram a 137 e 187 minutos.

O aumento observado nos tempos de pega pode ser atribuído a dois fatores principais. Inicialmente, o resíduo de vidro atua como um material inerte, sem reatividade significativa nas primeiras horas de hidratação, o que reduz a quantidade efetiva de cimento disponível para reagir no início do processo, prolongando o tempo até o enrijecimento da pasta (Baikerikar; Mudalgi; Ram, 2023). Essa característica já foi descrita na literatura, onde foi observado um comportamento semelhante em argamassas com substituições parciais por vidro moído, apontando para o efeito diluente do material sobre a matriz cimentícia (Fouad Boukhelf *et al.*, 2023). Além disso, possivelmente o vidro moído apresenta uma superfície lisa e pouco porosa, podendo reduzir sua capacidade de absorver água, aumentando a quantidade de água livre na mistura e retardando a formação da estrutura rígida inicial, pois com uma maior disponibilidade de água pode haver uma contribuição para prolongar a consistência plástica da argamassa, beneficiando neste caso a trabalhabilidade (Zhang *et al.*, 2024).

Os resultados obtidos estão em conformidade com estudos recentes da literatura, como o de Ahmad; Rariq; Faraj *et al.*, (2023), que verificaram aumentos entre 10% e 20% no tempo de pega de argamassas contendo vidro reciclado como substituto parcial do agregado miúdo, dependendo do teor adotado e da finura do resíduo. A tendência de estabilização dos tempos de pega observada para os teores de 30% e 40% neste estudo também foi relatada por Li (2023), que concluiu que, a partir de certos níveis de substituição, o efeito diluente se torna dominante e a elevação do tempo de pega deixa de ser significativa.

O alongamento moderado dos tempos de pega pode ser considerado vantajoso em determinadas condições de obra, pois oferece maior tempo para aplicação, ajustes e correções durante a execução, além de reduzir o risco de fissuração por retração plástica precoce. Entretanto, é necessário que o prolongamento do tempo de pega seja monitorado para não comprometer o cronograma de desforma e cura inicial da argamassa, principalmente em teores acima de 30%, como recomendado por Ahmad; Rafiq; Faraj *et al.*, (2023). Assim, os resultados obtidos demonstram que a substituição parcial da areia por resíduo de vidro até o teor de 40% é tecnicamente viável, sem comprometer significativamente as características no estado fresco,

e ainda contribui para uma argamassa com maior tempo de manuseio e sustentabilidade ambiental.

### 5.3 Ensaios físicos

#### 5.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Na tabela 7, é apresentado os resultados obtidos do ensaio físico nas argamassas com os teores de substituição do vidro reciclado e a argamassa de referência.

Tabela 7 – Ensaios físicos da argamassa.

Teores de argamassa	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica da amostra seca $\text{g/cm}^3$ ( $p_s$ )	Massa específica da amostra saturada $\text{g/cm}^3$ ( $p_{\text{sat}}$ )	Massa específica real $\text{g/cm}^3$ ( $p_r$ )
Argamassa de referência (0%)	15,08±0,52	24,01±0,22	1,56±0,01	1,80±0,01	2,10±0,06
10%	14,82±0,31	23,76±0,15	1,69±0,02	1,90±0,06	2,19±0,02
20%	14,10±0,21	23,26±0,25	1,62±0,02	1,85±0,02	2,13±0,021
30%	13,03±0,23	23,17±0,21	1,60±0,04	1,82±0,01	2,12±0,03
40%	13,92±0,32	22,20±0,37	1,65±0,01	1,91±0,01	2,15±0,02

Fonte: Autora (2025).

Os resultados evidenciam que a incorporação do resíduo de vidro como substituto parcial da areia promoveu alterações significativas nas propriedades físicas do material, refletindo diretamente na porosidade, absorção e densidade das misturas. De modo geral, as argamassas com vidro apresentaram valores menores de absorção de água e índice de vazios em relação à argamassa de referência, ao passo que as massas específicas seca, saturada e real aumentaram com o teor de substituição.

A argamassa de referência, composta unicamente por cimento, areia e água, apresentou absorção de água de 15,08% e índice de vazios de 24,01%, valores típicos para argamassas convencionais produzidas com areias de granulometria fina. A substituição de 10% da areia por vidro já resultou em leve redução na absorção, para 14,82%, tendência que se manteve com teores mais elevados, atingindo 13,03% para 30% de substituição e 13,92% para 40%. Essa redução supõe-se que está relacionada à menor porosidade superficial do vidro moído, caracterizado por partículas de baixa rugosidade e praticamente não absorventes, como apontado por Balest *et al.*, (2022), que observaram comportamento similar em argamassas de cal com adição de vidro moído. Segundo os autores, a substituição do agregado natural por

vidro contribui para diminuir a capilaridade da matriz, pois a água não penetra significativamente nas partículas vítreas, o que também impacta a redução do índice de vazios.

O índice de vazios acompanhou a tendência de redução, passando de 24,01% na referência para 22,20% com 40% de vidro. Esse comportamento também foi identificado por Moussa *et al.*, (2023), que atribuíram a redução do volume de vazios ao efeito de preenchimento das partículas de vidro finas entre os grãos de cimento e areia. O aumento da compactidade do sistema granular da argamassa melhora a eficiência do empacotamento e reduz a formação de poros interconectados (Arcolezi *et al.*, 2023). Além disso, as partículas de vidro, supõe-se que apresentem formato angular, contribuem para a acomodação mais eficiente do agregado, efeito corroborado por Boukhelf *et al.*, (2023) em argamassas com até 30% de vidro moído.

Em relação às massas específicas, verificou-se um aumento em todas as condições de substituição avaliadas. A massa específica real passou de 2,10 g/cm<sup>3</sup> na argamassa de referência para 2,19 g/cm<sup>3</sup> com 10% de vidro, estabilizando em torno de 2,15 g/cm<sup>3</sup> com 40%. Esse aumento pode ser explicado pela densidade própria do vidro reciclado, que é levemente superior à da areia, e pelo menor conteúdo de poros da matriz endurecida quando o vidro é incorporado. Li *et al.*, (2024) reportaram resultados semelhantes em um estudo sobre argamassas com até 50% de substituição por vidro, concluindo que a maior densidade do vidro em relação a agregados naturais que contribui para um leve aumento na massa específica total.

Além dos ganhos em densidade e redução de porosidade, os resultados obtidos neste estudo, têm implicações positivas para a durabilidade das argamassas. Esse aspecto foi discutido por Moussa *et al.*, (2023), que destacaram que a maior densificação das argamassas com vidro melhora o desempenho frente à penetração de água e agentes externos, sendo uma vantagem importante em aplicações expostas à umidade.

Os resultados que indicam aumento de densidade e redução da porosidade possuem relevância para o comportamento mecânico da argamassa, pois refletem uma melhor compactação e coesão interna da matriz cimentícia, resultando em maior resistência à compressão. A redução do volume de vazios implica em melhor distribuição das tensões internas e maior área efetiva de contato entre os grãos e a pasta de cimento, o que favorece a transferência de esforços e reduz a ocorrência de pontos de concentração de tensões (Zhao *et al.*, 2023; Abushama *et al.*, 2023).

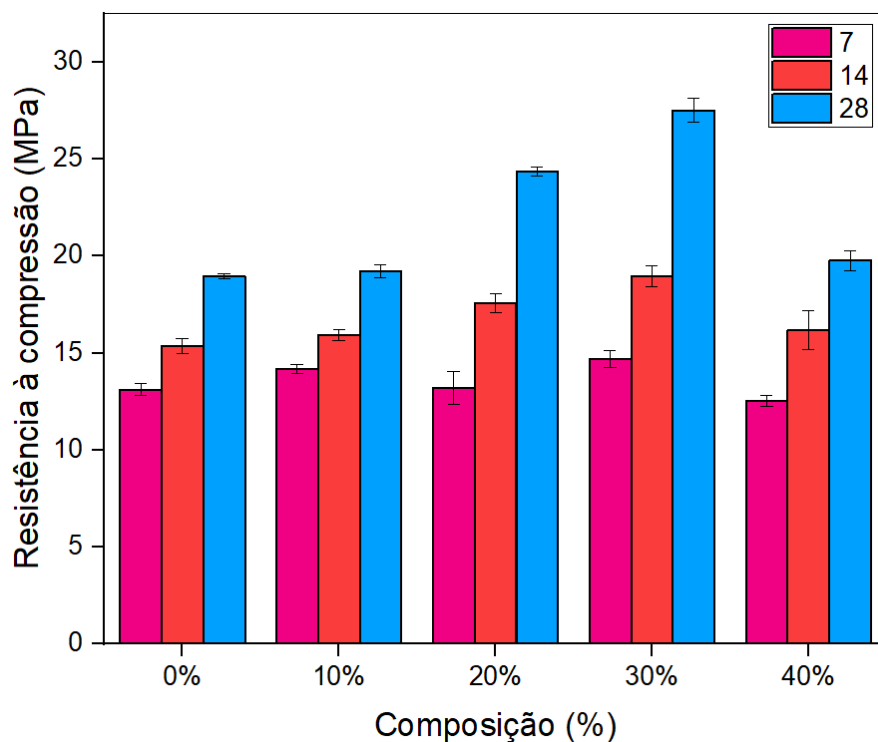
Além disso, uma estrutura menos porosa contribui para menor propagação de microfissuras sob carregamento, melhorando a tenacidade da argamassa (Li *et al.*, 2024). Essa relação entre a microestrutura mais densa e o ganho de desempenho mecânico é descrita na literatura (Meira *et al.*, 2022), pois o empacotamento mais eficiente das partículas e a redução

da absorção capilar aumentam a aderência entre a matriz e os agregados finos, elevando a resistência (Li *et al.*, 2020).

#### 5.4 Ensaio mecânico de compressão

Os resultados obtidos para a resistência à compressão das argamassas de referência e com substituição parcial da areia por resíduo de vidro, nos teores 10, 20, 30 e 40% em massa, em tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, encontram-se na Figura 14.

Figura 14 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autora, 2025.

É possível notar um aumento progressivo da resistência à compressão com o tempo de cura para todas as composições, comportamento característico de argamassas cimentícias devido à evolução das reações de hidratação do cimento, com crescimento contínuo da formação dos produtos hidratados, especialmente C-S-H, que conferem um aumento de resistência mecânica (Tome *et al.*, 2024). Este resultado reforça a importância do acompanhamento do desenvolvimento da resistência em idades mais longas, uma vez que a presença de adições como o resíduo de vidro, tende a apresentar efeitos mais expressivos aos 28 dias ou mais, devido à sua atividade pozolânica latente (Corinaldesi *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2023).

Para a argamassa de referência (0% de vidro), as resistências aos 7, 14 e 28 dias foram de aproximadamente 13 MPa, 15,5 MPa e 19 MPa, respectivamente. A substituição de 10% da areia por vidro resultou em leve incremento em todas as idades, atingindo cerca de 14 MPa, 16 MPa e 19,5 MPa. Tal comportamento foi também relatado por Dadsetan *et al.*, (2021), que observaram um ganho moderado para baixas taxas de substituição, atribuído ao efeito de enchimento das partículas finas de vidro moído, que melhoram a compactação da matriz e reduzem a porosidade.

Para 20% de substituição, a resistência aos 28 dias apresentou aumento expressivo, alcançando aproximadamente 24,5 MPa. Esse resultado reforça as observações de Shao *et al.*, (2000), segundo os quais o vidro moído atua como pozolana secundária, reagindo com a portlandita liberada durante a hidratação do cimento para formar C-S-H adicional, resultando em microestrutura mais densa e resistente. Zhang *et al.* (2011) também verificaram ganhos significativos de resistência em argamassas com substituições entre 15% e 25%, apontando a granulometria adequada como fator determinante para o desempenho pozolânico do resíduo vítreo.

A substituição de 30% apresentou o melhor desempenho entre todas as composições, com resistência aos 28 dias em torno de 27,5 MPa, valor cerca de 45% superior ao da argamassa de referência. Este comportamento está de acordo com os estudos de Taha e Nounu (2009), que identificaram substituições entre 20% e 30% como ideais para maximizar a resistência sem comprometer a coesão da argamassa. Segundo estes autores, há um ponto eficaz de substituição no qual o efeito combinado do enchimento físico e da atividade pozolânica do vidro for maximizado.

A redução da resistência mecânica observada para o teor de 40% aos 28 dias pode ser diretamente correlacionada com os resultados dos ensaios físicos apresentados na Tabela 7. Nota-se que, embora essa composição apresente índice de vazios ligeiramente inferior ao da argamassa de referência, ocorre um aumento da absorção de água em relação aos teores de 20% e 30%, indicando maior presença de poros conectados, o comportamento sugere que, em elevados teores de substituição, o empacotamento das partículas vítreas deixa de ser eficiente, comprometendo o intertravamento granular e favorecendo a formação de uma microestrutura menos homogênea por Ali *et al.*, (2012). Além disso, o aumento da massa específica da amostra saturada para 40% reforça a maior facilidade de penetração de água, evidenciando uma matriz mais permeável, sendo esses fatores contribuintes para a queda de desempenho mecânico, uma vez que o aumento da porosidade efetiva e a redução da coesão interna da matriz que limitam

a transferência de tensões, justificando a resistência inferior em comparação às argamassas com 20% e 30% de substituição (Ling e Poon, 2016).

O comportamento observado, caracterizado pelo aumento gradual da resistência à compressão ao longo dos dias, está diretamente relacionado à cinética de hidratação do cimento e a atividade pozolânica do resíduo de vidro, que se manifesta de forma mais efetiva em idades avançadas (Tognonvi *et al.*, 2020). A elevação progressiva dos valores de resistência entre 7, 14 e 28 dias indica que, com o avanço da cura, ocorre a formação contínua de produtos hidratados, como o gel de C–S–H, responsáveis pela ligação entre as partículas e pelo aumento da coesão da matriz (Rashad, 2023). No caso das argamassas com vidro, esse comportamento pode estar associado à reação lenta da sílica amorfa presente no vidro moído, que consome o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação, promovendo o refinamento dos poros e o adensamento microestrutural (Liu *et al.*, 2024).

Entretanto, a ausência de melhorias expressivas em determinadas composições, como nos teores de 10% e 40%, pode ser atribuída a desequilíbrios entre o efeito de enchimento e a reatividade pozolânica (Rabiu; Mosaberpanah, 2025). Em baixos teores (10%), a massa do vidro pode não ser suficiente para gerar uma quantidade relevante de C–S–H secundário, limitando os ganhos de resistência, já em altos teores (40%), ocorre o efeito inverso, o excesso de partículas vítreas reduz a proporção de cimento ativo, prejudicando a formação da matriz cimentícia e elevando a porosidade, o que explica o decréscimo observado (Sadegh Ghourchian, 2018). Assim, o desempenho mecânico depende de um ponto de equilíbrio entre quantidade de vidro, distribuição granulométrica e grau de hidratação, sendo os teores intermediários (20% e 30%) os mais favoráveis à densificação e resistência (Chen *et al.*, 2022).

O impacto do tempo de cura em cada composição também está intimamente ligado à estrutura física interna do material, pois as argamassas com menores teores de vidro tendem a alcançar o pico de resistência mais rapidamente, pois dependem da hidratação do cimento (Park; Lalitsuda; Nuta, 2024). Já as formulações com teores mais altos exibem um crescimento mais lento e sustentado, resultado da contribuição tardia das reações pozolânicas do vidro, que se intensificam após os 14 dias (Sikora *et al.*, 2023). Essa diferença explica o aumento progressivo com o tempo, evidenciando que o vidro, além de atuar como enchimento físico, continua a reagir e melhorar as propriedades mecânicas ao longo da cura.

A relação entre os resultados mecânicos e os parâmetros físicos, como densidade e porosidade, é evidente nas composições que tem 30% de resíduo de vidro, onde se apresenta melhor resistência à compressão. O preenchimento dos poros pelas partículas finas de vidro e a redução da absorção de água contribuem para uma microestrutura mais coesa e menos

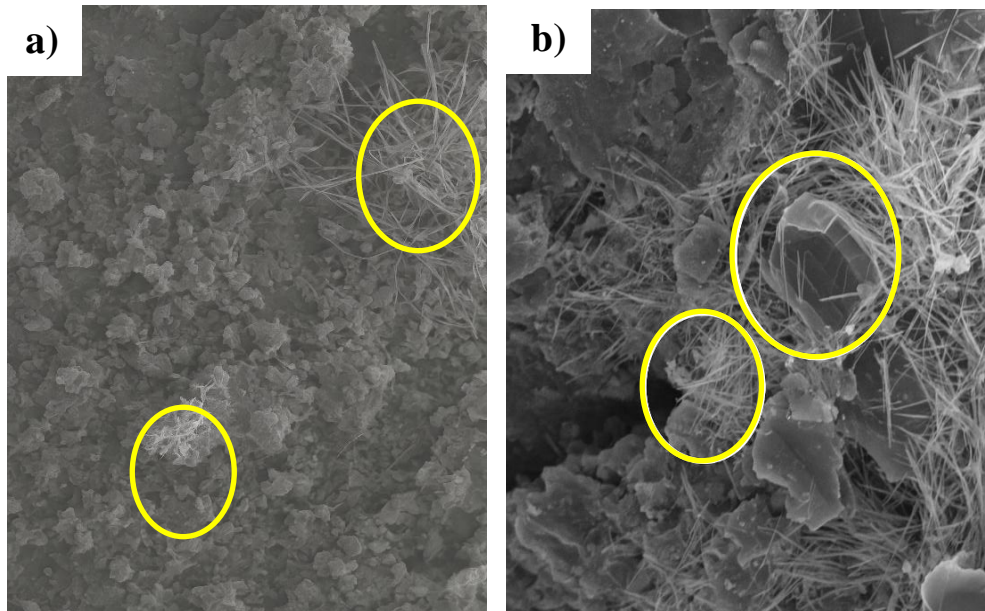
permeável, o que favorece a propagação uniforme das tensões e reduz a iniciação de microfissuras sob carga (Karimi *et al.*, 2024). Assim, o desempenho mecânico até 30% de resíduo de vidro, está diretamente associado à melhoria da microestrutura física promovida pelo vidro moído.

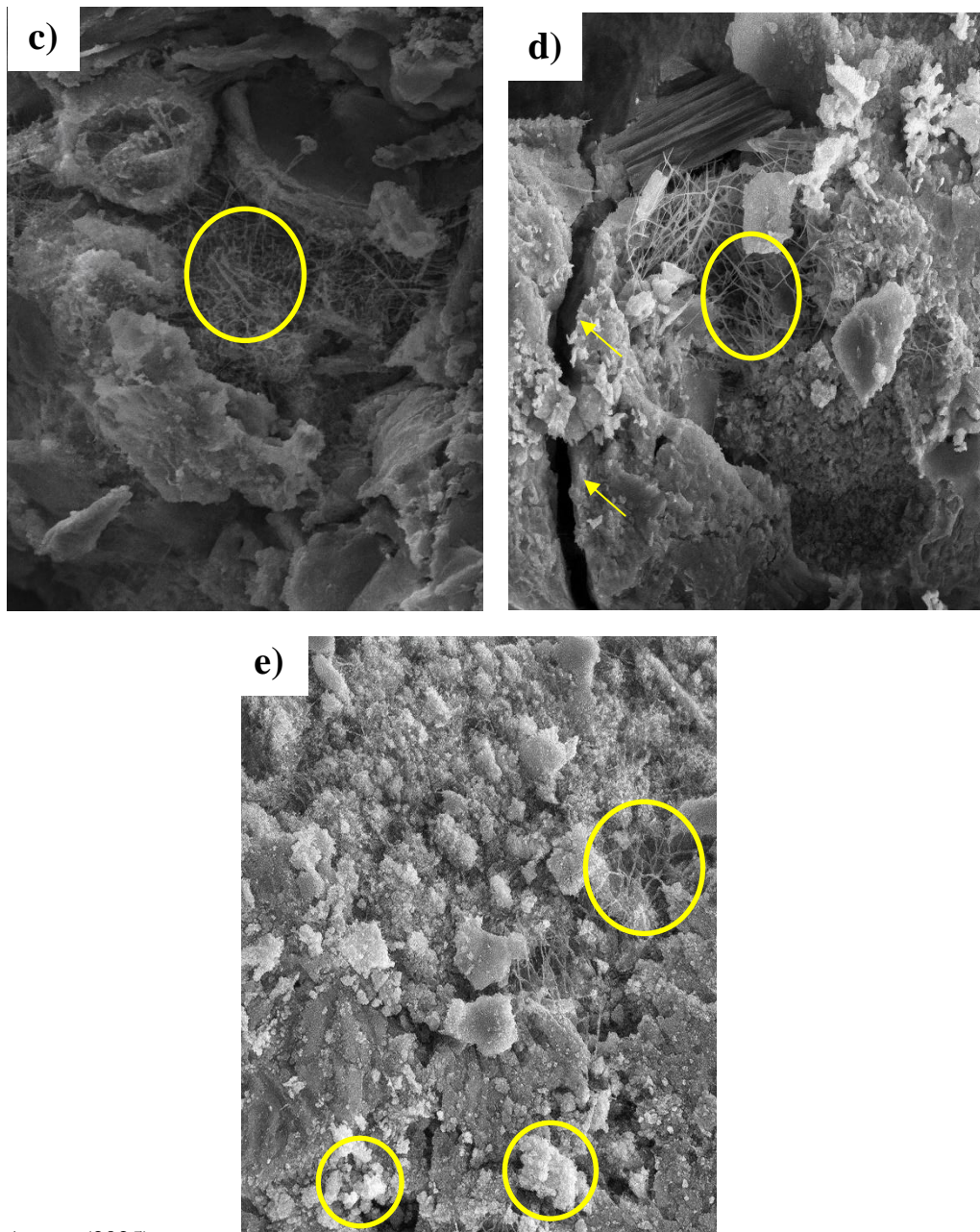
A substituição parcial da areia por vidro reciclado reduz a demanda por extração de agregados naturais e diminui o descarte inadequado do vidro, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais da construção civil (Chen *et al.*, 2021). Além disso, o uso do vidro moído como agregado promove a valorização de resíduos sólidos urbanos, alinhando-se às metas de economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 11 e 12 (Maier; Durham, 2012).

### 5.5 Microscopia eletônica de varredura (MEV)

Os resultados obtidos na Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura, nas amostras das argamassas de referência e com substituição parcial da areia por resíduo de vidro, nos teores 10, 20, 30 e 40% em massa, em tempo de cura de 28 dias, encontram-se na Figura 15.

Figura 15 – Microscopia Eletrônica de Varredura: (a) Argamassa de referência com ampliação de 500x; (b) 10% com ampliação de 2000x; (c) 20% com ampliação de 1500x; (d) 30% com ampliação de 2000x e (e) 40% com 500x.





Fonte: Autora (2025).

Na argamassa de referência (Figura 15a), pode se observar uma microestrutura relativamente homogênea, com presença de produtos típicos da hidratação do cimento, como o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio (CH). Esses cristais, destacados nos círculos da figura, apresentam morfologia acicular ou prismática, coerente com descrições clássicas da literatura (Mehta; Monteiro, 2014). A matriz se mostra compacta, com menor presença de vazios visíveis, o que é esperado para argamassas convencionais sem adições minerais.

Quando se observa a amostra contendo 10% de substituição por resíduo de vidro (Figura 15b), percebe-se uma microestrutura mais heterogênea, com formação mais intensa de cristais

aciculares, possivelmente associados ao aumento da disponibilidade de sílica reativa oriunda do vidro moído. A sílica amorfa do vidro pode reagir com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação, favorecendo reações pozolânicas tardias e produzindo C-S-H secundário, esta reação tende a densificar a matriz ao longo do tempo, o que pode justificar a maior concentração de agulhas ou formações de etringita (Lin *et al.*, 2018).

Outro aspecto notório é a presença de partículas de vidro não totalmente integradas à matriz, visíveis na Figura 15b, onde superfícies mais lisas e planas são circundadas pelo C-S-H. Essa morfologia indica boa interação interfacial, já que o gel de hidratação parece envolver os grãos de vidro, sugerindo que o resíduo atua como microagregado reativo, comportamento já reportado por Shi e Zheng (2007).

Nas amostras contendo teores mais elevados de substituição por resíduo de vidro de 20%, 30% e 40%, correspondentes às Figuras 15c, 15d e 15e, respectivamente, observa-se uma evolução ainda mais evidente da microestrutura, resultante da interação entre o vidro moído e os produtos de hidratação do cimento.

Na amostra com 20% de substituição (Figura 15c), observa-se um aumento perceptível da quantidade e da densidade de formações aciculares, destacadas. A morfologia está associada à maior disponibilidade de sílica reativa, que intensifica as reações pozolânicas ao longo da cura (Xu *et al.*, 2016). Além disso, é possível observar regiões onde a matriz se apresenta mais compactada, sugerindo preenchimento progressivo dos poros pelo gel C-S-H secundário, que indicam que teores intermediários de vidro promovem microestruturas mais densas devido à reação entre sílica amorfa e hidróxido de cálcio (Chen; Liu; Liang, 2024).

Já a amostra com 30% de substituição (Figura 15d) revela a presença de áreas densificadas, com formação acentuada de cristais aciculares, e regiões onde ocorrem descontinuidades ou microfissuras, destacadas pelas setas na figura. A presença dessas fissuras pode estar relacionada à maior rigidez dos grãos de vidro e à menor compatibilidade de deformações entre esses grãos e a matriz cimentícia, pois embora o vidro finamente moído possa atuar como material pozolânico, teores elevados podem prejudicar a integridade da matriz caso a distribuição granulométrica não favoreça o empacotamento e a aderência (Siddika *et al.*, 2021).

A interface partícula–matriz na Figura 15d também evidencia que, em substituições mais altas, parte das partículas de vidro apresentam bordas angulares que podem dificultar a aderência e favorecer a formação de vazios, que tende a impactar negativamente as propriedades mecânicas em materiais com adições minerais mal distribuídas (Ibrahim, 2021).

Na amostra com 40% de substituição (Figura 15e), a microestrutura se torna mais

heterogênea e menos coesa. Embora ainda seja possível identificar formações aciculares, estas se apresentam mais dispersas e não tão densas quanto nos teores anteriores. A presença de partículas irregulares e aglomerados reflete diretamente no desempenho mecânico observado no ensaio de compressão, especialmente para o teor de 40%. É possível observar uma indicação de redução da eficácia da matriz cimentícia em envolver e integrar adequadamente todos os componentes, pois com o aumento excessivo de vidro, a matriz tende a perder continuidade, e o material passa a se comportar mais como um compósito granular do que como uma argamassa homogênea, comprometendo a coesão e a microestrutura interna com substituições excessivas de agregados naturais por materiais alternativos (Ahmed *et al.*, 2025).

## 5.6 Análise de variância (ANOVA)

A Tabela 8 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) aplicada aos valores de resistência à compressão para diferentes idades de cura: 7, 14 e 28 dias.

Tabela 8 – Anova de resistência mecânica

<b>Resistência à compressão 7 dias de cura</b>						
Fonte	SQ	GL	MQ	F	P- Valor	F Crítico
Entre os grupos	21,0107	4	5,25267	23,5599	6,8E-09	2,68963
Dentro dos grupos	6,68849	30	0,22295			
Total	27,6992	34				
<b>Resistência à compressão 14 dias de cura</b>						
Fonte	SQ	GL	MQ	F	P- Valor	F Crítico
Entre os grupos	59,28114	4	14,82029	41,21107	8,87E-12	2,689628
Dentro dos grupos	10,78857	30	0,359619			
Total	70,06971	34				
<b>Resistência à compressão 28 dias de cura</b>						
Fonte	SQ	GL	MQ	F	P- Valor	F Crítico
Entre os grupos	404,8069	4	101,2017	618,5637	2,38E-28	2,689628
Dentro dos grupos	4,908229	30	0,163608			

---

Total 409,7152 34

---

Fonte: Autora (2025).

Para a resistência à compressão aos 7 dias de cura, o valor de F calculado foi 23,5599, superior ao F crítico (2,68963). O valor-p associado foi de  $6,8 \times 10^{-9}$ , muito inferior ao nível de significância usual ( $\alpha = 0,05$ ). Esses resultados indicam que há diferença estatisticamente significativa entre os grupos analisados aos 7 dias de cura, ou seja, as variações nas composições impactaram de forma relevante a resistência à compressão nessa idade inicial.

Na avaliação aos 14 dias de cura, o valor de F calculado aumentou para 41,21107, mantendo-se superior ao F crítico (2,689628) e com valor-p ainda menor ( $8,87 \times 10^{-12}$ ). Esse resultado reforça a tendência observada aos 7 dias, com diferenças estatisticamente significativas entre os grupos.

Já para os 28 dias de cura, mostram um F calculado de 618,5637, muito superior ao F crítico (2,689628) e um valor-p extremamente baixo ( $2,38 \times 10^{-28}$ ). Este resultado demonstra que as diferenças entre os grupos se tornaram ainda mais acentuadas no estado endurecido do material, revelando que os efeitos das diferentes adições ao longo do tempo impactam de forma significativa o desempenho mecânico final.

O teste de Tukey foi aplicado para identificar quais pares de grupos, com diferentes teores de adição (0%, 10%, 20%, 30% e 40%), apresentaram diferenças estatisticamente significativas na resistência à compressão em idades de 7, 14 e 28 dias de cura, os valores são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Teste de tukey.

<b>Resistência à compressão 7 dias (D.M.S=0,79)</b>					
Grupos	0%	10%	20%	30%	40%
0%	0	<b>1,0671</b>	0,11	<b>1,5814</b>	0,56143
10%	<b>1,0671</b>	0	<b>0,9571</b>	<b>0,5143</b>	<b>1,62857</b>
20%	0,11	<b>0,9571</b>	0	<b>1,4714</b>	0,67143
30%	<b>1,5814</b>	<b>0,5143</b>	<b>1,4714</b>	0	<b>2,14286</b>
40%	0,5614	<b>1,6286</b>	0,6714	<b>2,1429</b>	0
<b>Resistência à compressão 14 dias (D.M.S= 1,01)</b>					
Grupos	0%	10%	20%	30%	40%
0%	0	0,5429	<b>2,2</b>	<b>3,5857</b>	<b>0,8</b>
10%	0,5429	0	<b>1,6571</b>	<b>3,0429</b>	0,25714
20%	<b>2,2</b>	<b>1,6571</b>	0	<b>1,3857</b>	<b>1,4</b>
30%	<b>3,5857</b>	<b>3,0429</b>	<b>1,3857</b>	0	<b>2,78571</b>
40%	<b>0,8</b>	0,2571	<b>1,4</b>	<b>2,7857</b>	0
<b>Resistência à compressão 28 dias (D.M.S=0,68)</b>					
Grupos	0%	10%	20%	30%	40%
0%	0	<b>0,2657</b>	<b>5,3943</b>	<b>8,5514</b>	<b>0,80857</b>
10%	<b>0,2657</b>	0	<b>5,1286</b>	<b>8,2857</b>	<b>0,54286</b>

20%	<b>5,3943</b>	<b>5,1286</b>	0	<b>3,1571</b>	<b>4,58571</b>
30%	<b>8,5514</b>	<b>8,2857</b>	<b>3,1571</b>	0	<b>7,74286</b>
40%	<b>0,8086</b>	<b>0,5429</b>	<b>4,5857</b>	<b>7,7429</b>	0

Fonte: Autora (2025).

Os resultados do teste de Tukey confirmam que as diferenças entre os grupos são estatisticamente significativas e aumentam com o tempo de cura. O grupo com 30% de adição demonstrou desempenho superior em todas as idades de cura, atingindo os maiores ganhos aos 28 dias. Por outro lado, o grupo com 40% mostrou desempenho inferior, especialmente no longo prazo, indicando que o aumento excessivo da adição prejudica a resistência mecânica final.

Aos 7 dias, o grupo de 30% apresentou diferenças expressivas em relação aos grupos 0%, 20% e 40%, com valores de DMS superiores, evidenciando maior desempenho inicial. O grupo de 40% diferiu significativamente dos teores 10% e 30%. A menor diferença ocorreu entre 0% e 20%, sugerindo comportamento semelhante no início da cura.

As diferenças para 14 dias aumentam, o grupo 30% mostra novamente as maiores diferenças frente aos demais, destacando-se contra 0% e 10%. O teor 40% exibe diferenças relevantes em relação aos grupos 0%, 20% e 30%, reforçando sua perda de desempenho. Diferenças menores entre 10% e 40% e entre 0% e 10% indicam proximidade de comportamento entre esses níveis intermediários.

Para os 28 dias, 30% apresenta as maiores diferenças de todas, especialmente em relação aos grupos 0%, 10% e 40%. O teor de 20% também difere significativamente dos demais em diversos pares, mas com desempenho inferior ao teor 30%. O grupo 40% permanece ligado aos menores valores de resistência, apresentando grandes diferenças frente aos teores mais eficientes.

Os resultados obtidos nos ensaios físicos, mecânicos e microestruturais, observa-se que a substituição parcial da areia por resíduo de vidro apresenta impacto consistente e várias características sobre o comportamento da argamassa. De modo geral, a incorporação do vidro promoveu melhorias importantes na densificação da matriz, na redução da porosidade e no aumento da resistência mecânica, especialmente para os teores intermediários de 20% e 30%, que se destacaram por apresentar melhor equilíbrio entre empacotamento, reatividade pozolânica e continuidade microestrutural. Esses teores se sobressaíram em desempenho mecânico no teste de compressão, corroborando tanto por ensaios diretos quanto pela análise estatística, que evidenciou diferenças significativas entre os grupos ao longo das idades de cura. Por outro lado, teores elevados, como 40%, demonstraram que o excesso de partículas vítreas pode prejudicar a compacidade e comprometer o desempenho mecânico. Assim, os resultados

indicam que o uso de vidro reciclado como agregado alternativo é tecnicamente viável e pode contribuir para um material mais denso, resistente e ecologicamente viável.

## 6 CONCLUSÃO

- A caracterização física dos agregados demonstrou que tanto a areia natural quanto o resíduo de vidro apresentam massas específicas compatíveis com os valores reportados na literatura, indicando a viabilidade técnica do uso do vidro moído como agregado miúdo;
- A análise granulométrica evidenciou que o resíduo de vidro apresenta maior finura e angularidade em relação à areia natural, características que contribuem para o efeito de empacotamento e para o aumento da compacidade das argamassas, desde que controlada a proporção de partículas finas;
- Os resultados do tempo de pega mostraram um aumento gradual dos tempos de início e fim de pega com o acréscimo do teor de vidro, devido à menor reatividade inicial e à baixa absorção de água do material vítreo. Esse comportamento, embora retarde o endurecimento inicial, pode ser vantajoso por prolongar a trabalhabilidade da argamassa;
- Os ensaios físicos demonstraram redução da absorção de água e do índice de vazios com o aumento da substituição de areia por vidro, além de um leve incremento na massa específica real. Tais resultados indicam uma microestrutura mais densa e menos permeável, o que tende a melhorar a durabilidade do material;
- As argamassas com teor de 30% de vidro apresentaram o melhor desempenho geral, conciliando baixa porosidade, maior densidade e elevada resistência à compressão. Esse teor representa o ponto ótimo de substituição, equilibrando o efeito de enchimento e a contribuição pozolânica do resíduo;
- O comportamento mecânico observado ao longo do tempo de cura reforça o papel do vidro moído como material com atividade pozolânica latente, que se manifesta de forma mais efetiva após 14 dias, promovendo o refinamento da microestrutura e o aumento da resistência à compressão;
- Os resultados obtidos no MEV reforçam que o resíduo de vidro não atua apenas como substituto físico da areia, mas também como material potencialmente reativo, influenciando a microestrutura e a formação dos produtos de hidratação. A tendência à maior presença de morfologias aciculares sugere uma matriz mais densificada ao longo da cura, conforme relatado em estudos similares;
- A análise de variância (ANOVA) confirmou que as diferenças entre os grupos com diferentes teores de substituição são estatisticamente significativas, especialmente aos

28 dias, indicando que a presença do vidro afeta de forma relevante o desempenho mecânico final das argamassas;

- O teste de Tukey apontou que a composição com 30% de substituição obteve desempenho significativamente superior às demais, enquanto teores mais elevados (40%) resultaram em queda de resistência, possivelmente devido ao aumento da porosidade e à redução da proporção de cimento ativo;
- A utilização do vidro reciclado como substituto parcial da areia contribui para reduzir o consumo de recursos naturais, minimizar o descarte inadequado de resíduos sólidos e promover práticas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 11 e 12), reforçando o potencial ambiental do material;
- De modo geral, conclui-se que o uso do resíduo de vidro moído como agregado miúdo em argamassas é tecnicamente viável até o teor de 30%, proporcionando ganhos físicos, mecânicos e ambientais sem comprometer o desempenho no estado fresco.

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Comparar diferentes granulometrias do resíduo de vidro, investigando como o tamanho das partículas influenciam as propriedades da argamassa;
- Estudar diferentes tipos de vidro, vidro plano, de garrafas, de lâmpadas, vidro temperado etc.), visto que a composição química pode afetar a reação com o cimento portland;
- Investigar a durabilidade da argamassa, por meio de ensaios de absorção capilar, carbonatação, ataque por sulfatos e ciclos de umedecimento e secagem;
- Analisar a expansão por reação álcali-sílica;
- Desenvolver um estudo de viabilidade econômica e ambiental, considerando análise do ciclo de vida e custo-benefício do uso do vidro reciclado;
- Investigar o uso de aditivos químicos.

## 8 REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.
- ABUSHAMA, W. J. et al. Influence of Optimum Particle Packing on the Macro and Micro Properties of Sustainable Concrete. **Sustainability**, v. 15, n. 19, p. 14331–14331, 28 set. 2023.
- ABUSHAMA, W. J.; et al. Influence of Optimum Particle Packing on the Macro and Micro Properties of Cementitious Materials. *Sustainability*, v. 15, n. 4, 2023.
- ACEITUNO-CAICEDO, D. et al. Impact of bacterial admixtures on the compressive and tensile strengths, permeability, and pore structure of ternary mortars: Comparative study of ureolytic and phototrophic bacteria. **Biotechnology Journal**, 13 out. 2023.
- ACERS BULLETIN. **Deep decarbonization of glassmaking**. Disponível em: <[https://bulletin.ceramics.org/article/deep-decarbonization-of-glassmaking/?utm\\_source=com](https://bulletin.ceramics.org/article/deep-decarbonization-of-glassmaking/?utm_source=com)>. Acesso em: 10 agos. 2025.
- AHMAD, S. A.; RAFIQ, S. K.; FARAJ, R. H. Evaluating the effect of waste glass granules on the fresh, mechanical properties and shear bond strength of sustainable cement mortar. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 25, n. 6, p. 1989–2008, 27 fev. 2023.
- AHMED, H. U. et al. Investigation of the fresh, mechanical, durability, and microstructural properties of waste glass powder-modified cement paste. **Discover Concrete and Cement**, v. 1, n. 1, 17 set. 2025.
- ALAMO, J. et al. Continuous Feed Grinding Milling Process of Soda-Lime Glass Using Smoothed-Particle Hydrodynamics. **Applied mechanics**, v. 5, n. 1, p. 58–72, 23 jan. 2024.
- ALHAMAYDEH, M.; MAKY, A. M.; ELKAFRAWY, M. INSPECT-SPSW: INelastic Seismic Performance Evaluation Computational Tool for Steel Plate Shear Wall Modeling in OpenSees. **Buildings**, v. 13, n. 4, p. 1078–1078, 19 abr. 2023.
- ALI, E. E.; AL-TERSAWY, S. H. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 785–791, out. 2012.
- ALI, U. et al. Systematic effect of particle roundness/angularity on macro-and microscopic behavior of granular materials. **Granular matter**, v. 25, n. 3, 28 jun. 2023.
- AMMAD, S. et al. Personal protective equipment (PPE) usage in construction projects: A scientometric approach. **Journal of Building Engineering**, v. 35, p. 102086, mar. 2021.
- ARCOLEZI, K. H. et al. Effect of Aggregates Packing with the Maximum Density Methodology in Pervious Concrete. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 4939, 1 jan. 2023.
- AYGÜN, B. F. An overview of the impact of using glass powder on mechanical, durability properties in self-compacting concrete. **Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies**, v. 6, n. 3, p. 116–123, 30 set. 2021.
- BAIKERIKAR, A.; MUDALGI, S.; RAM, V. V. Utilization of waste glass powder and waste glass sand in the production of Eco-Friendly concrete. **Construction and Building Materials**, v. 377, p. 131078, maio 2023.
- BALEST, J. et al. Engaging Stakeholders for Designing a FAIR Energy Data Management Tool: The Horizon 2020 EnerMaps Project. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11392, 10 set. 2022.
- BAMERI, M. et al. Influence of Waste Glass Powder as a Supplementary Cementitious Material (SCM) on the Mechanical Properties, Expansion, Environmental Impact, and Microstructure of Cementitious Mortar. **Engineering Reports**, v. 7, n. 6, jun. 2025.
- BEKERÉ, K.; MALAIŠKIENĖ, J. Utilisation of Different Types of Glass Waste as Pozzolanic Additive or Aggregate in Construction Materials. **Processes**, v. 13, n. 5, p. 1613, 21 maio 2025.

BENYAHIA, A.; SALHI, M.; BOUBEKEUR, T. Effects of Waste Glass Powder on Properties of Self-Compacting Repair Mortars. **International Journal of Engineering Research in Africa**, v. 62, p. 43–56, 23 nov. 2022.

BUKIEDA, P. et al. Study on the optical quality and strength of glass edges after the grinding and polishing process. **Glass Structures & Engineering**, v. 5, n. 3, p. 411–428, 5 jun. 2020.

BURGMANN, S.; BREIT, W. Impact of Crushed Natural and Recycled Fine Aggregates on Fresh and Hardened Mortar Properties. **Construction Materials**, v. 4, n. 1, p. 37–57, 23 dez. 2023

**Call for better management of coastal sand mining to halt “dire” consequences.** Disponível em: <[https://environment.ec.europa.eu/news/call-better-management-coastal-sand-mining-halt-dire-consequences-2023-06-27\\_en?utm\\_source=com](https://environment.ec.europa.eu/news/call-better-management-coastal-sand-mining-halt-dire-consequences-2023-06-27_en?utm_source=com)>. Acesso em: 02 set. 2025.

CARASEK, H., CASCUDO, O., SCARTEZINI, L. M. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2001. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

CHEN, W.; LIU, D.; LIANG, Y. Influence of Ultra Fine Glass Powder on the Properties and Microstructure of Mortars. **Fluid dynamics & materials processing**, v. 20, n. 5, p. 915–938, 1 jan. 2022.

CHEN, Z. et al. State-of-charge estimation of lithium-ion batteries based on improved H infinity filter algorithm and its novel equalization method. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, p. 125180, mar. 2021.

CHU, V. T. H.; BUI, V. D.; NGUYEN, T. V. Effect of Combining the Aggregate Grading with Cementitious Composition on Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete. **Buildings**, v. 13, n. 1, p. 248, 16 jan. 2023.

CIVIL, B. DA. **Concreto Armado - A estrutura interna do material.** Disponível em: <<https://engenhariacivildauesc.blogspot.com/2012/05/concreto-armado-estrutura-interna-do.html>>.

CORINALDESI, V. et al. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. **Waste Management**, v. 25, n. 2, p. 197–201, jan. 2005.

DADSETAN, S. et al. Extensive evaluation on the effect of glass powder on the rheology, strength, and microstructure of metakaolin-based geopolymer binders. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121168, jan. 2021.

DE BORTOLI, A. Understanding the environmental impacts of virgin aggregates: Critical literature review and primary comprehensive life cycle assessments. **Journal of Cleaner Production**, v. 415, p. 137629, 20 ago. 2023.

DE, V. et al. Investigation and Quantification of Erosions in the Margins of Water Bodies: A Systematic Review. **Water**, v. 14, n. 11, p. 1693–1693, 25 maio 2022.

DENG, W. et al. A survey of commercial soda–lime–silica glass compositions: Trends and opportunities. I—Compositions, properties and theoretical energy requirements. **International Journal of Applied Glass Science**, 3 out. 2024.

DİLBAS, H. An investigation on effect of aggregate distribution on physical and mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC). **Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies**, v. 7, n. 2, p. 108–118, 28 jun. 2022.

DUARTE, J.; CORREA, C. REALIDADE E PRÁTICAS DO PODER PÚBLICO E DAS ASSOCIAÇÕES DE CATADORES NO CICLO DE VIDA DO VIDRO NA CIDADE DE CURITIBA, PARANÁ- ESTUDO DE CASO. **Enciclopédia Biosfera**, v. 20, n. 45, 30 set. 2023.

ELIE MAHFOUD et al. Mechanical properties and shrinkage performance of one-part-geopolymer based on fly ash and micronized dredged sediments. **Developments in the Built Environment**, v. 16, p. 100253–100253, 11 out. 2023.

- EMEP/EEA Guidebook 2023 – Cement Production — 2023: fornece um panorama da indústria, mencionando claramente a extração de matérias-primas, moagem, clínquerização, moagem final, armazenamento e distribuição **Environmental Impact of Aggregate Mining & Dredging | UKGBC**. Disponível em: <[https://ukgbc.org/our-work/topics/embodied-ecological-impacts/aggregates/?utm\\_source](https://ukgbc.org/our-work/topics/embodied-ecological-impacts/aggregates/?utm_source)>. Acesso em: 28 agos. 2025.
- FABRIS, M. M.; SABBADINI, F. S.; COSTA, K. A. Um indicador quantitativo para avaliar o grau de maturidade da simbiose industrial. **Research Society and Development**, v. 11, n. 6, p. e43911629348-e43911629348, 2 maio 2022.
- FEDERICO, L. M.; CHIDIAC, S. E. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 8, p. 606–610, set. 2009.
- FERRÁNDEZ, D. et al. Optimizing Masonry Mortar: Experimental Insights into Physico-Mechanical Properties Using Recycled Aggregates and Natural Fibers. **Applied Sciences**, v. 14, n. 14, p. 6226–6226, 17 jul. 2024.
- FERREIRA, R. L. S. et al. Effects of Particle Size Distribution of Standard Sands on the Physical-Mechanical Properties of Mortars. **Materials**, v. 16, n. 2, p. 844, 1 jan. 2023.
- FOR, F. **CONCRETE Innovations in Materials, Design and Structures**. [s.l.] FIB - Féd. Int. du Béton, 2019.
- FOUAD BOUKHELF et al. Insight into the Behavior of Mortars Containing Glass Powder: An Artificial Neural Network Analysis Approach to Classify the Hydration Modes. **Materials**, v. 16, n. 3, p. 943–943, 19 jan. 2023.
- GIROTTI, L.; BARBOSA, M. P.; GERALDO. Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto-adensável. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 1, p. 24–52, 1 fev. 2014.
- GRANDES, F. A. et al. Rheological behavior and flow induced microstructural changes of cement-based mortars assessed by Pressure Mapped Squeeze Flow. **Powder Technology**, v. 393, p. 519–538, 1 nov. 2021.
- GRASSL, P.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Influence of aggregate size and fraction on shrinkage induced micro-cracking of mortar and concrete. **arXiv (Cornell University)**, 28 maio 2009.
- GUERROUI, R.; BENOUI, A. Adhesion of Masonry Coating: Effect of Mortar Consistency and Type of Substrate. **Annales de Chimie - Science des Matériaux**, v. 41, n. 5, p. 281–286, 31 out. 2023.
- HADDAD, L. D. DE O. et al. Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 9299–9314, 1 jul. 2020.
- HORSZCZARUK, E.; BRZOZOWSKI, P. Mechanical Properties of Mortars Containing Waste Glass Powder. **Periodica Polytechnica Architecture**, v. 50, n. 1, p. 30–34, 1 abr. 2019.
- HUMAD, A. M. et al. Improvements of mechanical and physical features of cement mortar by nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaCO<sub>3</sub> as additives. **Research on Engineering Structures and Materials**, 1 jan. 2023.
- IBRAHIM, K. I. M. Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00630, dez. 2021.
- IEA – *International Energy Agency*. *Cement – Tracking Clean Energy Progress 2023*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement>. **INSIDE CHEMISTRY. Glass Manufacturing Process - Soda Lime**. Disponível em: <[https://insidechem.blogspot.com/2016/09/glass-manufacturing-process-soda-lime.html?utm\\_source.com](https://insidechem.blogspot.com/2016/09/glass-manufacturing-process-soda-lime.html?utm_source.com)>. Acesso em: 12 agos. 2025.

- JIANG, B. et al. Dynamic tensile behavior of soda-lime silicate glass: the effects of loading rate, specimen size and stress waves. **Acta Mechanica Sinica**, v. 39, n. 1, 31 out. 2022.
- JIANG, Y. et al. *Microstructure and interfacial bonding mechanism between cement mortar and concrete substrate*. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130100, 2023.
- JIANG, Y. et al. *Microstructure and interfacial bonding mechanism between cement mortar and concrete substrate*. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130100, 2023.
- JUNAID, F. S. et al. Industrial-scale Prediction of Cement Clinker Phases using Machine Learning. **arXiv (Cornell University)**, 16 dez. 2024.
- KANNAN, D. M.; AL-KUTTI, W. A. *Plastic shrinkage cracking of cementitious materials under hot weather conditions*. **Cement and Concrete Composites**, v. 128, p. 104485, 2022.
- KARLSSON, S. Compositional Effects on Indentation Mechanical Properties of Chemically Strengthened TiO<sub>2</sub>-Doped Soda Lime Silicate Glasses. **Materials**, v. 15, n. 2, p. 577–577, 13 jan. 2022.
- KHAN, K. et al. Evaluating the effectiveness of waste glass powder for the compressive strength improvement of cement mortar using experimental and machine learning methods. **Heliyon**, v. 9, n. 5, p. e16288–e16288, 1 maio 2023.
- KHYATI POONIA; KANSARA, P.; CHOUDHARY, P. Environmental Impacts of Sand Mining: A Comprehensive Review. **International advanced research journal in science, engineering and technology**, v. 11, n. 3, 30 mar. 2024.
- KIM, Y.-Y. et al. Effect of W/C Ratio on Durability and Porosity in Cement Mortar with Constant Cement Amount. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2014, p. 1–11, 2014.
- KUBICA, J.; GALMAN, I. Investigations on Flexural and Compressive Strengths of Mortar Dedicated to Clinker Units—Influence of Mixing Water Content and Curing Time. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 347, 4 jan. 2022.
- KUBILAY KAPTAN; CUNHA, S.; AGUIAR, J. The Effect of Activation Methods on the Mechanical Properties of Cement Mortars with Recycled Powder from Concrete Waste as a Cement Partial Replacement: A Review. **Sustainability**, v. 17, n. 10, p. 4502–4502, 15 maio 2025.
- LEE, H.; KIM, S.; PARK, J. Investigation on the Mechanical Properties and Microstructure of Eco-friendly Mortar Containing WGP at Elevated Temperature. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2020, v. 14, n. 4, p. 39.
- LI, H. et al. Effect of Fine Aggregate Particle Characteristics on Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. **Minerals**, v. 11, n. 8, p. 897, 19 ago. 2021.
- LI, L. et al. Relationships between microstructure and transport properties in mortar containing recycled ceramic powder. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121384, ago. 2020.
- LI, Q. et al. A Deep Insight into the Micro-Mechanical Properties of Mortar through a Multi-Phase Model. **Buildings**, v. 14, n. 10, p. 3106, 27 set. 2024.
- LINARES, R. et al. LCA applied to comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 31, p. 44023–44035, 26 jun. 2024.
- LING, T. C.; POON, C. S. Use of recycled glass as coarse aggregate in concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*, v. 109, p. 49–64, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.016>
- LIU, B. et al. Evaluation of Workability and Mechanical Properties in Cement Mortar after Compounding Igneous Rock Powder and Silica Fume. **Buildings**, v. 14, n. 2, p. 359–359, 28 jan. 2024.
- LIU, J. et al. *Characterization of interfacial transition zone in cement-based composites using nanoindentation and SEM*. **Cement and Concrete Research**, v. 147, p. 106525, 2021.

- LIU, J. et al. *Fresh properties and application performance of cementitious mortars with modified water-to-binder ratio*. **Materials**, v. 17, n. 4, p. 1012, 2024.
- LIU, T. et al. Research on Damage Evolution Law of Glazed Hollow Beads-Cement/Sodium Silicate Grouting Materials under Different Cycles of Loading and Unloading. **Materials**, v. 17, n. 1, p. 204, 30 dez. 2023.
- LIU, X. et al. Pozzolanic reactivity of ground glass in blended mortars: Effects on strength and pore refinement. **Materials**, v. 17, 2854, 2024.
- LIU, X.; WANG, C. Study on adhesion and workability of Portland cement mortars. *Materials Today Communications*, v. 29, p. 102902, 2021.
- LONG, Guangcheng et al. Comportamento da retração por secagem da argamassa de cimento sob condições de baixo vácuo. **Construction and Building Materials**, v. 374, p. 130933, 2023.
- LOPEZ, R.; CHARBEL EL-FATA. Environmental Implications of Using Waste Glass as Aggregate in Concrete. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 12, p. 507–507, 5 dez. 2024.
- ŁUKASZ WIEJACZKA et al. Socioenvironmental issues of river bed material extraction in the Himalayan piedmont (India). **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 20, 1 out. 2018.
- MAIER, P. L.; DURHAM, S. A. Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 428–437, abr. 2012.
- MARTÍNEZ-GARCÍA, R. et al. Evaluation of Mechanical Characteristics of Cement Mortar with Fine Recycled Concrete Aggregates (FRCA). **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 414, 5 jan. 2021.
- MARVILA, M. et al. Recycled Aggregate: A Viable Solution for Sustainable Concrete Production. **Materials**, v. 15, n. 15, p. 5276, 1 jan. 2022.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo JM. **Microestrutura, propriedades e materiais do concreto**. McGraw-hill, 2006.
- MEIRA, G. R. et al. Correlation between pore structure and mechanical strength in blended cement mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 134, 104871, 2022.
- MILOŠ DRDÁČKÝ et al. Degradation Mechanisms of Mortar and Plaster Layers. **Materials**, v. 17, n. 14, p. 3419–3419, 11 jul. 2024.
- MONDAL, S. K. et al. Quantifying the Workability of Calcium Sulfoaluminate Cement Paste Using Time-Dependent Rheology. **Materials**, v. 15, n. 16, p. 5775–5775, 21 ago. 2022.
- NAGROCKIENĖ, D.; BARKAUSKAS, K. Utilization of Waste Glass Powder in Cement Mortar. **Environmental Sciences Proceedings**, v. 9, n. 1, p. 25, 2021.
- NEGIN MARANDI; SHARAREH SHIRZAD. Sustainable cement and concrete technologies: a review of materials and processes for carbon reduction. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 10, n. 9, 20 ago. 2025.
- NEUVILLE, D. R. Glass, an ubiquitous material. **Comptes Rendus. Géoscience**, v. 354, n. S1, p. 1–14, 1 dez. 2022.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2nd ed. Harlow: Pearson, 2010.
- OGRODNIK, P. et al. Glass Waste as a Valuable Additive (Raw Material) Used for Cement Mortars. **Buildings**, v. 14, n. 9, p. 2741, 31 ago. 2024.
- P. MARAVELAKI-KALAITZAKI et al. RILEM TC 277-LHS report: additives and admixtures for modern lime-based mortars. **Materials and Structures**, v. 56, n. 5, 1 jun. 2023.
- PANAGODA, Sanuja Samadith et al. Cement manufacturing process and its environmental impact. **J. Res. Technol. Eng.**, v. 4, n. 3, p. 161-168, 2023.
- CHEN, N. et al. Water Retention Mechanism of HPMC in Cement Mortar. **Materials**, v. 13, n. 13, p. 2918–2918, 29 jun. 2020.
- PARK KUMPUENG; LALITSUDA PHUTTHIMETHAKUL; NUTA SUPAKATA. Production of Cement mortars from glass powder and municipal incinerated bottom ash. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 18 jan. 2024.

- PATOLOGIAS EN MAMPOSTERIA DE CERAMICA ROJA – Ficha Técnica nº3 elaborada por Camara Industrial de Cerâmica Roja (CICER). Assunção, Capital Federal, Paraguay, 2006. 13 p. Disponível em: <<http://www.ceramicaroja.com.ar>>. Acesso em: 22 agos 2025.
- PAVIA, S.; BRENNAN, O. Portland Cement-Lime Mortars for Conservation. **Springer eBooks**, p. 129–142, 7 jul. 2018.
- PIXEL4. **Recicla Sampa - Reciclagem de vidro: aprenda como fazer**. Disponível em: <<https://www.reciclasampa.com.br/artigo/reciclagem-de-vidro-aprenda-como-fazer>>.
- QUARCIONI, V. A. et al. *Influence of substrate characteristics on the adhesion of rendering mortars*. **Revista Matéria**, v. 27, n. 1, e12722, 2022.
- R. RAVINDER et al. Revealing the Compositional Control of Electrical, Mechanical, Optical, and Physical Properties of Inorganic Glasses. **arXiv (Cornell University)**, 1 jan. 2021.
- RABIU, B. O.; MOSABERPAHAH, M. A. Sustainable Utilization of Waste Glass Powder and Brick Dust as Cement Replacements: Effects on Mortar Performance and Environmental Benefits. **Sustainability**, v. 17, n. 3, p. 1298, 5 fev. 2025.
- RIBEIRO, S. et al. Study of the fracture behavior of mortar and concretes with crushed rock or pebble aggregates. **Materials Research**, v. 14, n. 1, p. 46–52, 18 fev. 2011.
- RUANO GUTIÉRREZ, E. et al. Physico-Mechanical Characterization of Masonry Mortars for Sustainable Construction: Experimental Study with Four Different Aggregates. **Sustainability**, v. 16, n. 14, p. 6228, 21 jul. 2024.
- SADEGH GHOURCHIAN. Plastic Shrinkage Cracking in Concrete: From Mechanisms to Mitigation Strategies. **Repository for Publications and Research Data (ETH Zurich)**, 1 jan. 2018.
- SALUSTIO, J. et al. Mortar Bond Strength: A Brief Literature Review, Tests for Analysis, New Research Needs and Initial Experiments. **Materials**, v. 15, n. 6, p. 2332, 1 jan. 2022.
- Sand | The Hidden Risk In Your Supply Chains? | TDi Sustainability**. Disponível em: <<https://www.tdi-sustainability.com/knowledge/sand-the-hidden-risk-in-your-supply>>
- SANDEEP KUMAR DUBEY; RAY, S. Fatigue Damage Prediction Of Concrete Using Acoustic Emission Approach With Account Of Concrete Heterogeneity. 1 dez. 2023.
- SANTOS-ORTEGA, J. L.; FRAILE-GARCÍA, E.; FERREIRO-CABELLO, J. Environmental Assessment of Natural Coarse Aggregate Production in Gravel Pits—Assessing CO2 Offsets Through Vine Cultivation. **Applied Sciences**, v. 15, n. 4, p. 1868–1868, 11 fev. 2025.
- SATHIPARAN, N.; SUBRAMANIAM, D. N. Potential use of crushed waste glass and glass powder in sustainable pervious concrete: A review. **Cleaner Waste Systems**, v. 9, p. 100191, dez. 2024.
- SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 38–56, dez. 2015.
- SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. [s.l.] CRC Press, 2018.
- SEBBEN, A. A.; SAVARIS, G.; LINDINO, C. A. Concrete production with brewing industry waste. **Ciência e Natura**, v. 46, p. e75292, 6 dez. 2024.
- SEDAGHATDOOST, A. et al. Investigation on the Mechanical Properties and Microstructure of Eco-friendly Mortar Containing WGP at Elevated Temperature. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 15, n. 1, 7 jan. 2021.
- SHI, C. et al. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 987–993, maio 2005.
- SIAME, M. C. et al. Integrating Process Re-Engineering Models in Cement Production to Improve Energy Efficiency. **Applied Sciences**, v. 14, n. 19, p. 8850–8850, 1 out. 2024.
- SIDDIKA, A. et al. Waste Glass in Cement and Geopolymer Concretes: A Review on Durability and Challenges. **Polymers**, v. 13, n. 13, p. 2071, 24 jun. 2021.

- SIKORA, P. et al.** Long-term mechanical performance and microstructure evolution of cement mortars containing glass waste. *Materials Today Communications*, v. 36, 107321, 2023.
- SILVA, Emerson Ribeiro da. **Análise da viabilidade de incorporação de pó de quartzo em substituição parcial ao agregado miúdo em argamassa.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.
- SILVA, M. J. et al. *Influence of curing conditions on shrinkage and cracking behavior of rendering mortars.* **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 7, p. 25, 2022.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO 2023 RELATÓRIO ANUAL ANNUAL REPORT.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/1732731328.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1732731328.pdf)>.
- Soda-Lime Glass: Composition, Properties, and Applications.** Disponível em: <[https://designhorizons.org/soda-lime-glass-composition-properties-and-applications/?utm\\_source=.com](https://designhorizons.org/soda-lime-glass-composition-properties-and-applications/?utm_source=.com)>. Acesso em: 30 agos. 2025.
- SOUZA, V. A. S.; MIRANDA, J. M.; FERREIRA, E. B.** Geopolímero a partir de rejeitos urbanos de vidro reciclado. Universidade de São Paulo, 2024.
- SUBRAMANIAN, R.; VENKATRAMAN, Y. Analysis of mechanical performance and durability of repair mortar with partial replacement of tufa stones with aggregates. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 2, 1 jan. 2024.
- SZELĄG, M. Evaluation of Cracking Patterns in Cement Composites—From Basics to Advances: A Review. **Materials**, v. 13, n. 11, p. 2490, 29 maio 2020.
- TAHA, B.; NOUNU, G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 713–720, maio 2008.
- TAMANNA, N.; TULADHAR, R.; SIVAKUGAN, N. Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117804, abr. 2020.
- TARHAN, Y.; ŞAHİN, R. Fresh and Rheological Performances of Air-Entrained 3D Printable Mortars. **Materials**, v. 14, n. 9, p. 2409, 5 maio 2021.
- THE ENGINEERING COMMUNITY. **Cement Manufacturing Process.** Disponível em: <[https://www.theengineeringcommunity.org/cement-manufacturing-process/?utm\\_source=](https://www.theengineeringcommunity.org/cement-manufacturing-process/?utm_source=)>. Acesso em: 01 nov. 2025.
- THOMAZ, Ércio. In: Manual Técnico de Alvenaria. **Patologia.** ABCI - Associação Brasileira da Construção Industrializada, 1. ed. São Paulo, 1990. p. 97-117.
- TOGNONVI, M. T. et al. Reactivity of Recycled Glass Powder in a Cementitious Medium. **New Journal of Glass and Ceramics**, v. 10, n. 03, p. 29–44, 2020.
- TOME, S. et al. Mineralogical evolution of raw materials transformed to geopolymer materials: A review. **Ceramics International**, v. 50, n. 19, p. 35855–35868, 2 jul. 2024.
- TONG, G.; et al. Response tests on the effects of particle size of waste glass sand on concrete performance. *Scientific Reports*, v. 14, 2024.
- V. BINDIGANAVILE; M. HOSEINI. Foamed concrete. **Elsevier eBooks**, p. 231–255, 1 jan. 2008.
- VANGUARDA. **Argamassa: tipos e aplicações na construção civil - AmazoMix.** Disponível em: <<https://amazomix.ind.br/2024/12/10/argamassa-tipos-e-aplicacoes-na-construcao-civil/>>.
- VIJERATHNE, D.; WAHALA, S.; ILLANKOON, C. Impact of Crushed Natural Aggregate on Environmental Footprint of the Construction Industry: Enhancing Sustainability in Aggregate Production. **Buildings**, v. 14, n. 9, p. 2770, 3 set. 2024.
- WEI, D. et al. The role of particle morphology on concrete fracture behaviour: A meso-scale modelling approach. **Cement and Concrete Research**, v. 134, p. 106096, ago. 2020.

WHITING, K.; NORTH, M. **Sand mining: how it impacts the environment and solutions.** Disponível em: <<https://www.weforum.org/stories/2023/09/global-sand-mining-demand-impacting-environment/>>.

XU, W. et al. Pozzolanic Reactivity of Silica Fume and Ground Rice Husk Ash as Reactive Silica in a Cementitious System: A Comparative Study. **Materials**, v. 9, n. 3, p. 146, 1 mar. 2016.

ZHAO, B. et al. Mechanical properties, permeability and microstructure of steam-cured fly ash mortar mixed with phosphogypsum. **Construction and Building Materials**, v. 400, p. 132582, out. 2023.

ZHENG, L. et al. Structural Causes of Brittleness Changes in Aluminosilicate Glasses with Different Cooling Rates. **Materials**, v. 17, n. 7, p. 1595, 31 mar. 2024.

ZHU, J. et al. Experimental Study on Long-Term Mechanical Properties and Durability of Waste Glass Added to OPC Concrete. **Materials**, v. 16, n. 17, p. 5921, 1 jan. 2023.