



INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
GUILHERME MENEZES FONSÊCA

ARGAMASSA SUSTENTÁVEL PRODUZIDA COM RESÍDUOS DE VIDRO E CINZAS DE
MADEIRA

ESTÂNCIA/SE
2023

GUILHERME MENEZES FONSÊCA

ARGAMASSA SUSTENTÁVEL PRODUZIDA COM RESÍDUOS DE VIDRO E CINZAS DE
MADEIRA

Trabalho de conclusão de curso (TCC II)
apresentado ao Instituto Federal de Sergipe –
Campus Estância, como pré-requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Ma. Fernanda Martins
Cavalcante de Melo

ESTÂNCIA/SE
2023

F676a Fonsêca, Guilherme Menezes.
Argamassa sustentável produzida com resíduos de vidro e cinzas de madeira. / Guilherme Menezes Fonsêca. - Estância, 2023.
78 f.; il.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS, 2023.

Orientadora: Prof^ª. Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo.

1.Sustentabilidade. 2. Argamassa. 3. Resíduo de vidro. 4. Mistura híbrida.
I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - IFS. II.
Melo, Fernanda Martins Cavalcante de. III. Título.

CDU: 624:666.971+502.171

GUILHERME MENEZES FONSÊCA

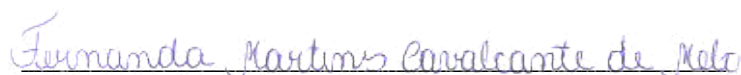
ARGAMASSA SUSTENTÁVEL PRODUZIDA COM RESÍDUOS DE VIDRO E CINZAS DE
MADEIRA

Trabalho de conclusão de curso (TCC II)
apresentado ao Instituto Federal de Sergipe –
Campus Estância, como pré-requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Ma. Fernanda Martins
Cavalcante de Melo

Aprovado em: 26/01/2023.

BANCA EXAMINADORA



Prof^a. Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo
(IFS – Campus Estância)



Prof. Dr. Thiago Augustus Remacre Munareto Lima
(IFS – Campus Estância)



Prof. Dra. Carla Cristina Nascimento Santos Pereira
(IFS – Campus Aracaju)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida e iluminar meu caminho até aqui, pois sem sua graça nada disso seria possível.

À minha família, principalmente aos meus pais, Cleide Mares de Menezes Fonsêca e Ronaldo Dantas Fonsêca, por todo o zelo e carinho, e por depositarem toda a confiança na minha trajetória. Serei eternamente grato por isso!

À minha namorada, Ana Carolina Fonseca Macedo, por todo amor, apoio, conselhos, e ser essencial em todos os momentos. Eu te amo demais!

À Prof^ª. Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo, pela confiança e acreditar no meu potencial, além de todo o auxílio e orientação para elaboração deste trabalho.

Aos amigos, Iury, Alan, Hallana, Guilherme, Lucas e Mateus por todo companheirismo e amizade de sempre. “Tmj!”

Aos colegas de projeto, Pedro Vinícius, Emerson, Karol, Marcela, Túlio e Íris por todo suporte durante a realização de toda a pesquisa experimental.

À Sergipe Vidros, pelo fornecimento do resíduo de lapidação de vidro.

À Atual Têxtil, pelo fornecimento das cinzas de madeira.

À Mizu Cimentos Especiais pela realização da análise de fluorescência de raios x (FRX) dos resíduos.

Por último, mas não menos importante, a todos os profissionais envolvidos no processo da minha graduação, desde os motoristas do transporte universitário, Oziel, “Motor” e Reginaldo, aos funcionários do instituto, Ingrid, Juci, João e Márcio.

RESUMO

A construção civil é uma das indústrias responsáveis pela grande quantidade de dióxido de carbono (CO_2) emitido na atmosfera, resultante do processo de fabricação do cimento, além do consumo elevado de recursos naturais no preparo dos produtos cimentícios. Junto a isso, resíduos com potencial pozolânico são descartados em aterros sanitários. Assim, a busca pela utilização desses tipos de resíduos como materiais suplementares em produtos cimentícios tornou-se essencial em pesquisas, principalmente quando atrelada à visão do desenvolvimento sustentável em meio à construção civil. Dessa maneira, a presente pesquisa tem como objetivo a análise da influência do uso de resíduo de lapidação de vidro (RLV), cinza de madeira (CM) e suas misturas híbridas nas propriedades da argamassa, ao substituir parcialmente o cimento Portland. As argamassas foram produzidas com a incorporação de resíduos de lapidação de vidro em 10%, 20% e 30%, cinzas de madeira em 10% e as misturas híbridas de resíduos de lapidação de vidro (10%, 20% e 30%) e cinzas de madeira (10%), totalizando sete formulações. Os ensaios de caracterização realizados para os materiais componentes e argamassas produzidas seguiram as prescrições normativas vigentes. De modo a analisar as propriedades no estado fresco, foi avaliado o teor de ar das argamassas e, no estado endurecido, a absorção de água por capilaridade, retração, resistência potencial de aderência à tração, resistência à compressão e durabilidade. Os resultados obtidos nos ensaios foram analisados por meio da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, a fim de comparar com os valores obtidos na referencial teórico. Dessa maneira, foi possível produzir argamassa com incorporação de resíduos, que apresentou diminuição na retração (1% - 48%) e absorção de água (4% - 31%), além de maior durabilidade (50% - 240%) e resistência mecânica (5% - 38%), e teor de ar sem variação significativa. E, assim incentivar o menor consumo de materiais convencionais para a produção de argamassas e a utilização de materiais com potencial pozolânico, que seriam descartados, contribuindo, dessa maneira, para o desenvolvimento sustentável em meio à construção civil.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Argamassa. Resíduo de vidro. Cinza de madeira. Mistura híbrida.

ABSTRACT

Civil construction is one of the industries responsible for the large amount of carbon dioxide (CO₂) emitted into the atmosphere, resulting from the cement manufacturing process, in addition to the high consumption of natural resources in the preparation of cementitious products. Along with this, residues with pozzolanic potential are disposed of in landfills. Thus, the search for the use of these types of waste as supplementary materials in cement products has become essential in research, especially when tied to the vision of sustainable development in the midst of civil construction. Thus, the present research aims to analyze the influence of the use of glass cut residue (RLV), wood ash (CM) and its hybrid mixtures on the properties of mortar, by partially replacing Portland cement. Mortars were produced with the incorporation of glass cut residues in 10%, 20% and 30%, wood ash in 10% and hybrid mixtures of glass cut residues (10%, 20% and 30%) and wood ash (10%), totaling seven formulations. The characterization tests performed for the component materials and mortars produced followed the current normative requirements. In order to analyze the properties in the fresh state, the air content of the mortars was evaluated and, in the hardened state, the water absorption by capillarity, shrinkage, tensile bond strength, mechanical strength and durability. The results obtained in the assays were analyzed by means of variance analysis (ANOVA) and Tukey's test, in order to compare with the values obtained in the theoretical framework. Thus, it was possible to produce mortar with incorporation of residues, which showed a decrease in shrinkage (1% - 48%) and water absorption by capillarity (4% - 31%), in addition to greater durability (50% - 240%) and mechanical strength (5% - 38%), and air content without significant variation. And thus encourage the lower consumption of conventional materials for the production of mortars and the use of materials with pozzolanic potential, which would be discarded, thus contributing to sustainable development in the construction environment.

Keywords: Sustainability. Mortar. Glass residue. Wood ash. Hybrid mix.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo para obtenção do resíduo de lapidação de vidro	21
Figura 2 – Fluxograma da programação experimental	37
Figura 3 – RLV seco em estufa	39
Figura 4 – RLV passante na peneira 75 μm	39
Figura 5 – CM seca em estufa	40
Figura 6 – CM passante na peneira 75 μm	40
Figura 7 – Etapas do ensaio de retração	43
Figura 8 – Etapas do ensaio de absorção de água por capilaridade	44
Figura 9 – Etapas do ensaio de resistência potencial de aderência à tração	46
Figura 10 – Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento com chapisco e esquema do conjunto de camadas (revestimento, cola e pastilha)	46
Figura 11 – Curva granulométrica do agregado miúdo	50
Figura 12 – Resultados de teor de ar	54
Figura 13 – Resultados de resistência à compressão	55
Figura 14 – Resultados de retração	57
Figura 15 – Resultados de absorção de água por capilaridade	59
Figura 16 – Resultados de resistência potencial de aderência à tração	61
Figura 17 – Resultados de perda de massa no ensaio de durabilidade	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resíduos de vidro utilizados na produção de argamassas	19
Tabela 2 – Principais compostos químicos dos resíduos de vidro	19
Tabela 3 – Cinzas de madeira utilizadas na produção de argamassas	22
Tabela 4 – Principais compostos químicos das cinzas de madeira	22
Tabela 5 – Valores de teor de ar presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira	24
Tabela 6 – Valores de resistência à compressão presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira	26
Tabela 7 – Resultados de retração presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira	29
Tabela 8 – Resultados de absorção de água por capilaridade presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira	31
Tabela 9 – Resultados de resistência de aderência à tração presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira	33
Tabela 10 – Resultados de durabilidades presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira	35
Tabela 11 – Formulações dos corpos de prova	41
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de caracterização do cimento	49
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo	50
Tabela 14 – Composição química do resíduo de lapidação de vidro	51
Tabela 15 – Composição química da cinza de madeira	52
Tabela 16 – Valores de massa específica das cinzas de madeira presentes na literatura	53
Tabela 17 – Formas de ruptura mais recorrentes	61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – Relação água/cimento

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

ANOVA – Análise de variância

C - Coulomb

CaCO_3 – Carbonato de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

Ca(OH)_2 – Hidróxido de cálcio (portlandita)

Cl - Cloro

cm - Centímetro

CM – Cinza de madeira

CO_2 – Dióxido de carbono

CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

CV – Cinzas volantes

Fe_2O_3 – Óxido férrico

FRX – Fluorescência de raios X

g/cm^2 – Grama por centímetro quadrado

H_2SO_4 – Ácido sulfúrico

IFS – Instituto Federal de Sergipe

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

K_2O – Óxido de potássio

MCS – Material Cimentício Suplementar

MgO – Óxido de magnésio

mm – Milímetro

MnO – Óxido de manganês (II)

MPa – Megapascal

m²/s – Metro quadrado por segundo

m³ – Metro cúbico

Na₂O – Óxido de sódio

Na₂SO₄ – Sulfato de sódio

NBR – Norma Brasileira

P₂O₅ – Pentóxido de fósforo

RAA – Reação álcali-agregado

RLVs – Resíduos de lapidação de vidro

SAAE – Serviço Autônomo de Abastecimento de Água e Esgoto

SiO₂ – Dióxido de silício (sílica)

SO₃ – Trióxido de enxofre

TiO₂ – Dióxido de titânio

µm – Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
2.2	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDRO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	18
2.2.1	Resíduos de lapidação de vidro	20
2.3	UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE MADEIRA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS	21
2.4	ARGAMASSA	23
2.4.1	Propriedades das argamassas contendo resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira	23
2.4.1.1	<i>Teor de ar</i>	24
2.4.1.2	<i>Resistência à compressão</i>	25
2.4.1.3	<i>Retração</i>	28
2.4.1.4	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	31
2.4.1.5	<i>Resistência potencial de aderência à tração</i>	32
2.4.1.6	<i>Durabilidade</i>	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	MATERIAIS	38
3.1.1	Cimento Portland	38
3.1.2	Agregado Miúdo	38
3.1.3	Água	39
3.1.4	Resíduos de Lapidação de Vidro	39
3.1.5	Cinzas de Madeira	40

3.2	MÉTODOS	40
3.2.1	Dosagem e preparo dos corpos de prova das argamassas	41
3.2.2	Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco	42
3.2.2.1	<i>Teor de ar</i>	42
3.2.3	Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido	42
3.2.3.1	<i>Resistência à compressão</i>	42
3.2.3.2	<i>Retração</i>	43
3.2.3.3	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	44
3.2.3.4	<i>Resistência potencial de aderência à tração</i>	45
3.2.3.5	<i>Durabilidade</i>	47
3.2.4	Tratamento e análise de dados	47
3.2.5	Metodologia de análise comparativa	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	49
4.1.1	Cimento Portland	49
4.1.2	Agregado miúdo	49
4.1.3	Resíduo de lapidação de vidro	51
4.1.4	Cinza de madeira	52
4.2	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DAS ARGAMASSAS	53
4.2.1	Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco	53
4.2.1.1	<i>Teor de ar</i>	53
4.2.2	Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido	54
4.2.2.1	<i>Resistência à compressão</i>	54
4.2.2.2	<i>Retração</i>	56
4.2.2.3	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	58
4.2.2.4	<i>Resistência potencial de aderência à tração</i>	61
4.2.2.5	<i>Durabilidade</i>	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5.1	CONCLUSÕES	65

5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Há estimativa de que a produção de cimento tenha um aumento anual de 4,3 bilhões de toneladas, métrica de 2015, para 6,1 bilhões de toneladas em até 2051, sendo a emissão de dióxido de carbono (CO₂), gerado na fase de clínquer, avaliada numa proporção aproximada de uma tonelada para cada tonelada de cimento produzido (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). A indústria enfrenta desafios como o aumento dos custos no fornecimento de energia, que são requisitos para reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera, além de fornecer matéria-prima em quantidade e qualidade suficientes para diversos setores (MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012).

Além disso, a disponibilidade de materiais cimentícios suplementares (MCS) convencionais, que são materiais que podem ser usados como substituto parcial ao clínquer na produção do cimento, tem sofrido uma diminuição, o que levou aos pesquisadores buscarem novos materiais para serem utilizados com MCS, resultando numa maior exploração de resíduos sólidos moderadamente reativos, como cinzas incineradas e vidros residuais (ALI; XUAN; POON, 2020).

Apenas 21% do vidro produzido no mundo anualmente são reciclados, sendo uma taxa de reciclagem baixa para um material que é 100% reciclável (HARDER, 2018). Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2017), o Brasil recicla em torno de 47% do vidro produzido, o que mesmo sendo uma taxa superior à mundial, é mal gerido, já que a maioria dos resíduos encontram-se presentes em aterros sanitários (HIGUCHI, et al., 2021). Os resíduos de vidro provenientes do corte e da lapidação de vidro são os que apresentam maiores taxas de descarte em aterros por não apresentarem eficiência para a reutilização, o que acarreta em problemas ambientais (KIM; YI; ZI, 2015).

Diversos benefícios podem ser atingidos com reaproveitamento do vidro ao ser utilizado tanto na produção de cimento, quanto em materiais cimentícios, como: diminuição na emissão de gases de efeito estufa, preservação do meio ambiente e redução da disposição de resíduos em aterros e lixões (HE, et al., 2020).

De acordo com estudos, há influência direta do pó de vidro nas propriedades do material em que foi incorporado, principalmente quando avaliada a sua finura, já que o tamanho das partículas de vidro tem importância quanto ao comportamento pozolânico do material. Assim, quanto mais finas forem essas partículas, maior será a sua reatividade, o que afetará

positivamente nas propriedades do material em que ele é incorporado (AFSHINNIA; RANGARAJU, 2015).

Jiang, et al. (2022) avaliaram a reatividade pozolânica de resíduos de vidro em pó, e perceberam que a substituição parcial do cimento por vidro contribui para uma melhoria na trabalhabilidade e no prolongamento do tempo de pega quando comparado com a amostra de referência. Após o endurecimento, há uma fraca aderência entre as partículas do vidro com as de cimento, além de uma leve perda de resistência ao ser utilizado partículas de maiores tamanhos. Entretanto, a incorporação de vidro proporcionou uma excelente resistência a altas temperaturas, o que favoreceu ao preenchimento dos poros e maior densidade da matriz, melhorando a resistência mecânica da amostra.

Outro material utilizado para substituir parcialmente o cimento na produção de argamassas são as cinzas de madeira, obtidas através da combustão da madeira e de materiais que possuam relação com a madeira, provenientes do descarte doméstico ou industrial (HAMID; RAFIQ, 2021).

No cenário mundial, as cinzas de madeira provenientes da combustão em usinas termelétricas são aterradas em um percentual de aproximadamente 70%, sendo o restante utilizado como suplemento ao solo e diversas aplicações (CHEAH; RAMLI, 2012). Por serem destinadas em sua grande parte para aterros, as cinzas de madeira podem gerar riscos à saúde da população que reside nas proximidades ou ser uma fonte de poluição, já que suas partículas podem ser facilmente transportadas pelo vento (SIGVARDSEN, et al., 2019).

De acordo com o estudo realizado por Sigvardsen, et al. (2019), no qual as cinzas de madeira foram avaliadas em comparação com as prescrições normativas das cinzas volantes provenientes da combustão do carvão, os autores chegaram à conclusão que as cinzas de madeira possuem propriedades pozolânicas. Assim, como forma de mitigar a emissão de gases CO₂ provenientes da fabricação do cimento, além de estimular o uso das cinzas presentes em aterros sanitários, pesquisadores estão impulsionando estudos quanto à substituição parcial do cimento por cinzas de madeira de modo a promover a sustentabilidade em meio à construção civil.

Ince, Tayançlı e Derogar (2021) analisaram a influência de cinzas de biomassa aplicadas em substituição ao cimento para avaliar o desempenho de argamassas. Mesmo que a incorporação do resíduo tenha provocado ligeira redução na consistência e na resistência à compressão,

sendo apresentados valores adequados para utilização, há um aumento no tempo de pega e uma melhoria na densidade e compactação microestrutural das argamassas, comprovando, dessa maneira, eficiência em sua aplicação na produção de materiais cimentícios.

Visando a busca por um desenvolvimento sustentável em meio à construção civil, esta pesquisa tem por objetivo a análise da influência do uso de resíduos de lapidação de vidro, cinza de madeira e suas misturas híbridas nas propriedades da argamassa, ao substituir parcialmente o cimento Portland. Os ensaios de caracterização realizados nos materiais componentes e nas argamassas produzidas seguiram as prescrições normativas vigentes. As propriedades analisadas foram, no estado fresco, o teor de ar, e no estado endurecido: a resistência à compressão, retração, durabilidade, absorção de água por capilaridade e resistência potencial de aderência à tração.

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar da existência de muitas pesquisas relacionadas à adição de resíduos de vidro em materiais cimentícios sejam presentes, em grande recorrência, na literatura, a utilização de resíduos de lapidação de vidro é escassa, assim como a sua mistura híbrida com as cinzas de madeira.

A viabilidade na utilização da mistura híbrida de resíduos de vidro e cinzas de madeira torna-se uma solução promissora para o desenvolvimento sustentável em meio à construção civil. Kim, Yi e Zi (2015) avaliaram que argamassas que continham misturas híbridas de resíduo de lapidação de vidro e cinzas volantes apresentaram uma redução na expansão, oriunda da reação álcali-agregado (RAA), devido à presença de sílica em grande parte da composição do vidro, além de proporcionar benefícios em propriedades como durabilidade e resistência à compressão. Além disso, foi constatado por Nassar, et al. (2022) que há queda na resistência à compressão das argamassas quando o teor de cinzas de madeira ultrapassa 10%, o que se deve à redução no teor de Portlandita disponível para reagir com as partículas das cinzas, diminuindo, dessa maneira, o nível de reação pozolânica.

Dessa forma, aliado à sustentabilidade, essa pesquisa propõe a análise da influência do uso de resíduo de lapidação de vidro, cinza de madeira e suas misturas híbridas nas propriedades da argamassa, ao substituir parcialmente o cimento Portland, exclusivamente para as propriedades de teor de ar, para o estado fresco, e a resistência à compressão, retração,

durabilidade, absorção de água por capilaridade e resistência potencial de aderência à tração, para o estado endurecido.

1.2 OBJETIVOS

A seguir, serão apresentados os objetivos, geral e específicos, do presente estudo.

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo geral a análise da influência do uso de resíduo de lapidação de vidro, cinza de madeira e suas misturas híbridas nas propriedades da argamassa, ao substituir parcialmente o cimento Portland.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Explorar o estado da arte quanto à incorporação de resíduos de lapidação de vidro, cinzas de madeira e suas misturas híbridas em materiais cimentícios;
- Determinar as propriedades tanto dos materiais utilizados para compor a argamassa, quanto das argamassas produzidas;
- Adquirir formulações a partir de diferentes percentuais de incorporação de resíduos de lapidação de vidro, cinzas de madeira e suas misturas híbridas;
- Verificar a influência da incorporação de resíduos de lapidação de vidro, cinzas de madeira e suas misturas híbridas no teor de ar, na resistência à compressão, retração, durabilidade, absorção de água por capilaridade e resistência potencial de aderência à tração das argamassas produzidas;
- Realizar a análise dos dados experimentais obtidos e compará-los com valores presentes na literatura;
- Produzir materiais sustentáveis para a construção civil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Seguindo o objeto de pesquisa, este tópico apresentará um contexto com menções a artigos científicos, normas técnicas, livros e teses baseados na mesma linha de pesquisa, de modo a buscar um maior embasamento e solidificação na análise e comparação dos resultados encontrados no presente estudo.

2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A emissão de CO₂ na atmosfera é um fator que preocupa de forma ecológica as entidades mundiais e, de acordo com Soldado, et al. (2021), esforços estão sendo levados em conta para que haja a neutralidade do carbono. Por conta do seu desempenho nas emissões de carbono, a construção civil é uma área que necessita de ações que promovam o desenvolvimento da sustentabilidade ambiental em seu meio.

Os materiais cimentícios são predominantemente utilizados na construção civil, por isso, uma quantidade elevada de cimento é necessária para suprir a produção desses materiais. O uso intenso de energia na fabricação de cimento acaba contribuindo no lançamento de CO₂, sendo este um dos responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, em consequência ao aquecimento global, o que torna essas indústrias responsáveis pela emissão de 5% a 7% do material na atmosfera, auxiliando para o aumento da temperatura do planeta (KABAY; MIYAN; ÖZKAN, 2021).

Além disso, o crescimento na geração de resíduos, mundialmente, provenientes do desenvolvimento populacional e industrial, tornou-se uma questão estratégica imprescindível à busca pelo aproveitamento de forma eficaz desses materiais (EZ-ZAKI; EL GHARBI; DIOURI, 2018). Por conta da escassez de espaços em aterros sanitários, os resíduos representam uma ameaça ao meio ambiente, sendo a sua reutilização em meio à construção civil uma solução promissora para a redução do volume destes materiais (HACINI, et al., 2021).

Assim, Cercel, Adesina e Das (2021) apontam que houve uma crescente quanto à conscientização da sustentabilidade na construção civil, de modo que a busca na implementação de materiais alternativos para substituição ao cimento tornou-se crucial. O crescimento da população e, consequentemente, o aumento da urbanização, são fatores que fazem com que a busca por materiais de construção civil também seja elevada, tornando-se

necessária a utilização de novos materiais com capacidade de serem pozolânicos, de forma a assegurar a maior sustentabilidade nesta área.

2.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE VIDRO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

De acordo com Trentin, et al. (2020), a produção de embalagens de vidro no Brasil é, em média, de 980 mil toneladas anualmente, sendo menos da metade desse material produzido reciclado. O seu descarte é, geralmente, destinado a aterros sanitários, onde o vidro entra em contato com impurezas presentes no local, que dificultam a separação do material para que possa ser feita a sua reciclagem, além do seu transporte não ser economicamente viável, o que contribui para que grande quantidade desses resíduos seja acumulada.

Segundo Rashidian-Dezfouli e Rangaraju (2021), o vidro apresenta, em sua composição química, uma estrutura rica em sílica vítrea, alumina e cálcio, o que o torna potencialmente utilizável como pozolana ou como material substituto para o preparo de geopolímeros. Wang (2011) afirma que, quando finamente moído, o resíduo de vidro é pozolânico, ou até mesmo possui propriedades cimentícias de forma natural, sendo ocasionado, principalmente, por conta da grande quantidade de silício e cálcio presentes em sua estrutura.

Assim, de modo a buscar formas para impulsionar a reciclagem deste resíduo, investigações têm sido realizadas a fim que seja feito o seu uso em materiais cimentícios através da sua adição, o que contribui beneficemente ao meio ambiente, diminuindo-se a emissão de CO₂ e gases de efeito estufa, além de reduzir a quantidade depositada do material em aterros, estimulando, dessa maneira, à prática da sustentabilidade (SACCANI, et al., 2017).

Na Tabela 1 estão apresentadas algumas pesquisas relacionadas à utilização de diferentes tipos de resíduos de vidro aplicados em substituição ao cimento na produção de argamassas, sendo o seu uso justificado, em maioria, devido à grande quantidade, desse tipo de resíduo, descartada em aterros, como visto anteriormente. São registradas, também, a granulometria, de 0,07 a 204 µm, e os teores de vidro, de 5% a 60%, utilizados por cada autor, a fim de avaliar a influência nas propriedades das argamassas produzidas. Segundo Gorospe, et al. (2019), há uma relação direta nas propriedades das argamassas com o tamanho e a quantidade de resíduo utilizado, por conta da influência direta na porosidade e na ligação com a matriz cimentícia.

Além disso, consta na Tabela 1 os tipos de resíduos de vidro utilizados em substituição parcial ao cimento, sendo este fator atrelado à sua composição química, que segundo Sales (2014), está relacionada à capacidade de ser aplicado como material pozolânico.

Tabela 1 – Resíduos de vidro utilizados na produção de argamassas presentes na literatura

Referências	Resíduo utilizado	Granulometria	Percentual de resíduo
Hwang e Cortés (2021)	Pó de vidro residual moído proveniente de garrafas de vidro	0,07 a 30,1 μm	5% / 7,5% / 10% / 12,5% / 15%
Kim e Yang (2021)	Pó de vidro residual moído	13,07 μm	0% / 10% / 20%
Nahi, et al. (2020)	Pó de vidro verde provenientes de vários tipos de garrafas de vinho e licores	< 63 μm	0% / 10% / 25% / 35% / 60%
Silva, et al. (2020)	Resíduos de lapidação de vidro	< 300 μm	0% / 10% / 20% / 30%
Liu, Florea e Brouwers (2019)	Vidro residual colorido moído	10,97 μm	0% / 10% / 30% / 60%
Lu, Duan e Poon (2017)	Pó de vidro e casca de vidro	18,8 a 204 μm	20%
Parghi e Alam (2016)	Pó de vidro triturado de garrafas	25 a 75 μm	0% / 5% / 10% / 15% / 20% / 25%

Fonte: O Autor (2023).

Na Tabela 2 são apresentadas as composições químicas de resíduos de vidro utilizados por diferentes autores presentes na literatura. Apesar da diferença entre os compostos ser elevada, a superioridade no teor de sílica (SiO_2), numa faixa entre 47,71% a 71%, é comum entre eles, sendo afirmado por Sales (2014) que esse maior percentual do composto proporciona ao resíduo um potencial de ser utilizado como material pozolânico suplementar na confecção de produtos cimentícios.

Tabela 2 – Principais compostos químicos dos resíduos de vidro

Autor	Composição Química (%)								
	SiO_2	K_2O	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	SO_3	Cl
Li, et al. (2022)	69,31	0,06	9,53	2,53	0,31	3,42	11,42	0,02	-
Rashidian-Dezfouli e Rangaraju (2021)	47,72	0,10	19,62	2,27	0,34	10,36	0,67	-	-
Silva, et al. (2020)	64,75	0,07	8,10	3,14	0,31	3,38	12,28	-	-
Saccani, et al. (2017)	70,4	1,21	11,3	1,47	<0,01	2,06	13,4	-	-

Fonte: O Autor (2023).

2.2.1 Resíduo de lapidação de vidro

Diferentemente de outros tipos de resíduos provenientes de embalagens de vidro, os resíduos de lapidação de vidro (RLVs), decorrentes de indústrias vidreiras que realizam o corte e polimento desse material, são depositados com maior frequência em aterros sanitários por não serem usualmente reutilizados, o que contribui para a ocorrência de problemas ambientais relacionados ao seu acúmulo (KIM; YI; ZI, 2015).

O processo para a obtenção do resíduo de lapidação de vidro foi exemplificado por Filogônio (2016), sendo este expresso a seguir:

Os resíduos gerados pelo processo de lapidação do vidro são originados anteriormente à têmpera, de modo a proporcionar a retirada de imperfeições e polimento do material. No processo é feita a utilização de água à temperatura da superfície, a fim de evitar danos ao vidro e aos equipamentos.

Devido à grande quantidade de água utilizada, há a necessidade de reutilização do recurso, visando a redução dos custos e impactos ambientais. Assim, a água contendo o resíduo de lapidação de vidro passa por um processo que tem por objetivos a sua limpeza e a coleta dos resíduos presentes.

Inicialmente a água contendo os resíduos de vidro é conduzida até tanques onde será feito o bombeamento para um reservatório e, posteriormente, a um silo de decantação para adição de produtos químicos para que haja floculação e, conseqüentemente, a separação da água e dos resíduos. A água tratada é acumulada e bombeada até os galpões para que possa ser feita a sua reutilização no processo de lapidação do vidro.

A lama de vidro armazenada no fundo do tanque é encaminhada até um tanque agitador, onde é realizada uma mistura a fim de que não decante. Em seguida, o material é transportado para um filtro prensa que irá realizar a retirada do máximo de água presente na mistura, restando apenas o resíduo de lapidação de vidro.

A Figura 1 a seguir representa o processo descrito anteriormente de modo simplificado.

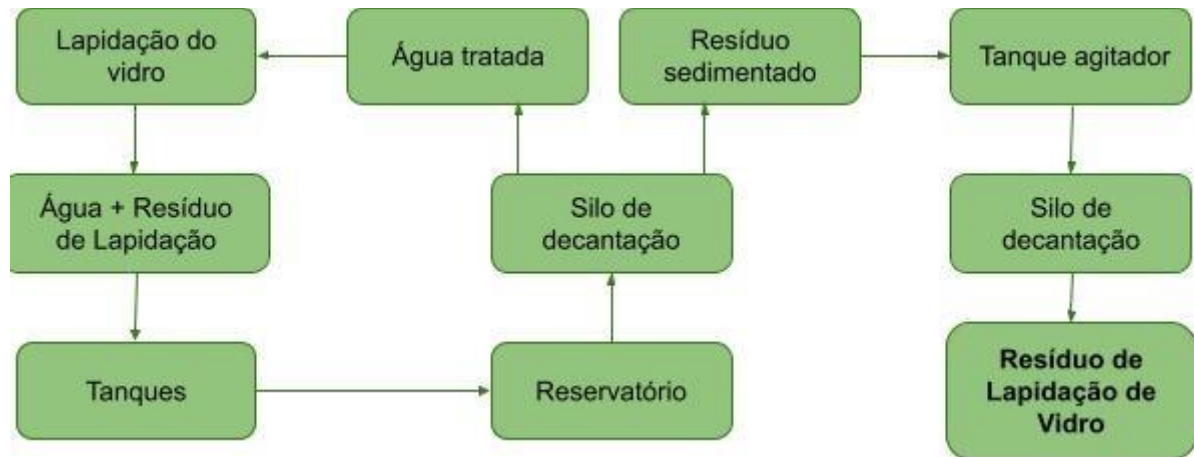


Figura 1 – Fluxograma do processo para obtenção do resíduo de lapidação de vidro (O Autor, 2023).

2.3 UTILIZAÇÃO DE CINZAS DE MADEIRA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

O Brasil apresenta taxas elevadas de cultivos florestais, com produtividade que varia em torno de 35 a 60 m³ por hectares, anualmente. Boa parte dessas madeiras cultivadas são destinadas à produção de energia elétrica por biomassa, sendo obtido como produto cinzas com baixo teor de elementos tóxicos. No entanto, devido à elevada produtividade de energia, uma grande quantidade desses resíduos é gerada, tornando-se uma grande parcela em desuso e deslocadas a aterros sanitários (ACORDI, et al., 2020).

Siddique (2012) afirma que cerca de 70% do descarte das cinzas de madeira provenientes da combustão são realizados em aterros sanitários inadequadamente, o que contribui para o desencadeamento da poluição ambiental. De acordo com Abdulkareem, Ramli e Matthews (2019), o acúmulo das cinzas na superfície contribui para a poluição das águas subterrâneas por meio da lixiviação dos seus constituintes, além da facilidade da dispersão das partículas através dos ventos.

Diversos estudos relacionados à aplicação das cinzas de madeira em argamassas como substituto parcial aos aglomerantes e aos agregados foram realizados a fim de proporcionar a redução desses resíduos presentes em abundância nos aterros sanitários. Na Tabela 3 são apresentados os tipos de cinzas de madeira utilizadas por cada autor, bem como suas respectivas granulometrias, entre 0,3 a 1000 µm, e dosagens, entre 2% a 100% de substituição por cada material.

Tabela 3 – Cinzas de madeira utilizadas na produção de argamassas

Referências	Resíduo utilizado	Granulometria	Percentual de resíduo	Material substituído
Gerges, et al. (2021)	Cinza de madeira coletada em uma padaria local	0,13 a 0,60 mm	2% / 4% / 6% / 8% / 10% / 15% / 20%	Cimento
Ince, Tayançlı e Derogar (2021)	Pó e fibra de madeira de pinheiro da Calábria (Pinus brutia)	0,6 a 300 µm	1% / 2% / 3% / 4% / 5%	Cimento e agregado
Sigvardsen, Geiker e Ottosen (2021)	Cinzas da combustão em grelha e da combustão de leito fluidizado circulante	≤ 250 µm	100%	Cimento
Acordi, et al. (2020)	Cinzas volantes de madeira	< 45 µm	17% / 33% / 50%	Cimento
Abdulkareem, Ramli e Matthews (2019)	Cinza de madeira de biomassa com alto teor de cálcio	0,3 a 35 µm	10% / 20% / 30%	Cinzas volantes

Fonte: O Autor (2023).

Segundo Fusade, et al. (2019), há influência direta da granulometria e do percentual de substituição no desempenho das argamassas, por conta da alteração na porosidade, que interfere em diversas propriedades, principalmente a diminuição da absorção de água, aumento da resistência mecânica e durabilidade, além da composição química delas que variam de acordo com o tipo e origem das cinzas.

As composições químicas das cinzas de madeira encontradas em diferentes estudos presentes na literatura estão presentes na Tabela 4, na qual os valores expressos são destoantes entre si, porém, com óxido de cálcio (CaO) presente em maior abundância entre todos os componentes, numa faixa que varia entre 27,4% a 61%. Segundo Hamid e Rafiq (2021), os componentes CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e MgO, presentes em abundância na composição química das cinzas, reagem na presença de umidade, criando agentes de ligação, o que torna o material potencialmente pozolânico.

Tabela 4 – Principais compostos químicos das cinzas de madeira

Autor / Tipo de madeira	Composição Química (%)										
	CaO	K ₂ O	SiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O
Souza, Antunes e Sanchez (2022) / Não informado	42,01	7,59	5,59	1,76	1,82	4,08	1,26	0,79	-	-	0,21
Sigvardsen, Geiker e Ottosen (2021) / Não informado	48,9	16,8	8,60	-	-	3,80	2,30	1,90	5,40	-	2,2

(Continua)

(Conclusão)

Abdulkareem,
Ramli e
Matthews (2019)
/ Madeira de
seringueira
(Hevea
brasiliensis)

Fusade, et al.
(2019) / Não
informado

61,0	12,0	2,10	0,86	2,70	8,70	1,30	1,30	2,80	0,11	-
49,0	25,8	9,34	3,43	3,29	2,66	1,98	1,18	1,02	-	-

Fonte: O Autor (2023).

2.4 ARGAMASSA

A argamassa é definida, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na norma brasileira (NBR 13281:2005), como uma mistura homogênea composta por agregado miúdo, aglomerante e água, podendo haver a presença de aditivos ou não, com propriedades de aderência e endurecimento, sendo sua dosagem realizada em obra ou instalação própria (instalações industriais).

De acordo com Recena (2015), levando em consideração a interação do substrato com o ambiente, e considerando a argamassa como um elemento constituinte do sistema e não como material isolado, elas devem desempenhar algumas funções consideradas primordiais, sendo estas: garantir ao paramento revestido um bom acabamento; absorver as deformações naturais que solicitam a estrutura; regularizar e/ou proteger mecanicamente substratos constituídos por sistemas de impermeabilização ou isolamento acústico; unir os elementos que compõem a alvenaria de forma solidária; garantir a adesão ao substrato dos elementos de revestimento em pisos e fachadas; distribuição dos esforços atuantes na alvenaria uniformemente; garantir a impermeabilidade das alvenarias de elementos à vista (sem revestimento).

2.4.1 Propriedades das argamassas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira

Serão abordadas a seguir algumas propriedades das argamassas, assim como resultados obtidos por diferentes autores na literatura, relacionadas à adição de resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira em suas composições, sendo priorizadas pesquisas nas quais o cimento era o material a ser substituído por esses resíduos. No entanto, devido à escassez de pesquisas relacionadas a algumas propriedades, foram utilizados, também, estudos que tinham como foco a substituição parcial do agregado pelos resíduos, para fins de comparação.

2.4.1.1 Teor de ar

De acordo com a ABNT NBR 9833:2009 teor de ar é a quantidade de ar em volume aprisionado ou incorporado no material cimentício, em estado fresco, medido em porcentagem do volume total adensado. O controle do teor de ar é de fundamental importância devido a sua influência direta na consistência e durabilidade das argamassas, uma vez que a quantidade de ar presente pode tornar o material mais trabalhável à medida que o seu teor aumenta, enquanto são afetadas negativamente as resistências físicas e químicas, depois de endurecido por gerar elevada porosidade, sendo o seu controle crucial para manter a qualidade da argamassa (SANTOS, 2016).

Os resultados presentes na Tabela 5, referentes aos valores encontrados na literatura, mostram os teores de ar com até 30% de substituição de cimento e agregado por resíduos de vidro ou cinzas de madeira, bem como as amostras de referência, a fim da comparação de valores e avaliação da melhor substituição entre elas.

Tabela 5 – Valores de teor de ar presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira

Autor	Resíduo utilizado / Material substituído	Substituição (%)	Teor de ar (%)	Acréscimo/ Decréscimo
				Máximo (%) (% de resíduos)
Cherene, et al. (2019)	V / C	0% / 5% / 10% / 15% / 20%	12 / 14 / 13 / 13 / 12	0 (20%)
Ribeiro (2015)	V / C	0% / 5% / 10% / 15% / 20% / 25%	8,1 / 7,5 / 8,3 / 8,1 / 7,5 / 8,3	↓7,41 (5% / 20%)
Lordelo (2018)	V / A	0% / 10% / 20% / 30%	20,4 / 20,7 / 21,0 / 21,3	↑1,47 (10%)
França, et al. (2016)	CM / C	0% / 10% / 20% / 30%	2,27 / 5,44 / 6,75 / 6,65	↑139,65 (10%)
Centenaro, Silva e Paulino (2021)	CM / A	0% / 5% / 10% / 15% / 20%	8 / 9 / 10 / 10 / 12	↑12,5 (5%)

↓ decréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento).

↑ acréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento).

CM: Cinza de madeira; V: Vidro; C: Cimento; A: Agregado.

Fonte: O Autor (2023).

Os resultados mostram que o teor de ar presente nas amostras de todas as pesquisas aumenta à medida que o cimento ou agregado são substituídos pelos resíduos de vidro e cinzas de madeira, sendo verificada uma tendência no aumento da quantidade de ar à medida que o nível de substituição também cresce, independente da quantidade de resíduos empregada, além de um melhor desempenho das amostras com 10% de incorporação, em maioria. As

características físicas das partículas dos resíduos, como o formato pontiagudo e a granulometria, são fatores determinantes para que aumente o teor de ar das argamassas no estado fresco (SANTOS, 2016; FRANÇA, et al., 2016).

Cherene, et al. (2019) e Lordelo (2018), substituíram o cimento e o agregado por resíduos de vidro, respectivamente, sendo verificado em ambos estudos que as argamassas com vidro incorporado apresentaram teores de ar superiores às argamassas de referência, independente do material substituído, ocasionado pelo formato pontiagudo do vidro que não favorece na saída de ar das misturas e, conseqüentemente, na redução da densidade no estado fresco, propriedade esta inversamente proporcional ao teor de ar.

Centenaro, Silva e Paulino (2021) substituíram a areia por cinzas de madeira de biomassa com tamanho de partículas entre 0,07 a 5 mm em frações de 5%, 10%, 15% e 20%. Os resultados do teste de teor de ar inferem que à medida que é realizada a incorporação de maior quantidade de cinzas nas misturas das argamassas, a quantidade de ar presente na mistura fresca aumenta, resultante do índice de finura do resíduo ser inferior ao da areia e, conseqüentemente, distribuição granulométrica desuniforme, o que demonstra que não há uma contribuição para um empacotamento dos agregados. Dentre as amostras com cinzas de madeira incorporadas, a de 5% foi a que apresentou menor teor de ar entre elas, com aumento de 12,5% em relação à referência.

Na pesquisa de França, et al. (2016) foram utilizadas cinzas de eucalipto para substituir o cimento de forma parcial em 10%, 20% e 30% ao produzirem argamassas. Os autores realizaram ensaio de teor de ar para o estado fresco das amostras e de acordo com os resultados obtidos por eles, o aumento do percentual de substituição acarretou na presença de maior quantidade de ar aprisionado nas misturas, com acréscimo de 137,65% da amostra de 10% quando comparada com a de referência, justificado pela heterogeneidade na matriz com cinzas de madeira, havendo aumento da quantidade de poros ocasionados pelas partículas do resíduo apresentarem tamanhos pequenos e formatos cúbicos e prismáticos, o que desfavoreceu o atrito entre elas e menor densidade de empacotamento (OLIVEIRA, et al., 2000).

2.4.1.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão da argamassa é determinada como a capacidade de resistir a esforços resultantes de cargas atuantes ou de intempéries presentes na natureza, após o

endurecimento (NAKAKURA, 2003). É uma propriedade que depende diretamente do consumo de aglomerantes e agregados presentes em sua composição, além de variar inversamente com a relação água/cimento (a/c) (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

Diversos estudos abordam sobre a influência da adição de resíduos de vidro e cinzas de madeira na resistência à compressão de argamassas. Na Tabela 6 contém os valores de resistência de acordo com os respectivos percentuais de substituição, aos 28 dias, bem como o aumento/diminuição percentual em relação às amostras de referência, para cada estudo.

Tabela 6 – Valores de resistência à compressão presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira

Autor	Resíduo utilizado / Material substituído	Substituição (%)	Resistência à compressão (MPa)	Acréscimo/Decréscimo
				Máximo (%) (% de resíduos)
Li, et al. (2022)	V / C	0% / 10% / 15% / 20% / 25%	42 / 40 / 42 / 44 / 40	↑4,76 (20%)
Kim e Yang (2021)	V / C	0% / 10% / 20%	41 / 50,16 / 49,75	↑22,34 (10%)
Nahi, et al. (2020)	V / C	0% / 10% / 25% / 35% / 60%	54,5 / 48,6 / 42,4 / 41,8 / 28,6	↓10,83 (10%)
Liu, Florea e Brouwers (2019)	V / C	0% / 10% / 30% / 60%	59 / 54 / 49 / 34	↓8,47 (10%)
Kim, Yi e Zi (2015)	V / C	0% / 5% / 10% / 20%	40,5 / 42,5 / 41 / 41,5	↑4,94 (5% V e 20% V+CV)
	CV / C	10% / 20%	36,5 / 32	
	V + CV / C	20% (10% + 10%)	42,5	
Nassar, et al. (2022)	CM / C	0% / 5% / 10% / 15%	23,0 / 19,5 / 22,5 / 15,0	↓2,17 (10%)
Gerges, et al. (2021)	CM / C	0% / 2% / 4% / 6% / 8% / 10% / 15% / 20%	20,8 / 29,0 / 27,1 / 24,3 / 25,7 / 23,8 / 18,6 / 17,2	↑39,42 (2%)
Acordi, et al. (2020)	CM / C	0% / 17% / 33% / 50%	37,3 / 36,8 / 34,6 / 29,7	↓1,34 (17%)
Tosti, et al. (2018)	CM / C	0% / 20% / 40%	48 / 46 / 31	↓4,17 (20%)

↓ decréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento).

↑ acréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento).

CM: Cinza de madeira; V: Vidro; C: Cimento; CV: Cinza volante.

Fonte: O Autor (2023).

De acordo com a avaliação das pesquisas contempladas, os valores de resistência à compressão variam de acordo com o percentual de substituição de resíduos empregados, sendo que a maioria das amostras com até 25% de material incorporado apresentou um desempenho equivalente à de referência, e uma queda nos valores de resistência a partir de

30% de substituição. Há uma dependência de características físicas dos resíduos, como a granulometria, superfície e formato dos resíduos, além do fator água/cimento, de modo que seja garantida uma boa ligação dos resíduos com a matriz cimentícia e, conseqüentemente, o desenvolvimento da resistência das argamassas (PARGHI; ALAM, 2016; AFSHINNIA; RANGARAJU, 2015; SIGVARDSEN; GEIKER; OTTOSEN, 2021; GERGES, et al., 2021).

Parghi e Alam (2016) utilizaram frações de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de pó de vidro reciclado, com tamanho das partículas inferior a 75 μm , para substituir parcialmente o cimento na produção das argamassas e avaliaram o desempenho dos corpos de prova no teste de resistência à compressão, com 7, 28, 56 e 90 dias de idade. Com isso, os autores obtiveram como resultado um aumento nos valores à medida que o teor de vidro incorporado aumentava, sendo a melhora no desempenho obtida em todas as idades experimentadas, com aumento percentual de 33,33% da amostra de 25%, aos 28 dias. O vidro fino proporcionou o preenchimento dos vazios disponíveis entre a matriz cimentícia com os agregados miúdos e, conseqüentemente, no aumento dos valores de resistência à compressão.

Em contrapartida, Afshinnia e Rangaraju (2015) utilizaram dois tipos de resíduos de vidro, com tamanhos de 17 e 70 μm , para produzir argamassas com substituição parcial ao cimento, em teores de 5%, 10%, 15% e 20%. Os resultados mostraram que a adição do vidro 70 μm contribuiu para que os valores de resistência apresentados fossem inferiores aos das amostras de referência, diferentemente do vidro de 17 μm , que provocou certo aumento na resistência à compressão dos corpos de prova, devido ao preenchimento dos vazios, ilustrando que o vidro finamente moído pode ser utilizado como material cimentício suplementar. Segundo Li, et al. (2022), até certa finura do vidro utilizado, este pode proporcionar uma microestrutura mais densa e melhorar a ligação entre as faces da pasta de cimento com os agregados miúdos, o que acarreta no desenvolvimento de uma melhor resistência à compressão das amostras.

Sigvardsen, Geiker e Ottosen (2021) realizaram testes para avaliar a capacidade pozolânica de duas cinzas de madeira provenientes de duas localizações distintas. O teste de resistência à compressão foi realizado com amostras contendo as cinzas em substituição total ao cimento, em 7, 14, 28, 60 e 90 dias, o que resultou em valores de resistência inferiores aos de referência, em todas as idades avaliadas, sendo apresentado decréscimo de 15,02% aos 28 dias. No entanto, apesar dos resultados negativos, o teste comprovou que as cinzas de madeira possuem capacidade de serem utilizadas como material pozolânico, por endurecerem e desenvolverem certa resistência.

Nassar, et al. (2022) utilizaram cinzas de madeira com granulometria que variava entre 0,3 a 10 µm para substituir parcialmente o cimento, em frações de 5%, 10% e 15%, na produção de argamassa. Ao realizar o teste de resistência à compressão dos corpos de prova e avaliarem os resultados, foi perceptível um desenvolvimento de resistência até o nível de substituição de 10%, resultante do melhor preenchimento dos poros pelas partículas finas das cinzas, mesmo que esta tenha apresentado um decréscimo de 2,17% quando comparada com a amostra de referência. Entretanto, ao aumentar para 15%, houve uma queda na resistência da amostra, ocasionada pela diminuição no teor de cimento e, por consequência, menor teor de portlandita para reagir com as cinzas.

Gerges, et al. (2021) produziram uma argamassa ecológica com cinza de madeira, vidro moído fino e borracha triturada. As proporções utilizadas para confecção da amostra com todos os materiais misturados foram de 4% de cinza de madeira em substituição ao cimento, e uma mistura de cinza de madeira, borracha triturada e vidro fino substituindo o agregado em proporções de 30%, 2% e 30%, respectivamente. Ao avaliar a resistência à compressão, os resultados mostraram valores superiores em todas as idades (7, 14 e 28 dias), com aumento de 27,81% aos 28 dias, comprovando que a utilização de resíduos recicláveis em proporções ideais é eficaz para a produção de argamassas ecológicas.

2.4.1.3 Retração

A retração na secagem é um fenômeno resultante da perda de umidade nos poros dos materiais a base de cimento. Geralmente, a retração ocorre em maior proporção na presença de maior quantidade de pasta de cimento, sendo feito o controle pelos agregados presentes na mistura. Quando a deformação se dá em grandes proporções, podem surgir fissuras e rachaduras, o que afeta negativamente na durabilidade da argamassa, já que facilitará a passagem de substâncias deletérias, além de reduzir a resistência mecânica do material (GOROSPE, et al., 2019).

Na Tabela 7 estão os valores de deformação encontrados na literatura referentes à substituição parcial e total dos componentes das argamassas por resíduos de vidro e cinzas de madeira, bem como o acréscimo/decrécimo da variação dimensional em relação às amostras de referência.

Tabela 7 – Resultados de retração presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira

Autor	Resíduo utilizado / Material substituído	Substituição (%)	Deformação (mm)	Acréscimo/ Decréscimo
				Máximo (%) (% de resíduos)
Hamzah, et al. (2022)	V / C	0% / 5% / 10% / 15% / 20%	0,27 / 0,265 / 0,26 / 0,25 / 0,245	↓9,26 (20%)
Liu, Florea e Browers (2019)	V / C	0% / 10% / 30% / 60%	0,58 / 0,53 / 0,58 / 0,60	↓8,62 (10%)
Lu, et al. (2017)	V / C	0% / 20%	0,67 / 0,46	↓31,34 (20%)
Cheah e Ramli (2012)	CM / C	0% / 5% / 10% / 15% / 20% / 25%	0,59 / 0,47 / 0,57 / 0,62 / 0,68 / 0,71	↓20,34 (5%)
Carinaldesi, Mazzoli e Siddique (2016)	CM / A	0% / 2,5% / 5% / 10%	0,338 / 0,448 / 0,697 / 0,912	↑32,54 (2,5%)

↓ decréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento/agregado).

↑ acréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento/agregado).

CM: Cinza de madeira; V: Vidro; C: Cimento; A: Agregado.

Fonte: O Autor (2023).

Os valores ilustrados na Tabela 7 mostram que as amostras com baixo teor de vidro e cinzas de madeira em substituição ao cimento apresentam menor deformação, quando comparadas com aquelas que contêm elevadas quantidades de resíduos incorporados, sendo verificado, o melhor desempenho na faixa de 5% a 20%, ao verificar diferentes estudos. As características físicas dos resíduos utilizados, como o formato e a superfície lisa, são de grande relevância para a determinação da deformação, levando em conta que influencia diretamente na quantidade de água livre presente na matriz, que evapora na hidratação do cimento (PATEL, et al., 2020; CHEAH; RAMLI, 2012; LIU, FLOREA, BROUWERS, 2019).

Patel, et al. (2020) substituíram, em seus estudos, o cimento por pó de vidro fino residual, em teores de 10% e 20%, a fim de avaliarem a retração sofrida na secagem das argamassas, e perceberam que quanto maior a quantidade de vidro incorporado, menor é a retração. Este fato é justificado, segundo os autores, pela morfologia lisa, menor índice de absorção e a coesão entre as partículas deste, que não absorvem a água livre disponível na matriz cimentícia, fazendo com que esta seja eliminada de uma maneira mais fácil na hidratação do cimento, resultando em uma menor deformação. Patel, et al. (2019) ainda complementam que o pó de vidro pode aderir ao cimento, proporcionando uma melhora nas partículas finas na fase de interação entre os dois materiais.

Liu, Florea e Brouwers (2019) aplicaram vidro residual colorido em substituição ao cimento em 10%, 30% e 60%, o que resultou em uma deformação ligeiramente menor da amostra que continha 10% de substituição, enquanto as maiores dosagens de vidro contribuíram para uma alta retração das argamassas, decorrente da baixa porosidade do vidro, que absorve pouca água livre na mistura, havendo maior perda desta por evaporação na hidratação do cimento. A pequena adição dos resíduos como material cimentício suplementar pode ocasionar o surgimento de maior quantidade de poros devido a sua morfologia, induzindo para a uma menor pressão capilar e, conseqüentemente, mitigação do encolhimento autógeno. Salim e Mosaberpanah (2021) complementam que os resíduos de vidro, quando adicionados às argamassas em substituição ao cimento, reduzem a quantidade de CaO, essencial para a rápida taxa de hidratação, o que diminui a retração das amostras.

No estudo de Fusade, et al. (2019), foram utilizadas cinzas de madeira provenientes de caldeiras da biomassa para produzir amostras de argamassas com cal hidráulica natural e cal aérea, sendo realizada a substituição ao agregado, em concentrações de 10%, 20%, 30%, 40%, 70% e 100%. Os autores perceberam que com a adição de maiores quantidades de cinzas de madeira houve maior exigência de água na mistura, para uma consistência semelhante à amostra de referência, principalmente pelo fato de serem consideradas higroscópicas. Como a retração é uma propriedade que depende diretamente da quantidade de água presente na mistura e do índice de finura do agregado, o uso das cinzas de madeira resultou no aumento da retração por conta de suas partículas finas proporcionarem instabilidade volumétrica, juntamente com a alta relação água/cimento utilizada para essas amostras.

No estudo de Cheah e Ramli (2012) foram avaliadas as retrações sofridas por argamassas com substituição parcial ao cimento, em frações de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, por cinzas de madeira com alto teor de cálcio. Assim, após a realização do ensaio para todas as amostras e avaliação dos valores de encolhimento, os autores perceberam que as amostras que continham 5% e 10% de substituição apresentaram retração inferior à amostra de referência, ocasionados pela melhor interação do cimento na matriz, com diminuição percentual de 20,34% da que continha 5% de cinzas. Entretanto, as demais amostras apresentaram maior encolhimento, resultantes da maior quantidade de sílica amorfa, que desencadeou uma elevada reação pozolânica e uma autodessecação das misturas, proporcionando maiores retrações para essas misturas.

2.4.1.4 Absorção de água por capilaridade

Pinto (1999) define a capilaridade como a capacidade de o material absorver água por sucção, a partir do momento em que entra em contato com ela, por meio da estrutura dos poros presentes nele. Marciel, et al. (1998) adverte que apesar da necessidade de a argamassa apresentar estanqueidade, é recomendável que ela seja ou apresente permeabilidade para que haja infiltração da umidade e que a percolação de água seja facilitada, a depender do local e finalidade de aplicação, a fim de favorecer na secagem do material.

Os valores de absorção de água por capilaridade presentes na literatura estão expressos na Tabela 8, quando realizada a substituição do cimento ou agregado por resíduos de vidro e cinzas de madeira, bem como o acréscimo/decréscimo percentual máximos das amostras com desempenho superior em relação às amostras de referência.

Tabela 8 – Resultados de absorção de água por capilaridade presentes na literatura de argamassas resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira

Autor	Resíduo utilizado / Material substituído	Substituição (%)	Absorção de água (*g/cm ²) ou (**%)	Acréscimo/ Decréscimo
				Máximo (%) (% de resíduos)
Khan, Kuri e Sarker (2021)	V + CV / C	0% / 10% / 20% / 30% / 40%	4,66 / 5,44 / 5,81 / 5,97 / 6,20*	↑16,74 (10%)
Matos e Sousa-Coutinho (2012)	V / C	0% / 10% / 20%	0,087 / 0,085 / 0,091*	↓2,30 (10%)
Oliveira, Brito e Veiga (2013)	V / A	0% / 10% / 15% / 20%	0,157 / 0,097 / 0,091 / 0,076*	↓51,59 (20%)
Ince, Tayançlı e Derogar (2021)	CM / C	0% / 1% / 2% / 3% / 4% / 5%	0,15 / 0,17 / 0,175 / 0,19 / 0,20 / 0,22*	↑13,33 (1%)
Cheah e Ramli (2012)	CM / C	0% / 5% / 10% / 15% / 20% / 25%	2,6 / 3,3 / 3,4 / 2,8 / 2,8 / 3,0**	↑7,69 (15% / 20%)

↓ decréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento/agregado).

↑ acréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento/agregado).

CM: Cinza de madeira; V: Vidro; C: Cimento; A: Agregado; CV: Cinzas volantes.

Fonte: O Autor (2023).

A absorção de água por capilaridade das argamassas que contém resíduos de vidro incorporado é reduzida, principalmente em amostras com níveis de substituição de até 20%, conforme os valores presentes na Tabela 8. Ainda pode ser verificado que a adição de cinzas de madeira proporciona às argamassas um aumento na absorção, independente do nível de

substituição. A granulometria das partículas é determinante para que a argamassa apresente absorção de água, por influenciar diretamente na porosidade desta e, por consequência, na capilaridade (PARGHI; ALAM, 2016; CHEAH; RAMLI, 2012).

Parghi e Alam (2016) realizaram o teste de absorção de água por capilaridade em argamassas com substituição ao cimento por pó de vidro reciclado, com tamanho de partículas inferiores a 75 μm , em frações de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, e perceberam que a absorção de água das amostras sofreu uma redução com o aumento da porcentagem de vidro incorporado. Os autores afirmam que este fato está atrelado à maior atividade pozolânica do vidro com a matriz cimentícia. Além disso, a utilização de partículas muito finas de vidro contribuiu para o preenchimento dos poros, sendo diminuída a percolação da água e, consequentemente, redução na capacidade de absorção das amostras com o aumento do teor incorporado.

Cheah e Ramli (2012) substituíram o cimento por cinzas de madeira com alto teor de cálcio, com tamanho de partículas inferior a 150 μm em percentuais de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Os resultados obtidos mostraram que as amostras de 5%, 10% e 25% apresentaram ligeiro aumento na absorção de água das argamassas, enquanto as restantes foram equivalentes à amostra de referência. Todas as amostras demonstraram valores de absorção próximos, apesar das distinções, o que se deve ao fato da porosidade ser praticamente mantida quando adicionada a cinza de madeira, já que o material também apresenta uma capacidade de absorver água, assim como o cimento.

2.4.1.5 Resistência potencial de aderência à tração

Segundo a ABNT NBR 13528-1:2019 aderência é a propriedade a qual o revestimento tem de resistir às tensões atuantes sobre a superfície ou na sua interface com o substrato. Recena (2015) define a propriedade como a capacidade da argamassa manter-se aderida ao substrato, com finalidade de unir os elementos. O autor ainda afirma que a propriedade é o resultado comportamental de um sistema como um todo, ou seja, depende das características tanto da argamassa, quanto do substrato a que foi realizada a aplicação.

Na Tabela 9 constam os valores do ensaio de resistência de aderência à tração presentes na literatura atrelados ao uso de resíduos de vidro e cinzas de madeira em diferentes níveis de substituição ao cimento e agregado, bem como o aumento/decréscimo percentual das amostras com melhor desempenho em relação às de referência.

Tabela 9 – Resultados de resistência de aderência à tração presentes na literatura de argamassas produzidas por resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira

Autor	Resíduo utilizado / Material substituído	Substituição (%)	Resistência de aderência à tração (MPa)	Acréscimo/ Decréscimo
				Máximo (%) (% de resíduos)
Sauer (2013)	V / C	0% / 13% / 26%	0,246 / 0,936 / 0,419	↑280,49 (13%)
Ticianelli (2018)	V / A	0% / 25% / 50% / 75%	0,29 / 0,34 / 0,37 / 0,39	↑34,48 (75%)
Giordani, et al. (2021)	CM / C	0% / 5% / 10%	0,125 / 0,095 / 0,077	↓24 (5%)
Akinyemi e Dai (2020)	CM / C	0% / 10% / 15% / 20% / 25%	0,75 / 2,70 / 1,90 / 1,25 / 0,95	↑260 (10%)
Melo (2012)	CM / C	0% / 10% / 20% / 30% / 40%	0,17 / 0,145 / 0,13 / 0,15 / 0,175	↑2,94 (40%)

↓ decréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento/agregado).

↑ acréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento/agregado).

CM: Cinza de madeira; V: Vidro; C: Cimento; A: Agregado.

Fonte: O Autor (2023).

De acordo com os resultados das pesquisas contempladas na Tabela 9, os valores de resistência de aderência apresentados são considerados equivalentes às amostras de referência, possuindo valores superiores em algumas delas, principalmente na faixa de 20% de substituição em alguns estudos. A resistência de aderência à tração depende do módulo de elasticidade da argamassa, e a ligação entre ela e o substrato, fator principal para o desenvolvimento da resistência (PENACHO, 2012; MELO, 2012).

Penacho (2012) preparou amostras com resíduos finos de vidro ao substituir a areia em frações de 20%, 50% e 100%, a fim de avaliar a resistência potencial de aderência à tração de argamassas. Com a incorporação do vidro, as amostras apresentaram valores de resistência inferiores à amostra de referência, sendo a de 20% de substituição a melhor entre elas, com decréscimo percentual de 9,72% em relação à referência, entretanto, todas com valores superiores ao limite inferior de 0,3 MPa imposto pela ABNT NBR 13749:2013, norma que especifica as condições para o recebimento de argamassas ao substrato. Segundo o autor, a queda nos valores das resistências se dá pelo módulo de elasticidade aumentar gradativamente à medida que também cresce o percentual de substituição e, por ser inversamente proporcional à resistência à tração, reduz os valores. Hisseine e Tagnit-Hamou (2020) complementam que a adição de vidro aumenta a compacidade da matriz cimentícia, levando a

uma maior ligação entre as partículas, devido à fricção entre elas, resultando numa maior resistência de aderência ao substrato.

Para realizar o ensaio de resistência de aderência à tração, Sauer (2013) preparou argamassas com adição de resíduos de vidro laminado em frações de 13% e 26% em substituição parcial ao cimento. Os resultados mostraram certa variação nos valores de resistência de acordo com a forma de ruptura dos corpos de prova, principalmente pelas diferentes formas de absorção do substrato e espessura da cola, e, ao calcular a média dos valores, percebeu que a adição de vidro resultou em valores superiores à amostra de referência, além de ultrapassarem o limite mínimo de 0,3 MPa estabelecido pela ABNT NBR 13749:2013. O desenvolvimento de uma resistência superior se dá pela etringita formada como produto na hidratação, sendo esta a principal responsável pela maior aderência da argamassa endurecida ao substrato (CARASEK, 2007).

Ao aplicar argamassa com cinzas de madeira de biomassa em teores de 10%, 20%, 30% e 40% em substituição ao cimento, Melo (2012) obteve como resultado no ensaio de resistência de aderência à tração valores próximo à amostra de referência, mostrando uma tendência ao aumento de resistência à medida que a incorporação de cinzas aumentava. Com relação ao rompimento das amostras, todas ocorreram na argamassa, o que confere que houve aderência dela com o substrato.

2.4.1.6 Durabilidade

A durabilidade é a capacidade de a argamassa manter estabilidade física e química ao ser exposta à agressividade do ambiente a que está submetida, levando em consideração os esforços de projeto e sem que deixem de cumprir suas funções nele presentes (RECENA, 2015). Segundo Bauer (2019), é um conceito considerado relativo, já que para a avaliação da deterioração do material irá depender do comportamento do mesmo em relação ao grau de exposição em cada situação.

Os valores referentes à durabilidade das argamassas então presentes na Tabela 10, bem como a influência dos resíduos de vidro e das cinzas de madeira ao serem incorporadas. Verifica-se que as amostras com os maiores níveis de substituição apresentaram o melhor desempenho para a maioria dos ensaios de durabilidade avaliados, e no ensaio de carbonatação com cinzas de madeira a faixa de 5% a 10% foi a que apresentou os melhores valores. A composição química é o fator determinante para que as amostras que contém ambos os resíduos

apresentem maior resistência a ataques de agentes agressivos, por proporcionar reação que desestabiliza menos a matriz cimentícia (SIAD, et al., 2016; CHEAH; RAMLI, 2012; ACORDI, et al., 2020).

Tabela 10 – Resultados de durabilidade presentes na literatura de argamassas produzidas com resíduos de vidro e/ou cinzas de madeira

Autor	Resíduo utilizado / Material substituído	Substituição (%)	Valores máximos (% de resíduo)	Parâmetros
Siad, et al. (2016)	V / C	0% / 15% / 30% / 45%	↑24,1% (45%)	Resistência ao ácido sulfúrico (perda de massa)
Matos e Sousa-Coutinho (2012)	V / C	0% / 10% / 20%	↑7,8.10 ⁻¹² m ² /s (20%)	Resistência aos íons de cloreto (difusão)
Acordi, et al. (2020)	CM / C	0% / 17% / 33% / 50%	↑0,006% (-)	Ataque por sulfato de sódio (expansão)
Ramos, Matos e Sousa-Coutinho (2013)	CM / C	0% / 10% / 20%	↓3,33 mm (10%)	Carbonatação
Cheah e Ramli (2012)	CM / C	0% / 5% / 10% / 15% / 20% / 25%	↑1,01mm (5%)	Carbonatação

↓ decréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento/agregado).

↑ acréscimo dos valores em relação às amostras de referência (% de resíduo em substituição ao cimento/agregado).

CM: Cinza de madeira; V: Vidro; C: Cimento; A: Agregado.

Fonte: O Autor (2023).

De modo a investigar a durabilidade de argamassas com exposição a ambientes ácidos, Siad, et al. (2016) incorporou pó de vidro reciclado de garrafas em substituição ao cimento em frações de 15%, 30% e 45% em relação à massa. O ataque aos corpos de prova foi realizado com ácido sulfúrico (H₂SO₄), através da imersão na solução em 12 semanas, o que proporcionou perda de massa de todas as amostras avaliadas. No entanto, à medida que o percentual de vidro presente nas misturas aumentou, houve diminuição na perda de massa das amostras, sendo apresentada maior resistência à amostra com 45% de substituição, com aumento percentual de 24,1%, quando comparada com a amostra de referência. De acordo com os autores, a maior interação dos álcalis presentes na composição química do vidro no processo de hidratação do cimento foi determinante para a melhora na resistência ao ataque de H₂SO₄.

Cheah e Ramli (2012) realizaram testes de carbonatação em argamassas com cinzas de madeira com alto teor de cálcio em substituição parcial ao cimento em frações de 5%, 10%,

15%, 20% e 25%, em 90 dias. De acordo com os resultados obtidos pelos autores, apenas a amostra com percentual de substituição de 5% apresentou redução na profundidade de carbonatação em relação à amostra de referência, enquanto as demais aumentaram as profundidades proporcionalmente ao nível de substituição. Essa redução da profundidade é decorrente da baixa atividade pozolânica da mistura, que disponibilizaram maior quantidade de sílica natural amorfa para reagir com a pouca quantidade de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na hidratação do cimento, o que contribuiu para a produção de carbonato de cálcio (CaCO_3) e, consequentemente, redução da alcalinidade das argamassas.

Matos e Sousa-Coutinho (2012) avaliaram a durabilidade de argamassas através da permeabilidade de íons de cloreto e ataque externo a sulfato de sódio (Na_2SO_4). Para isso, foram produzidos corpos de prova com teores de 10% e 20% de resíduos finos de vidro em substituição parcial ao cimento, além da amostra de controle. Após a realização dos testes, as autoras perceberam que a adição do vidro proporciona uma melhoria quanto à durabilidade das argamassas, quando realizada a comparação com as amostras de referência, havendo um aumento na resistência aos ataques químicos externos, o que se deve à melhoria na interface proporcionada pelos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) produzidos na reação pozolânica do vidro, que diminuíram a porosidade capilar das argamassas.

Acordi, et al. (2020) realizaram testes de ataques com Na_2SO_4 em argamassas contendo cinzas de madeira em frações de 17%, 33% e 50% em substituição parcial ao cimento nas produções das amostras. Ao avaliarem a durabilidade após 28 dias, observaram que as argamassas que continham as cinzas de madeira apresentaram maior resistência ao sulfato em relação às que não continham adições, o que é proveniente da redução na quantidade de portlandita (Ca(OH)_2), responsável pela expansão e desintegração da argamassa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados serão descritos a seguir, bem como os métodos empregados para determinar a influência do uso de resíduos de lapidação de vidro, cinza de madeira e suas misturas híbridas nas propriedades da argamassa, ao substituir parcialmente o cimento Portland.

A Figura 2 representa o programa experimental seguido. Todos os ensaios de caracterização de materiais e de determinação das propriedades das argamassas foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe (IFS) - Campus Estância. Por se tratar da continuação ao estudo de Araujo (2021), as propriedades de índice de consistência, massa específica aparente e massa específica real não foram avaliadas neste presente trabalho. No entanto, por a autora avaliar a resistência à compressão apenas aos 28 dias, este estudo complementa a análise de resistência nas idades de 7 e 14 dias.



Figura 2 – Fluxograma da programação experimental (O Autor, 2023).

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção das argamassas estão representados a seguir, bem como suas respectivas normas de caracterização.

3.1.1 Cimento Portland

O tipo de cimento utilizado para determinar a influência dos resíduos de vidro, cinzas de madeira e suas misturas híbridas foi o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), já que, segundo a NBR 16697:2018, esse aglomerante possui nível baixo de adições, sendo ideal para avaliar os efeitos de cada resíduo ao realizar a substituição do cimento. As propriedades físicas e mecânicas do cimento seguiram as normas presentes no Quadro 1.

Caracterização	Norma
Consistência normal	ABNT NBR 16606:2018
Expansibilidade <i>Le Chatelier</i>	ABNT NBR 11582:2016
Índice de finura	ABNT NBR 11579:2013
Massa específica	ABNT NBR 16605:2017
Resistência à compressão	ABNT NBR 7215:2019
Tempo de pega	ABNT NBR 16607:2018

Quadro 1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland (O Autor, 2023).

3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia normal com quatro diferentes tipos de frações (grossa, média grossa, média fina e fina), por ser um material padronizado, de acordo com a ABNT NBR 7215:2019, e com quantidade quase que nula de contaminantes que pudessem interferir diretamente nos resultados obtidos na pesquisa. A areia normal foi adquirida no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Os ensaios de caracterização da areia estão definidos no Quadro 2 de acordo com as suas normas específicas.

Caracterização	Norma
Composição granulométrica	ABNT NBR 17054:2022
Absorção de água e massa específica	ABNT NBR 16916:2021
Massa unitária e índice de vazios	ABNT NBR 16972:2021

Quadro 2 – Propriedades físicas do agregado (O Autor, 2023).

3.1.3 Água

A água utilizada foi fornecida pelo abastecimento público do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), localizado no município de Estância-SE. Esta seguiu todos os requisitos impostos pela ABNT NBR 15900-1:2009, para ser utilizada no preparo de materiais cimentícios.

3.1.4 Resíduos de Lapidação de Vidro

O fornecimento dos resíduos de lapidação de vidro foi realizado pela Sergipe Vidro LTDA, localizada no município de Lagarto-SE, empresa especializada em fabricar e distribuir vidros laminados e temperados. Segundo a empresa, é gerada, em média, seis toneladas do resíduo por ano.

Logo após a coleta, os resíduos passaram por secagem em estufa (Figura 3) à temperatura de 105 ± 5 °C, foram armazenados em sacos plásticos e vedados para proteção contra intempéries. Além disso, foi feita a passagem dos resíduos na peneira 75 μ m (Figura 4), a fim de garantir que o resíduo atendesse ao mesmo limite estabelecido na ABNT NBR 16697:2018, para o índice de finura do CP V-ARI, que deve ser $\leq 6\%$.



Figura 3 – RLV seco em estufa
(O Autor, 2023).



Figura 4 – RLV passante na
peneira 75 μ m (O Autor, 2023).

Para caracterização dos resíduos, foram realizados os ensaios de índice de finura e massa específica, seguindo a ABNT NBR 11579:2013 e ABNT NBR 16605:2017, respectivamente, além da análise química através da técnica de fluorescência de raios X (FRX), no laboratório da empresa Mizu Cimentos Especiais. Foi feito um isolamento a vácuo por meio do equipamento no EZ Scan, no Primini Rigaku, a fim de avaliar a composição química do

material, sendo utilizada amostra com massa aproximada de 12 g, com prensagem para obtenção de corpos cilíndricos com dimensões de 60 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. De modo a avaliar os componentes químicos e a presença de compostos que pudessem interferir na hidratação do cimento, a fim de verificar se estes comprometem as propriedades das amostras produzidas (CARASEK, 2007).

3.1.5 Cinzas de Madeira

A cinza de madeira proveniente da queima de eucalipto foi fornecida pela Atual Têxtil LTDA, localizada no município de Estância-SE, empresa especializada na produção de malhas e no comércio de tecidos em geral. Segundo dados da empresa, são gerados, aproximadamente, 30 kg de cinzas de madeira por dia.

Após a coleta, foi realizado o mesmo procedimento utilizado para os RLVs, com secagem em estufa (Figura 5), a uma temperatura de 105 ± 5 °C, armazenamento e vedação, além da passagem na peneira 75 μm , como ilustrado na Figura 6.



Figura 5 – CM seca em estufa
(O Autor, 2023).



Figura 6 – CM passante na
peneira 75 μm (O Autor, 2023).

Os ensaios realizados para caracterização das cinzas foram o índice de finura e a massa específica, de acordo com a ABNT NBR 11579:2013 e ABNT NBR 16605:2017, respectivamente, além da análise química por fluorescência de raios X.

3.2 MÉTODOS

De acordo com os dados experimentais presentes na literatura, este tópico estabelece as dosagens utilizadas de resíduos de lapidação de vidro, cinzas de madeira e suas misturas

híbridas, bem como os métodos utilizados para determinar as propriedades das argamassas, tanto no estado fresco, quanto no endurecido.

3.2.1 Dosagem e preparo dos corpos de prova das argamassas

Para moldagem dos corpos de prova foi utilizado o traço de 1:3 (cimento:areia) e relação água/cimento de 0,48, por ser bastante recorrente na literatura, além de ser o recomendado pela ABNT NBR 7215:2019, que determina parâmetros a serem seguidos para avaliar a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, sendo seguido todos os procedimentos de adição e misturas de materiais presentes na norma para moldagem das amostras, com o auxílio de um misturador mecânico de eixo vertical (argamassadeira) com capacidade de 5 litros, da marca Edutec.

A fim de avaliar as propriedades das argamassas ao substituir parcialmente o cimento, foram produzidas oito formulações, sendo elas: uma de referência (apenas cimento), três com apenas resíduos de lapidação de vidro, em teores de 10%, 20% e 30%, uma com apenas 10% de cinzas de madeira, e três amostras de misturas híbridas dos resíduos, com vidro (10%, 20% e 30%) e cinzas de madeira (10%). As formulações a serem utilizadas estão expressas na Tabela 11. Assim, foi possível produzir 36 (trinta e seis) amostras de cada formulação, totalizando 288 (duzentos e oitenta e oito) amostras.

Tabela 11 – Formulações dos corpos de prova

Nomenclatura	Teor de cimento (%)	Teores de resíduos	
		Vidro (%)	Cinza de madeira (%)
REF	100	-	-
V ₁₀ ¹	90	10	-
V ₂₀	80	20	-
V ₃₀	70	30	-
CM ₁₀ ²	90	-	10
V ₁₀ CM ₁₀ ³	80	10	10
V ₂₀ CM ₁₀	70	20	10
V ₃₀ CM ₁₀	60	30	10

Fonte: O Autor (2023).

Legenda:

V₁₀¹: Amostra contendo 10% de resíduos de lapidação de vidro em substituição ao cimento.

CM₁₀²: Amostra contendo 10% de cinzas de madeira em substituição ao cimento.

V₁₀CM₁₀³: Amostra contendo 10% de resíduos de lapidação de vidro e 10% de cinzas de madeira em substituição ao cimento.

A escolha dos percentuais adotados para RLV foram baseados nos resultados presentes na literatura (Tabela 6), os quais mostram que teores próximos de até 30% as argamassas apresentaram valores semelhantes à referência. Com relação à CM, Souza, et al. (2022) verificaram que o percentual de 10% do material em substituição ao cimento resultou em uma melhora na resistência à compressão, além de uma menor perda de massa e absorção de água.

3.2.2 Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco

No tópico a seguir será apresentado o ensaio para avaliação da argamassa em seu estado fresco, conforme suas prescrições normativas.

3.2.2.1 Teor de ar

Para determinar o teor de ar presente nas amostras de argamassas produzidas, foi feita uma adaptação da ABNT NBR 9833:2009, que impõe os procedimentos necessários para determinar o teor de ar do concreto no estado fresco. O ensaio consiste no preenchimento do molde cilíndrico com três camadas de argamassa, aplicação de 40 golpes a cada camada e pesagem do recipiente após o nivelamento na borda superior, para realização dos devidos cálculos necessários.

A Equação 1 foi adotada para avaliação do teor de ar:

$$A = \left(1 - \frac{1}{I_a}\right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

A: é o teor de ar da argamassa, expresso em porcentagem (%);

I_a : é o índice de ar presente na mistura, conforme o item 8.5 da ABNT NBR 9833:2009.

3.2.3 Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido

Neste tópico serão descritas as propriedades da argamassa para o seu estado endurecido, seguindo todos os critérios descritos em suas correspondentes normas técnicas.

3.2.3.1 Resistência à compressão

Para avaliação da resistência à compressão das argamassas, foi realizada a moldagem de seis corpos de prova cilíndricos, para cada formulação e idades, com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, preenchendo os moldes através do adensamento de quatro

camadas e aplicação de 30 golpes uniformes em cada uma delas com o auxílio de um soquete metálico, baseando-se nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7215:2019. Após produzir as amostras, estas foram desmoldadas e rotuladas com 24 horas. A cura úmida foi efetuada por imersão em água com adição de cal, até atingirem idades de 7, 14 e 28 dias, conforme mostras a, para que fosse realizado o rompimento de todas as amostras com o auxílio da prensa hidráulica Pavitest HD-200T, da marca Contenco.

3.2.3.2 Retração

A retração das argamassas foi determinada de acordo com a ABNT NBR 15261:2005. Os três corpos de prova moldados são de formato prismático de 25 mm x 25 mm x 285 mm, sendo posicionados os pinos de medida e adensadas duas camadas das misturas nos moldes, aplicando-se 25 golpes em cada uma delas com o auxílio de um soquete metálico, retirando-se o excesso de material após a compactação da segunda camada, e por fim o alisamento por meio de uma régua, para que fosse realizada a cura seca das amostras, a fim de avaliar a variação dimensional média por meio de um extensômetro em 1, 7 e 28 dias, como ilustrado na Figura 7.

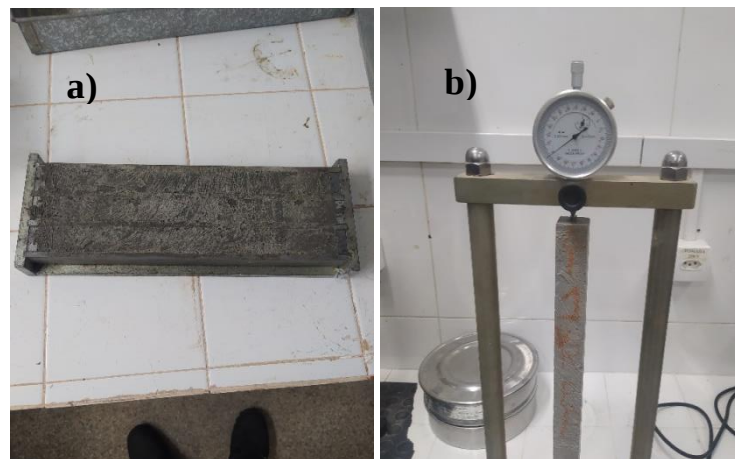


Figura 7 – Etapas do ensaio de retração. a) Corpos de prova; b) Leitura da argamassa com extensômetro (O Autor, 2023).

A Equação 2 foi utilizada para determinação da variação dimensional:

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

ε_i : é a medida da variação dimensional na idade i de leitura, em milímetro por metro (mm/m);

L_i : é a leitura efetuada na idade final, em milímetro (mm);

L_0 : é a leitura efetuada após a desforma, em milímetro (mm).

3.2.3.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio da absorção de água por capilaridade seguiu as recomendações da ABNT NBR 9779:2012. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a ABNT NBR 7215:2019, com a produção de seis amostras para cada formulação. Após a identificação e cura úmida em solução de água com cal até os 28 dias, os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C para eliminação da água até atingir massa constante.

Inicialmente foi medida a área da seção transversal da face que ficou submersa em água e posicionado os corpos de prova sobre o suporte, a fim de evitar o contato com o fundo. Após o posicionamento sobre os fios, foi feita a adição de água até que ultrapassasse a altura de 5 ± 1 mm acima da face inferior dos corpos de prova, e medindo-se a massa destes em 3, 6, 24, 48 e 72 horas, para que ao final fosse realizado o rompimento diametral das amostras com o auxílio da prensa hidráulica Pavitest HD-200T, como mostrado na Figura 8, a fim de avaliar a altura de ascensão máxima interna atingida pela água.

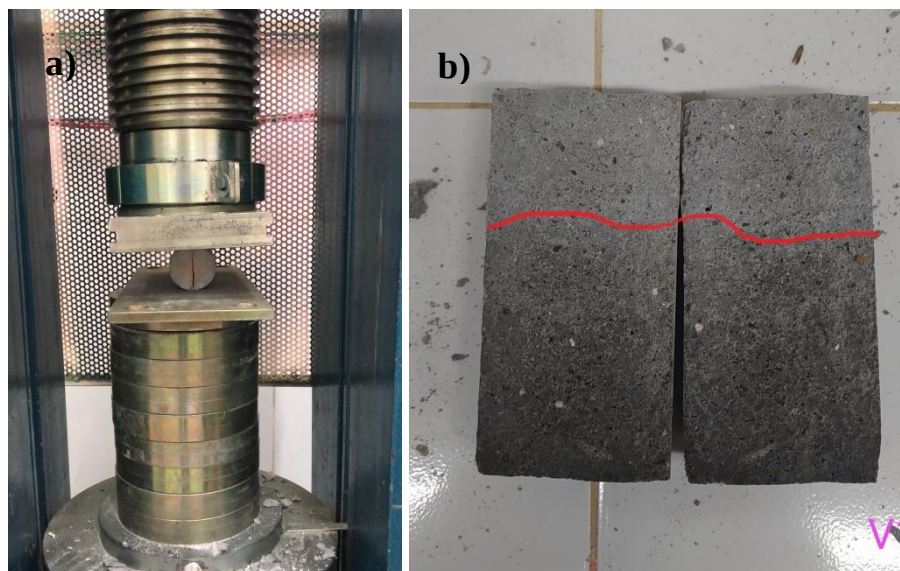


Figura 8 – Etapas do ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Corpo de prova após rompimento diametral; b) Altura de ascensão capilar máxima da água no interior da argamassa. (O Autor, 2023).

Para avaliar a absorção das amostras, foi utilizada a Equação 3:

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

C: é a absorção de água por capilaridade, em gramas por centímetro quadrado (g/cm²);

m_{sat}: é a massa saturada dos corpos de prova, com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em gramas (g);

m_s: é a massa do corpo de prova seco, em gramas (g);

S: é a área da seção transversal, em centímetros quadrados (cm²).

3.2.3.4 Resistência potencial de aderência à tração

O ensaio de resistência potencial de aderência à tração seguiu os requisitos da ABNT NBR 13528-2:2019, destinada a determinar a aderência ao substrato de argamassas de revestimento. As amostras foram produzidas de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 7215:2019, com adição de 0,5% de aditivo incorporador de ar, a fim de alterar a trabalhabilidade e possibilitar a aplicação sobre o substrato como argamassa de revestimento. Assim, foi realizada a aplicação das argamassas e, após 28 dias, efetuaram-se os cortes das amostras com mesmo diâmetro da pastilha, utilizando furadeira serra copo, atingindo o substrato até a profundidade de 1 a 5 mm. Depois disso, aplicou-se uma camada de cola epóxi na base das pastilhas, e feito o posicionamento delas sobre a seção transversal cortada na argamassa, de modo que ficasse o mais centralizado possível, utilizando-se apoios para isto. Após 28 dias de cura, foi realizado o rompimento por meio do arrancamento com aderímetro, conforme ilustra a Figura 9.

Com os valores obtidos ao realizar o ensaio, foram calculadas as resistências de aderência à tração das argamassas utilizando a Equação 4, e avaliada forma de rompimento baseada na Figura 10:

$$Ra = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

Ra: é a resistência de aderência à tração a substrato (MPa);

F: é a força de ruptura (N);

A: é a área do corpo de prova (mm²).

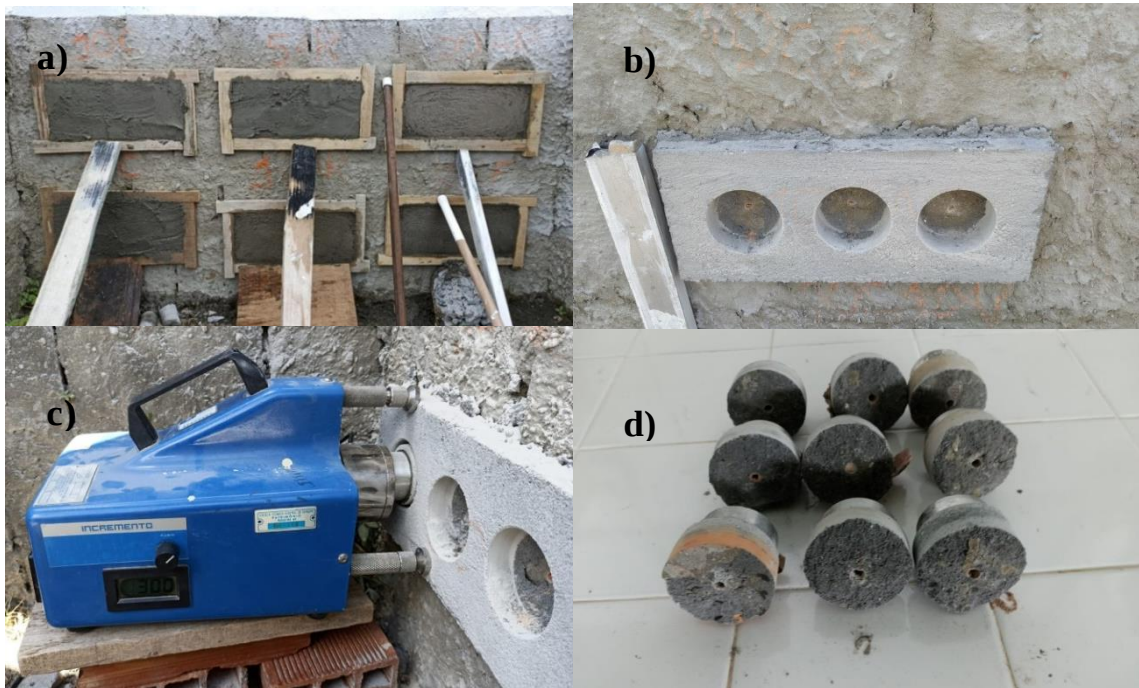


Figura 9 – Etapas do ensaio de resistência potencial de aderência à tração. a) Argamassas aplicadas ao substrato; b) Argamassa após o rompimento; c) Posicionamento do aderímetro; d) Corpos de prova após rompimento. (O Autor, 2023).

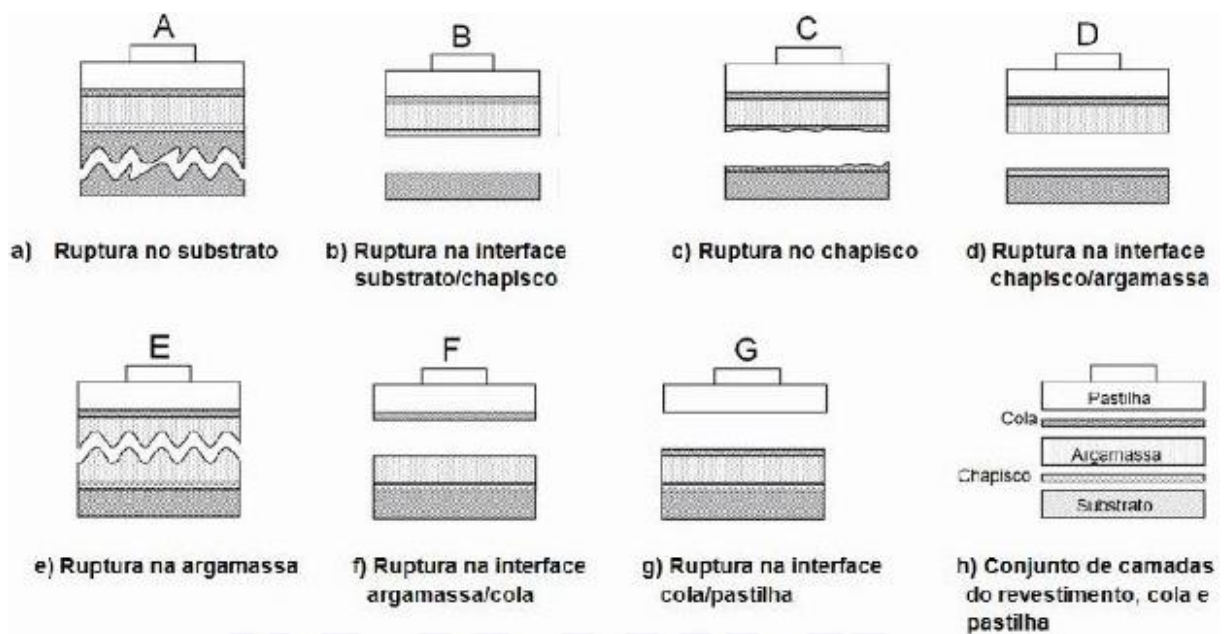


Figura 10 – Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento com chapisco e esquema do conjunto de camadas (revestimento, cola e pastilha) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019)

3.2.3.5 Durabilidade

A durabilidade das argamassas foi medida através do ataque a sulfato de sódio (Na_2SO_4), segundo as diretrizes presentes na ABNT NBR 13583:2014, sendo avaliado como parâmetro a perda de massa de seis barras de argamassa prismáticas com seção quadrada de 25 mm de lado e 285 mm de comprimento, para cada amostra avaliada.

O processo de moldagem seguiu o mesmo procedimento utilizado para avaliar a retração, com o posicionamento dos pinos de medição, colocação de duas camadas de argamassa e aplicação de 25 golpes para compactá-las, além da retirada do excesso de material e nivelamento, para que fosse realizada a cura ao ar em dois dias. Após esse processo, foi realizada a desmoldagem e cura em um tanque com água saturada com cal por 12 dias e, em seguida, 14 dias consecutivos, para que por fim, passassem para a cura final, sendo três amostras mantidas no mesmo tanque e as três restantes para a solução de Na_2SO_4 , até completar os 42 dias após a moldagem.

A perda de massa das argamassas foi avaliada após 14, 42 dias nas diferentes curas realizadas com o auxílio de um extensômetro, sendo feito o cálculo de acordo com a Equação 5:

$$\Delta m_e = \Delta m_s - \Delta m_a \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

Δm_s : é a perda de massa média das barras curadas em solução agressiva de sulfato de sódio, em porcentagem (%);

Δm_a : é a perda de massa média das barras curadas em água saturada com cal, em porcentagem (%);

Δm_e : é a perda de massa resultante, em porcentagem (%).

3.2.4 Tratamento e análise de dados

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas serão apresentados por meio da média aritmética para cada uma das formulações, seguindo o desvio padrão. A fim de analisar os resultados dos ensaios, foi realizada a verificação da normalidade dos valores e, dessa maneira, a análise estatística por meio da metodologia de análise de variância (ANOVA), adotando-se uma probabilidade de significância (valor-p) menor ou igual a 0,05 ($p \leq 0,05$), seguida do Teste de Tukey.

3.2.5 Metodologia de análise comparativa

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas, nos estados fresco e endurecido, foram analisados de modo a verificar:

- a) A influência da incorporação e acréscimo do resíduo de lapidação de vidro (V_{10} , V_{20} e V_{30}) em relação à amostra de referência (REF);
- b) A influência de incorporação da cinza de madeira (CM_{10}) em relação à amostra de referência (REF);
- c) A influência de incorporação da mistura híbrida ($V_{10}CM_{10}$, $V_{20}CM_{10}$ e $V_{30}CM_{10}$) em relação à amostra de referência (REF);
- d) A influência do acréscimo de incorporação da mistura híbrida ($V_{10}CM_{10}$, $V_{20}CM_{10}$ e $V_{30}CM_{10}$) em relação às amostras contendo RLV (V_{10} , V_{20} e V_{30});
- e) A influência do acréscimo de incorporação da mistura híbrida ($V_{10}CM_{10}$, $V_{20}CM_{10}$ e $V_{30}CM_{10}$) em relação à amostra contendo cinza de madeira (CM_{10}).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão avaliados, neste capítulo, os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais empregados na pesquisa, bem como para as argamassas produzidas a partir destes.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios realizados para caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas.

4.1.1 Cimento Portland

Os valores apresentados na Tabela 12 representam os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do cimento Portland CP V-ARI, seguindo os requisitos mínimos estabelecidos na ABNT NBR 16697:2018. Tanto os dados obtidos em laboratório, quanto os fornecidos pelo fabricante atenderam os critérios da norma, sendo válido o uso de ambos os lotes.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de caracterização do cimento

Características	Unidade	Resultados Lote 1 – Lote 2	Requisitos normativos
Índice de finura	%	1,9 - 1,3	$\leq 6,0$
Início de pega	min	170 – 165*	≥ 60
Massa específica	g/cm ³	3,15 - 3,13*	-
Expansibilidade <i>Le Chatelier</i> (a quente)	mm	4 – 1*	≤ 5
Resistência à compressão	-----	-----	
1 dia	MPa	20,7 - 17,1*	$\geq 14,0$
3 dias	MPa	35,5 - 29,7*	$\geq 24,0$
7 dias	MPa	35,7 – 35,0	$\geq 34,0$

* Dados fornecidos pelo fabricante.

Fonte: O Autor (2023).

4.1.2 Agregado miúdo

A Tabela 13 apresenta os valores dos ensaios de caracterização do agregado miúdo utilizado nesta pesquisa.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo

Ensaio	Unidade	Resultados
Composição granulométrica	Figura 11	
Absorção de água	%	0,2
Módulo de finura	-	2,36
Massa específica	g/cm ³	2,60
Diâmetro máximo	mm	2,36
Massa unitária	-----	-----
Solta	kg/m ³	1511
Compactada	kg/m ³	1638
Índice de vazios	%	37

Fonte: O Autor (2023).

O gráfico apresentado na Figura 11 representa a curva granulométrica da areia normal utilizada. De acordo com o traçado da curva, percebe-se que o agregado é considerado como bem graduado, com coeficiente de curvatura (C_c) igual a 1,5 e coeficiente de uniformidade (C_u) igual a 7,0. Segundo a ABNT NBR 7211:2022, de acordo com o seu módulo de finura, a areia encontra-se na zona considerada ótima (2,20-2,90).

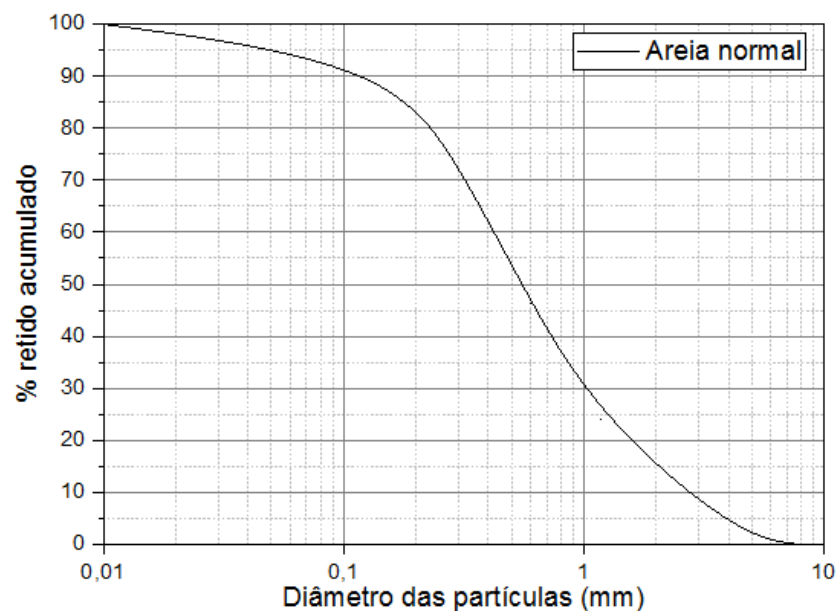


Figura 11 – Curva granulométrica do agregado miúdo (O Autor, 2023).

4.1.3 Resíduo de lapidação de vidro

Na Tabela 14 estão representados os valores obtidos na avaliação da composição química, e os resultados mostram que o material é classificado como vidro soda-cal, por conter elevado teor de sódio e cálcio (ABIVIDRO, 2009). Além disso, por apresentar grande quantidade de sílica (76,31%), o resíduo apresenta potencial pozolânico.

Tabela 14 – Composição química do resíduo de lapidação de vidro

Compostos Químicos	Percentual (%)
Dióxido de silício - SiO_2	76,31
Óxido de sódio - Na_2O	13,06
Óxido de cálcio - CaO	7,21
Óxido de alumínio - Al_2O_3	1,02
Óxido de magnésio - MgO	0,60
Pentóxido de fósforo - P_2O_5	0,60
Óxido sulfúrico - SO_3	0,56
Óxido de potássio - K_2O	0,47
Óxido ferroso - Fe_2O_3	0,14
Cloro - Cl	0,03
Total	100%

Fonte: O Autor (2023).

De acordo com a ABNT NBR 12653:2015, as pozolanas são materiais de silicosos ou silicoaluminosos, podendo ser de origem natural ou artificial que, por natureza, possuem baixa ou nenhuma atividade ligante, mas que, quando finamente moído e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, e formam compostos com propriedades ligantes. A norma ainda determina os parâmetros para um material ser classificado como pozolânico, sendo um deles a soma dos compostos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que deve ser maior ou igual a 70%. De acordo com a análise química realizada para o RLV, o material apresentou teor de 77,47% e atingiu os requisitos impostos para classificação como pozolana, mostrando tendência semelhante aos dados presentes na Tabela 2 da fundamentação teórica.

Assim, o resíduo apresentou $2,65 \text{ g/cm}^3$, sendo este valor inferior ao do cimento Portland (15%), mostrando semelhança com outros autores (KIM; YI; ZI, 2015). Além disso, o RLV

apresentou índice de finura igual a 0%, por ser utilizado resíduo passante na peneira 75 μm , granulometria esta determinada pela ABNT NBR 16697:2018, a qual deve ser inferior a 6%.

4.1.4 Cinza de madeira

A composição química da cinza de madeira está presente na Tabela 15, sendo perceptível uma elevada quantidade (69,64%) de óxido de cálcio (CaO) entre os compostos, o que mostra concordância em relação aos valores presentes na literatura, contemplados na Tabela 4 da fundamentação teórica. Além disso, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 12653:2015, o material não é classificado como pozolana, por a soma de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 ser inferior a 70%. A mesma tendência foi verificada na literatura (Tabela 4), com predominância de CaO (61,0% - 42,0%)

Tabela 15 – Composição química da cinza de madeira

Compostos Químicos	Percentual (%)
Óxido de cálcio - CaO	69,64
Pentóxido de fósforo - P_2O_5	7,79
Óxido de potássio - K_2O	7,42
Óxido de magnésio - MgO	6,06
Dióxido de silício - SiO_2	5,30
Óxido sulfúrico - SO_3	1,44
Óxido de alumínio - Al_2O_3	1,39
Cloro - Cl	0,53
Óxido de estrôncio - SrO	0,42
Perda ao fogo - PF	0,01
Total	100%

Fonte: O Autor (2023).

A massa específica da cinza de madeira foi de 2,38 g/cm^3 , sendo este valor inferior ao do cimento Portland (24%), mostrando semelhança entre os valores presentes na literatura, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 – Valores de massa específica das cinzas de madeira presentes na literatura

Autores	Massa específica (g/cm³)
Abdulkareem, Ramli e Matthews (2019)	2,40
França, et al. (2016)	2,42
Resende (2013)	2,38

Fonte: O Autor (2023).

Assim como o RLV, a cinza de madeira foi passada pela peneira 75 µm para ser utilizada em substituição ao cimento na produção de argamassa e, dessa forma, apresentou índice de finura igual a 0%.

4.2 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DAS ARGAMASSAS

Serão apresentados, a seguir, os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido.

4.2.1 Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco

Neste tópico serão apresentados os resultados no ensaio de teor de ar das argamassas para o estado fresco.

4.2.1.1 Teor de ar

Os valores presentes na Figura 12 ilustram os resultados médios do teor de ar das argamassas com seu respectivo desvio padrão. Nela percebe-se que as argamassas apresentaram valores semelhantes para o ensaio de teor de ar. Por meio da análise de variância ($F=1,39$; $f_{\text{crítico}}=2,28$ e valor- $p=0,24$), seguido pelo teste de Tukey, foi verificado que as amostras não apresentaram variações significativas, o que leva a uma estabilidade dos valores de teor de ar das argamassas com a incorporação de RLV, CM e suas misturas híbridas. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura (Tabela 5), sendo verificados pequenos acréscimos nos teores de ar ao adicionar RLV e CM às argamassas, o que é decorrente da angulação das partículas dos resíduos, que reduzem o empacotamento da matriz cimentícia, proporcionando um aumento no índice de vazios (CHERENE; et al., 2019; FRANÇA, et al., 2016; SANTOS, 2016).

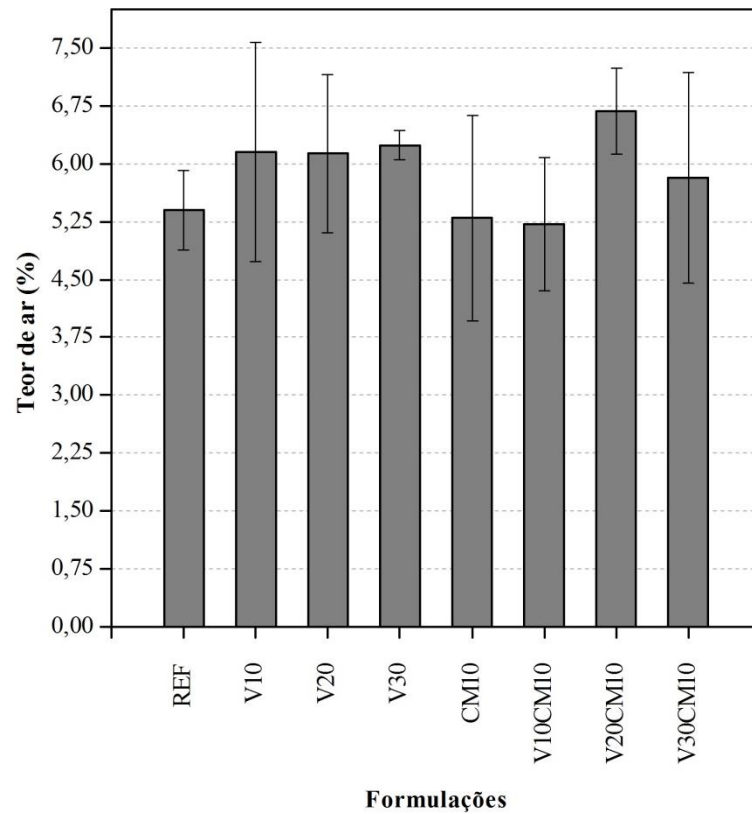


Figura 12 – Resultados de teor de ar (O Autor, 2023).

4.2.2 Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido.

4.2.2.1 Resistência à compressão

Os valores presentes na Figura 13 ilustram os resultados médios obtidos ao avaliar a resistência à compressão de argamassas após 7, 14 e 28 dias. Os resultados apresentados para cada formulação foram analisados de acordo com a análise de variância aos 7 dias ($F=184,02$; $f_{crítico}=2,35$ e $\text{valor-}p=2,83.10^{-22}$), aos 14 dias ($F=37,93$; $f_{crítico}=2,51$ e $\text{valor-}p=3,43.10^{-10}$) e aos 28 dias ($F=11,52$; $f_{crítico}=2,31$ e $\text{valor-}p=3,29.10^{-7}$), além das diferenças entre as médias dos valores por meio do Teste de Tukey, sendo estas descritas a seguir:

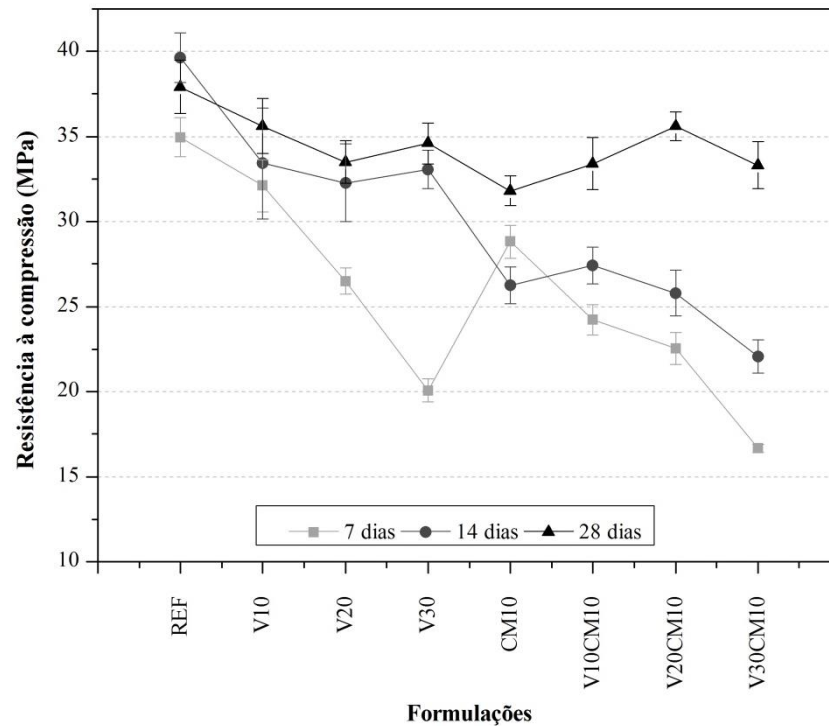


Figura 13 – Resultados de resistência à compressão (O Autor, 2023).

- a) Os valores de resistência à compressão das amostras contendo RLV diminuíram à medida que o percentual de resíduos incorporados aumentava em todas as idades avaliadas. Aos 7 dias, V_{10} , V_{20} e V_{30} apresentaram redução significativa em relação a REF de 8%, 24% e 43%, respectivamente. Aos 14 dias o mesmo comportamento foi observado, com redução de 16%, 19% e 17% em relação à REF. Já aos 28 dias, apenas V_{20} e V_{30} apresentaram decréscimo de aproximadamente 12% e 9%, respectivamente, em comparação com REF.
- b) Aos 7, 14 e 28 dias houveram reduções significativas da resistência à compressão da amostra contendo 10% de CM em comparação com REF, sendo as variações 18%, 34% e 16%, respectivamente.
- c) Todas as amostras com adição da mistura híbrida de RLV e CM apresentaram redução significativa em relação à REF para as idades avaliadas, sendo verificada variação de 31%, 35% e 52% para $V_{10}CM_{10}$, $V_{20}CM_{10}$ e $V_{30}CM_{10}$, respectivamente, aos 7 dias. Aos 14 dias, as reduções passaram a ser de 31%, 35% e 44%, respectivamente, e aos 28 dias 12% para $V_{10}CM_{10}$ e $V_{30}CM_{10}$.
- d) Apenas aos 28 dias a adição de mistura híbrida não proporcionou variação significativa à resistência à compressão em relação às que continham apenas RLV na

composição das argamassas, enquanto nas demais idades a discrepância dos valores foi mais abrangente. Aos 7 dias, a amostra $V_{10}CM_{10}$ apresentou redução de 24% em relação a V_{10} , sendo mantido o mesmo comportamento aos 14 dias, porém com decréscimo de 18%. Em comparação a V_{20} , $V_{20}CM_{10}$ apresentou a mesma tendência, a qual aos 7 dias houve redução significativa de 17%, e aos 14 dias foi de 20%. Já a amostra $V_{30}CM_{10}$ apresentou redução de 17% e 33% aos 7 e 14 dias, respectivamente, em comparação a V_{30} .

e) Aos 7 dias verificou-se que a adição de CM às amostras contendo misturas híbridas com RLV resultou numa diminuição nos valores de resistência à compressão quando comparadas com CM_{10} , sendo esta redução de 15%, 23% e 42% para $V_{10}CM_{10}$, $V_{20}CM_{10}$ e $V_{30}CM_{10}$, respectivamente. Aos 14 dias, não houve variação significativa entre as amostras. Já aos 28 dias, as argamassas com mistura híbrida apresentaram aumento nos valores de resistência à compressão em relação à que continha apenas CM incorporada, sendo a amostra $V_{20}CM_{10}$ a que apresentou maior variação, com acréscimo de 12%, enquanto as demais não variaram significativamente.

Nahi, et al. (2020) afirma que a incorporação de maiores teores de vidro em idades precoces diminui a quantidade de compostos de clínquer presente nas misturas, sendo estes responsáveis pelo desenvolvimento da resistência à compressão das argamassas, enquanto que em curas mais tardias há dissolução da sílica amorfa do vidro em ambiente alcalino, que atua no preenchimento dos poros e contribui para que a resistência aumente.

Em idades precoces, há uma tendência da argamassa de controle apresentar resistência à compressão superior à que contém CM, pelo fato de as reações das cinzas com a Portlandita ($Ca(OH)_2$) começarem a partir dos 28 dias, resultante da hidratação do cimento em percentuais de até 10% em substituição ao cimento (NASSAR, et al., 2022). Assim, por apresentar maior reatividade, os resíduos de vidro potencializam a resistência à compressão das argamassas com misturas híbridas com CM, promovendo valores superiores às que contém apenas cinzas incorporadas (KIM; YI; ZI, 2015).

4.2.2.2 Retração

Os valores expressos na Figura 14 representam as retrações das argamassas em 1, 7 e 28 dias.

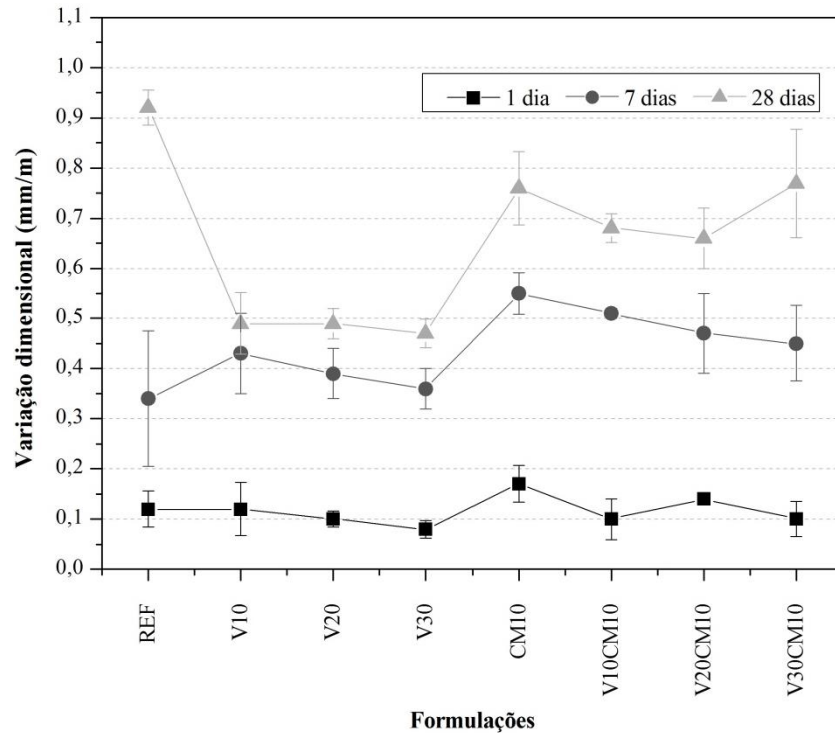


Figura 14 – Resultados do ensaio de retração (O Autor, 2023).

Através dos resultados apresentados avaliados por meio da análise de variância da retração após 1 dia ($F=2,26$; $f_{\text{crítico}}=2,66$ e $\text{valor-p}=8,35.10^{-2}$), 7 dias ($F=2,96$; $f_{\text{crítico}}=2,66$ e $\text{valor-p}=3,43.10^{-2}$) e 28 dias ($F=17,15$; $f_{\text{crítico}}=2,76$ e $\text{valor-p}=7,23.10^{-6}$), e posteriormente a variação entre as médias por meio do teste de Tukey, foi possível verificar variações entre as amostras. As diferenças serão descritas a seguir:

- Não foi verificada variação significativa entre as amostras contendo RLV e REF em 1 e 7 dias. Já aos 28 dias, V₁₀, V₂₀ e V₃₀ apresentaram reduções de 46%, 47% e 48%, respectivamente, em relação à amostra de referência.
- Os valores de retrações médias da amostra CM₁₀ foram semelhantes a REF em 1 dia, enquanto aos 7 dias houve aumento significativo de 63% entre os resultados, e aos 28 dias redução de 17%.
- Em idades precoces, as amostras contendo misturas híbridas de RLV com CM apresentam retrações semelhantes em relação à REF. Aos 7 dias, apenas V₁₀CM₁₀ apresentou aumento significativo de 50%, enquanto aos 28 dias foram verificadas reduções de 26%, 28% e 16% para as amostras V₁₀CM₁₀, V₂₀CM₁₀ e V₃₀CM₁₀, respectivamente.

- d) A adição de misturas híbridas de RLV e CM às argamassas proporcionaram retrações maiores em relação às amostras que continham apenas vidro incorporado, porém as variações apresentaram significância apenas aos 28 dias, as quais foram de 39% entre V_{10} e $V_{10}CM_{10}$, 36% entre V_{20} e $V_{20}CM_{10}$, e 63% entre V_{30} e $V_{30}CM_{10}$.
- e) Não houve variação dimensional significativa entre as amostras contendo CM e as de misturas híbridas de RLV e CM nos idades de avaliação.

Salim e Mosaberpanah (2021) afirmam que ao substituir o cimento por resíduos de vidro há a redução de CaO na matriz, sendo este essencial para a rápida taxa de hidratação, diminuindo, dessa forma, a retração na secagem a seco das argamassas. Já a adição CM proporciona uma quantidade significativa de sílica amorfa, que por consequência contribui para o consumo de água e maior autodessecação, induzindo, dessa forma, para um elevado grau de retração (CHEAH; RAMLI, 2012).

De modo geral, devido à reatividade dos resíduos recicláveis utilizados, há a formação de uma rede rígida através dos produtos gerados, capaz de suportar as tensões resultantes do encolhimento na secagem das argamassas (BERNARDO, et al., 2022; ASCENSÃO, et al., 2019). Quando adicionado em mistura híbrida com CM, o RLV diminui a quantidade de CaO, o que reduz a taxa de hidratação, além de proporcionar a formação de uma rede de poros extremamente interligadas, diminuindo, dessa maneira, a retração das argamassas (HAMZAH, et al., 2021).

4.2.2.3 Absorção de água por capilaridade

Na Figura 15 estão representados os valores médios obtidos para o ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas após 3, 6, 24, 48 e 72 horas em imersão. Através da análise de variância após 3 horas ($F=13,65$; $f_{\text{crítico}}=2,42$ e $\text{valor-p}=5,42 \cdot 10^{-7}$), 6 horas ($F=24,66$; $f_{\text{crítico}}=2,42$ e $\text{valor-p}=1,71 \cdot 10^{-9}$), 24 horas ($F=19,78$; $f_{\text{crítico}}=2,30$ e $\text{valor-p}=4,02 \cdot 10^{-10}$), 48 horas ($F=47,92$; $f_{\text{crítico}}=2,29$ e $\text{valor-p}=8,8 \cdot 10^{-16}$) e 72 horas ($F=54,16$; $f_{\text{crítico}}=2,29$ e $\text{valor-p}=1,36 \cdot 10^{-16}$), e do teste de Tukey, verificou-se variações significativas entre as amostras. Essas diferenças são descritas a seguir:

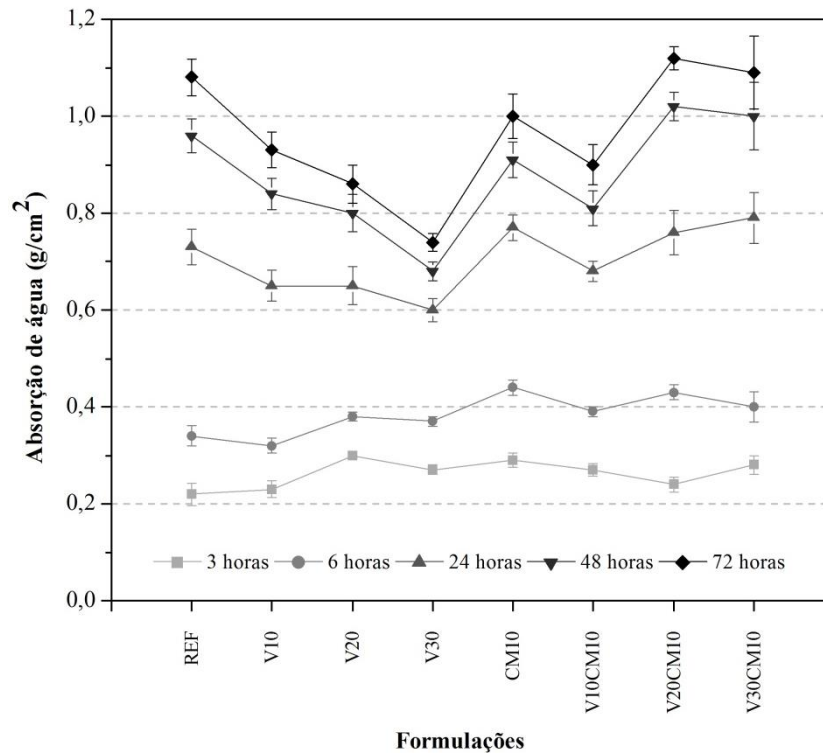


Figura 15 – Resultados de absorção de água por capilaridade (O Autor, 2023).

- a) Após imersão em água por 3 horas, V₂₀ e V₃₀ foram as amostras que mais absorveram água, apresentando aumento de 38% e 23% em relação a REF. Em 6 horas, apenas V₂₀ apresentou variação significativa em relação a REF, em torno de 13%. Às 24 horas, todas as amostras (V₁₀, V₂₀ e V₃₀) reduziram consideravelmente, em valores de 11%, 11% e 18%. Já em 48 horas, houve redução de 12%, 17% e 29% em relação a REF. O mesmo comportamento foi mantido em 72 horas com variações de 14%, 20% e 30% em comparação com REF.
- b) CM₁₀ apresentou variações significativas em relação a REF apenas após imersão em água em 3 e 6 horas, com diferença percentual de 30% em ambas idades. Em 24, 48 e 72 não houveram diferenças significantes entre os valores médios.
- c) As amostras com misturas híbridas de RLV e CM apresentaram algumas variações consideráveis quando comparados os seus valores médios de absorção de água por capilaridade em comparação com REF. Às 3 e 6 horas, V₁₀CM₁₀ aumentou em frações de 24% e 16%, e às 48 e 72 horas houve diminuição de 16% e 10%, enquanto em 24 horas os valores foram equivalentes à amostra de referência. V₂₀CM₁₀ apresentou um aumento significativo de 28% apenas em 6 horas, e V₃₀CM₁₀ variou consideravelmente em 3 e 6 horas, apresentando valores de 27% e

18% para essas idades, respectivamente, enquanto nas demais não houveram diferenças significantes.

d) A adição de CM nas misturas híbridas com RLV às argamassas resultou em alguns valores próximos às amostras que não continham os resíduos incorporados. V_{10} apresentou variações de 18% e 21% em 3 e 6 horas, em relação a $V_{10}CM_{10}$. As amostras V_{20} e $V_{20}CM_{10}$ apresentarem variações significativas de 20%, 13%, 17%, 27% e 30% em 3, 6, 24, 48 e 72 horas, respectivamente. Já V_{30} e $V_{30}CM_{10}$ variaram em 32%, 46% e 48% em 24, 48 e 72 horas.

e) Após 3 horas imersas em água, apenas as argamassas $V_{20}CM_{10}$ variaram significativamente em relação a CM_{10} , em percentual de 15%. Ao passarem 6 horas em contato com a água, as amostras $V_{10}CM_{10}$ e $V_{30}CM_{10}$ reduziram significativamente em 11% e 10%, respectivamente. Em 24 horas, apenas $V_{10}CM_{10}$ manteve a mesma tendência, aumentando a diferença para 13%. Nas idades seguintes, todas as amostras apresentaram variações significativas em relação a CM_{10} , com redução de 11%, e aumento 12% e 9% em 48 horas, e em 72 horas, os valores passaram a ser de 10%, 12% e 9%.

A incorporação de resíduos de vidro diminui a absorção de água das argamassas, o que segundo Oliveira, Brito e Veiga (2013) é resultante da diminuição da porosidade com o aumento do percentual de resíduos finos de vidro incorporado proveniente do efeito filler, proporcionando, assim, uma melhora na densidade, dificultando a percolação da água no interior da matriz.

Segundo Fusade, et al. (2019), a absorção de água semelhante ou ligeiramente superior das argamassas contendo CM incorporadas em relação à sem adições está relacionada à capacidade higroscópica do material ser elevada, o que favorece para a percolação da água no interior da matriz de forma semelhante entre as duas amostras. Além disso, a adição de cinzas desacelera a reação de hidratação, influenciando no aumento da porosidade da matriz, facilitando, dessa maneira, a percolação da água no interior das argamassas, aumentando a absorção desta em idades iniciais (INCE; TAYANÇLI; DEROGAR, 2021).

4.2.2.4 Resistência potencial de aderência à tração

Na Figura 16 estão apresentados os valores médios obtidos no ensaio de resistência potencial de aderência e na Tabela 17 a forma de ruptura mais recorrente de cada formulação, respectivamente.

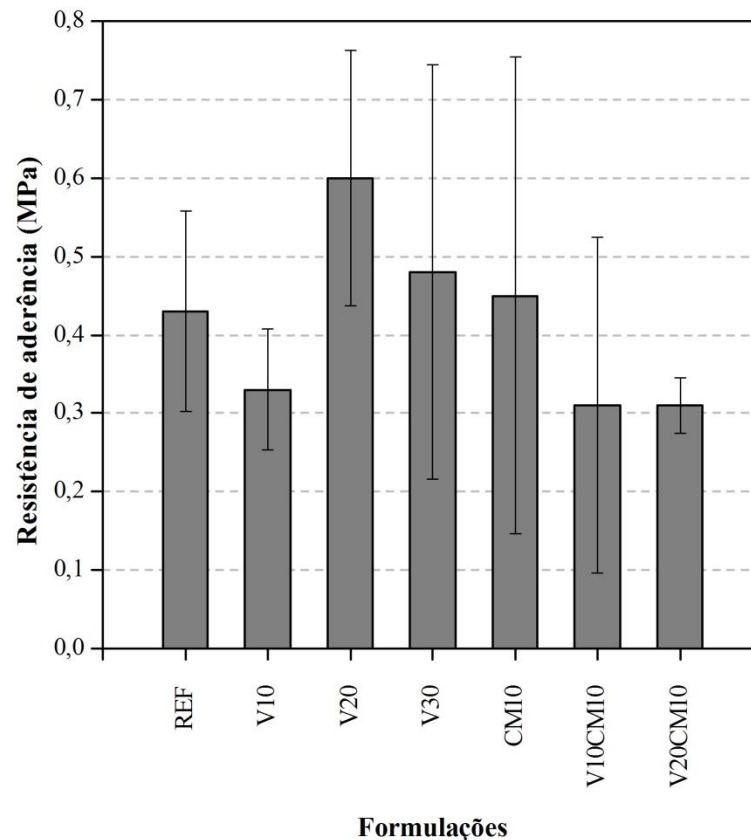


Figura 16 – Resultados de resistência potencial de aderência à tração (O Autor, 2023).

Tabela 17 – Formas de ruptura mais recorrentes

Formulações	Formas de ruptura
REF	Ruptura na interface chapisco/argamassa (D – ver Figura 10)
V ₁₀	Ruptura na interface chapisco/argamassa (D)
V ₂₀	Ruptura na interface chapisco/argamassa (D)
V ₃₀	Ruptura na interface argamassa/cola (F)
CM ₁₀	Ruptura na interface chapisco/argamassa (D)
V ₁₀ CM ₁₀	Ruptura na interface chapisco/argamassa (D)
V ₂₀ CM ₁₀	Ruptura na argamassa (E)

Fonte: O Autor (2023).

Diferentemente das propriedades descritas anteriormente, não foi possível avaliar a resistência potencial de aderência à tração da amostra $V_{30}CM_{10}$ por haver deslocamento desta ao ser aplicada ao substrato. Por meio da Tabela 17 é possível verificar que as demais amostras apresentaram boa ligação com o substrato aplicado, com rupturas na interface chapisco/argamassa, em grande maioria. Através da análise de variância ($F=0,88$; $f_{crítico}=2,57$ e valor- $p=0,53$), seguido pelo teste de Tukey, foi possível verificar algumas variações significativas entre os valores médios das amostras, sendo elas analisadas a seguir:

- a) Não foi verificada variação significativa entre os valores médios de resistência de aderência à tração de REF e as amostras contendo RLV incorporados.
- b) A adição de CM à argamassa não proporcionou variação significativa entre os valores em relação à amostra de referência.
- c) As amostras contendo misturas híbridas de RLV e CM também não apresentaram variação significante em relação à referência.
- d) Quando comparado os valores das amostras contendo misturas híbridas e as de apenas RLV, apenas $V_{20}CM_{10}$ e V_{20} apresentaram diferença significativa entre os seus valores médios, sendo esta uma redução de 48%.
- e) Não foi verificada variação significativa entre as amostras contendo misturas híbridas de RLV e CM com a amostra CM_{10} .

Hisseine e Tagnit-Hamou (2020) justificaram que a adição de vidro aumenta a compacidade da matriz cimentícia, levando a uma maior ligação entre as partículas, devido à fricção entre elas, resultando numa boa resistência de aderência ao substrato.

A adição de até 10% de cinzas é considerada a substituição ideal do material, por apresentar um número baixo de partículas que não reagem. Os produtos hidratados advindos das reações são capazes de aumentar o módulo de elasticidade e diminuir a estrutura de poros da matriz, resultando numa boa aderência ao substrato e, conseqüentemente, desenvolvimento da resistência (AKINYEMI; DAI, 2020).

4.2.2.5 Durabilidade

Na Figura 17 estão ilustrados os valores da perda de massa das argamassas no ensaio de durabilidade em 14 e 42 dias.

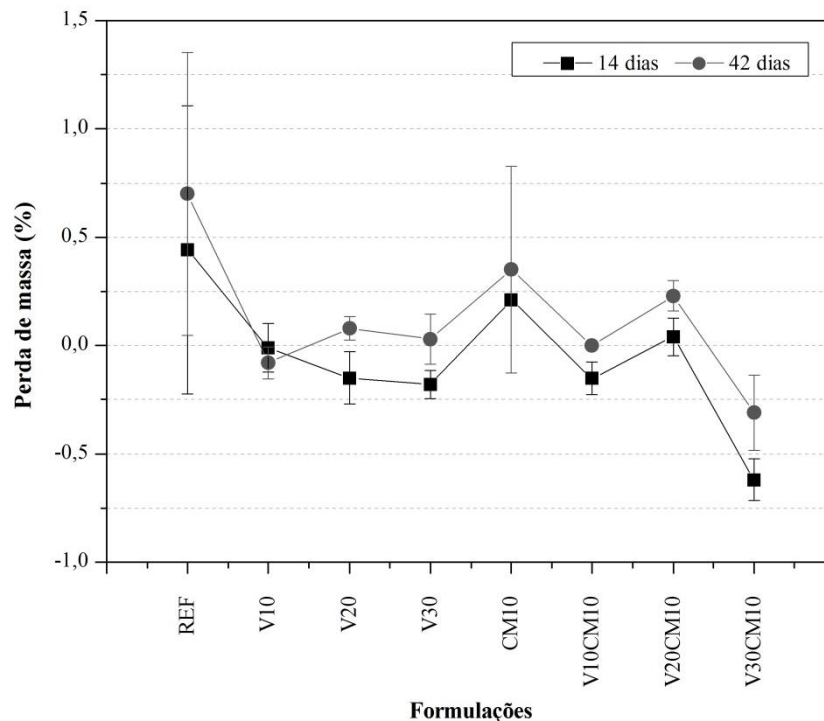


Figura 17 – Resultados de perda de massa no ensaio de durabilidade (O Autor, 2023).

Por meio da análise de variância após 14 dias ($F=6,89$; $f_{\text{crítico}}=2,71$ e valor- $p=8,9 \cdot 10^{-4}$) e 42 dias ($F=3,47$; $f_{\text{crítico}}=2,71$ e valor- $p=2,05 \cdot 10^{-2}$), seguido do teste de Tukey, verificou-se variações significativas, as quais estão expressas a seguir:

- A adição de RLV às argamassas melhorou a durabilidade das argamassas, resultando em uma matriz mais estabilizada em relação a REF. Aos 14 dias, não houve variação significativa entre os valores das amostras, enquanto aos 42 dias apenas V_{10} apresentou diferença considerável, com melhora na durabilidade de 111%.
- Não houve variação significativa entre os valores de perda de massa de CM_{10} e REF.
- As amostras contendo mistura híbrida de RLV com CM apresentaram variação na perda de massa inferior à de referência, após o ataque ao sulfato de sódio. Apenas

$V_{30}CM_{10}$ apresentou variações significativas em relação a REF, sendo reduções de 240% e 144% aos 14 e 42 dias, respectivamente.

d) Aos 14 dias, houve redução significativa apenas de $V_{30}CM_{10}$ em relação a V_{30} , sendo esta de 236%, mantendo o mesmo comportamento aos 42 dias, porém com o valor passando a ser de 933%.

e) Aos 14 dias, as amostra contendo apenas CM apresentou valores superiores às de mistura híbrida, com variação significativa de 174% e 398% em relação a $V_{10}CM_{10}$ e $V_{30}CM_{10}$, respectivamente. Já aos 42 dias, apenas $V_{30}CM_{10}$ reduziu significativamente, sendo esta variação de 189%.

Segundo Lu, et al. (2020), a redução na perda de massa com a adição de resíduos de vidro é resultante da redução de hidróxido de cálcio, produto este responsável pela maior vulnerabilidade da matriz cimentícia a ambientes agressivos. Além disso, foi verificado que a melhora na resistência ao ácido é proveniente da formação de um gel com baixo teor de cálcio/silício (Ca/Si), resultante da reação pozolânica das partículas de vidro. Sasui, et al. (2021) complementa que o vidro fornece Si reativo, fortalecendo a ligação, tornando-se menos suscetível a ataques ácidos, além da baixa permeabilidade do vidro que impede a passagem de íons.

A adição de cinzas diminui a atividade pozolânica das argamassas, além de proporcionar a presença de baixa quantidade de sílica amorfa, o que segundo Cheah e Ramli (2012) são os principais fatores responsáveis pela melhora na durabilidade das argamassas. Acordi, et al. (2020) ainda afirma que a adição de MCSs reduz a quantidade de hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ para reagir com o sulfato, promovendo, dessa maneira, uma melhora na resistência ao sulfato.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo estão presentes as principais conclusões obtidas por meio das análises dos resultados dos ensaios de caracterização das argamassas e seus materiais componentes, além de sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo geral a análise da influência do uso de resíduo de lapidação de vidro, cinza de madeira e suas misturas híbridas nas propriedades da argamassa, ao substituir parcialmente o cimento Portland.

Os ensaios de caracterização dos materiais componentes das argamassas, bem como suas propriedades para o estado fresco e endurecido, foram realizados em laboratório seguindo os critérios estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, de modo a analisar as propriedades físicas, químicas e mecânicas.

De acordo com os resultados obtidos, analisados ao longo do capítulo 4, uma série de conclusões são consideradas. Assim, para as argamassas no estado fresco, é possível inferir:

Que a adição de RLV, CM e suas misturas não proporcionou alterações significativas ao teor das argamassas, independente dos percentuais de substituição utilizados.

Já nas propriedades do estado endurecido das argamassas, é possível constatar que:

Independente dos resíduos e percentuais de substituição utilizados, todas as amostras apresentaram valores de resistência à compressão inferiores à referência, em todas as idades. Os resultados de RLV foram superiores a CM a partir de 14 dias, enquanto as misturas híbridas apresentaram oscilações. Entretanto, apesar das diferenças, as argamassas apresentaram valores médios superiores a 32 MPa, aos 28 dias.

No ensaio de retração, foi possível verificar semelhança na variação dimensional das argamassas com incorporação de RLV e a de referência em 1 e 7 dias, enquanto aos 28 REF apresentou variação superior. Por outro lado, a adição de CM resultou nos maiores valores de variações entre todas as amostras, sendo visto o comportamento de ambos os resíduos nas amostras de misturas híbridas, as quais com o aumento dos percentuais de RLV, as retrações diminuíram.

Em relação à absorção de água por capilaridade, a partir de 24 horas oscilações começaram a ser observadas, com redução de absorção à medida que o percentual de RLV aumentou, enquanto CM mantinha os valores mais próximos de REF. Para as amostras contendo as misturas híbridas foi verificado comportamento distinto, sendo $V_{10}CM_{10}$ a que apresentou melhor resultado entre elas. De modo geral, V_{10} , V_{20} , V_{30} e $V_{10}CM_{10}$ foram as argamassas com menores absorções de água ao longo de todo período de avaliação.

Na avaliação da resistência potencial de aderência à tração foi observado que à medida que o percentual de RLV aumentou, os valores aumentaram, enquanto os valores de CM_{10} não apresentaram diferença significativa em relação às demais. Entretanto, foi verificado que não houve variação considerável entre os valores das amostras contendo adição de misturas híbridas.

Por fim, na avaliação da perda de massa no ensaio de durabilidade verificou-se que as argamassas com maiores percentuais de resíduos apresentaram maior estabilidade à solução de Na_2SO_4 , principalmente as que continham RLV. Os melhores resultados para este ensaio foram das amostras V_{10} , V_{20} , V_{30} e $V_{10}CM_{10}$, as quais ficaram próximas de zero após o ataque químico.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização no estado fresco e endurecido das argamassas, verifica-se que a amostra V_{30} apresenta o melhor desempenho entre todas as formulações nos ensaios de retração, durabilidade e absorção de água por capilaridade, mostrando-se superior à de referência em todos os experimentos realizados. Já entre as misturas híbridas, $V_{20}CM_{10}$ foi a que obteve melhor comportamento, destacando-se nos ensaios de resistência à compressão, retração e durabilidade, sendo inferior em absorção de água por capilaridade e resistência potencial de aderência à tração.

Dessa maneira, é possível verificar que a utilização de RLV, CM e suas misturas híbridas em substituição ao cimento na produção de argamassas é uma alternativa sustentavelmente viável, com propriedades que permitem a sua utilização na construção civil.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em consequência ao tempo disponível para realização das pesquisas e realização dos ensaios para maior aprofundamento dos resultados, o presente trabalho proporcionou a percepção de algumas lacunas. Assim, sugere-se para trabalhos futuros:

- Realização do estudo da variação de fator a/c para as mesmas formulações adotadas a fim de verificar a influência nas propriedades das argamassas nos estado fresco e endurecido.
- Ampliar a verificação de ensaios de resistência à compressão, retração, absorção de água por capilaridade e resistência potencial de aderência à tração com uma maior quantidade de amostras.
- Realização do estudo da adoção de aditivos plastificantes a fim de atender uma consistência determinada.
- Realização do estudo da aplicação dos resíduos em substituição parcial ao agregado miúdo na produção de argamassas.
- Realização da análise da microestrutura das argamassas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014 (Versão corrigida: 2015).

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13528-1**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 13528-2**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 2: Aderência ao substrato. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 13583**: Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16606:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16607:** Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16916:** Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16972:** Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ABDULKAREEM, Omar A.; RAMLI, Mahyuddin; MATTHEWS, John C. Production of geopolymer mortar system containing high calcium biomass wood ash as a partial substitution to fly ash: An early age evaluation. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, 2019, 106941.

ACORDI, J. et al. New waste-based supplementary cementitious materials: Mortars and concrete formulations. **Construction and Building Materials**, v. 240, 2020, 117877.

AFSHINNIA, Kaveh; RANGARAJU, Prasada R. Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 81, 2015, p. 257-267.

AKINYEMI, Banjo A.; DAI, Chunping. Development of banana fibers and wood bottom ash modified cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020, 118041.

ALI, Hafiz. A.; XUAN, Dongxing; POON, Chi S. Assessment of long-term reactivity of initially lowly-reactive solid wastes as supplementary cementitious materials (SCMs). **Construction and Building Materials**, v. 232, 2020, 117192.

ARAUJO, Giovanna V. N. **Influência da incorporação da mistura híbrida de resíduo de vidro e cinza de madeira nas propriedades da argamassa**. 2021. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Sergipe, Estância - SE, 2021.

ASCENSÃO, Bernardo et al. Shrinkage and Mitigation Strategies to Improve the Dimensional Stability of CaO-FeOx-Al₂O₃-SiO₂ Inorganic Polymers. **Materials**, v. 12, 2019, 3679.

AYAT, et al. Valorisation of waste glass powder and brick dust in air-lime mortars for restoration of historical buildings: Case study theatre of Skikda (Northern Algeria). **Construction and Building Materials**, v. 315, 2022, 125681.

BAUER, Luiz A. F. **Materiais de Construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. 568 p.

BERNARDO, Enrico et al. Double-life sustainable construction materials from alkali activation of volcanic ash/discarded glass mixture. **Construction and Building Materials**, v. 359, 2022, 129540.

CARASEK, H. Argamassas. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, v. 2, 2007, p. 863-904.

CENTENARO, Sauana H.; SILVA, João A. G.; PAULINO, Rafaella S. Uso de cinzas de biomassa geradas na agroindústria do malte para produção de argamassas. **Revista Internacional de Ciências**, v. 11, 2021, p. 158-176.

CERCEL, Jonathan; ADESINA, Adeyemi; DAS, Sreekanta. Performance of eco-friendly mortars made with alkali-activated slag and glass powder as a binder. **Construction and Building Materials**, v. 270, 2021, 121457.

CHEAH, Chee B.; RAMLI, Mahyuddin. Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 30, 2012, p. 320-329.

CHERENE, Mariana G. P. et al. Desenvolvimento de argamassa múltiplo-uso com incorporação de resíduo de vidro. **74º Congresso Anual da ABM – Internacional**. São Paulo, 2019, 9 p.

EZ-ZAKI, H.; EL GHARBI, B.; DIOURI, A. Development of eco-friendly mortars incorporating glass and shell powders. **Construction and Building Materials**, v. 159, 2018, p. 198-204.

FILOGÔNIO, Paulo Henrique C. **Valorização do resíduo de lapidação de vidros planos para obtenção de cerâmica vermelha**. 2016. 88 f. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória - ES. 2016.

FUSADE, Lucie et al. The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings. **Construction and Building Materials**, v. 212, 2019, p. 500-513.

GERGES, Najib et al. Eco-friendly mortar: Optimum combination of wood ash, crumb rubber, and fine crushed glass. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, 2021, e00588.

GIORDANI, Douglas L. et al. Desenvolvimento de uma formulação de argamassa refratária com utilização de resíduos industriais para aplicação na construção civil. **Total Metal Mater Min**, v. 18, 2021, e2236.

GOROSPE, Karla et al. Effect of various glass aggregates on the shrinkage and expansion of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 220, 2019, p. 301-311.

FRANÇA, Débhora F. S. et al. Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, 2016, p. 153-166.

HACINI, Mostefa et al. Utilization and assessment of recycled polyethylene terephthalate strapping bands as lightweight aggregates in Eco-efficient composite mortars. **Construction and Building Materials**, v. 270, 2021, 121427.

HAMID, Zubaid; RAFIQ, Suhail. An experimental study on behavior of wood ash in concrete as partial replacement of cement. **Material Today: Proceedings**, v. 46, 2021, p. 3426-3429.

HAMZAH, Hussein K. et al. Effect of waste glass bottles-derived nanopowder as slag replacement on mortars with alkali activation: Durability characteristics. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, 2021, 775.

HARDER, Joachim. **Glass recycling – Current market trends**. Barcelona: Recovery, 2018. Não paginado. Disponível em: <https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/glass-recycling-current-market-trends_3248774.html>. Acesso em: 25 mai. 2022.

HE, Pingping et al. ASR expansion of alkali-activated cement glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 261, 2020, 119925.

HIGUCHI, Adma M. D. et al. Use of glass powder residue as an eco-efficient supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 304, 2021, 124640.

HISSEINE, Ousmane A.; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Development of ecological strain-hardening cementitious composites incorporating high-volume ground-glass pozzolans. **Construction and Building Materials**, v. 238, 2020, 117740.

HWANG, Sangchul S.; CORTÉS, Carla M. M. Properties of mortar and pervious concrete with co-utilization of coal fly ash and waste glass powder as partial cement replacements. **Construction and Building Materials**, v. 270, 2021, 121415.

INCE, Ceren; TAYANÇLI, Seval; DEROGAR, Shahram. Recycling waste wood in cement mortars towards the regeneration of sustainable environment. **Construction and Building Materials**, v. 299, 2021, 123891.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos vão para reciclagem**. [S.I.], [s.n.], 2017. Não paginado. Disponível em:

<https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29296>.
Acesso em: 27 mai. 2022.

JIANG, Xi et al. Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures. **Journal of Cleaner Production**, v. 340, 2022, 130778.

KABAY, Nihat; MIYAN, Nausad; ÖZKAN Hakan. Utilization of pumice powder and glass microspheres in cement mortar using paste replacement methodology. **Construction and Building Materials**, v. 282, 2021, 122691.

KHAN, Md. Nabi N.; KURI, Jhutan C.; SARKER, Prabir K. Effect of waste glass powder as a partial precursor in ambient cured alkali activated fly ash and fly ash-GGBFS mortars. **Journal of Building Engineering**, v. 34, 2021, 101934.

KIM, Jihwan; YI, Chongku; ZI, Goangseup. Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 75, 2015, p. 242-246.

KIM, Seong K.; YANG, Hee J. Utilization of liquid crystal display (LCD) waste glass powder as cementitious binder in mortar for enhancing neutron shielding performance. **Construction and Building Materials**, v. 270, 2021, 121859.

LI, AoYang et al. Study on the performance of pervious concrete mixed with waste glass powder. **Construction and Building Materials**, v. 300, 2021, 133997.

LI, Qiong et al. Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 324, 2022, 126531.

LIU, G.; FLOREA, M. V. A.; BROUWERS, H. J. H. Performance evaluation of sustainable high strength mortars incorporating high volume waste glass as binder. **Construction and Building Materials**, v. 202, 2019, p. 574-588.

LORDELO, Rodrigo S. D. **Avaliação da utilização de resíduo de vidro de garrafas na produção de argamassa**. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana – BA. 2018.

LU, Jian-Xin et al. Synergetic recycling of waste glass and recycled aggregates in cement mortars: Physical, durability and microstructure performance. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, 2020, 103632.

LU, Jian-Xin; DUAN, Zhen-hua; POON, Chi S. Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet. **Construction and Building Materials**, v. 131, 2017, p. 793-799.

MACIEL, Lucia L.; BARROS, Mércia M. S. B.; SABBATINI, Fernando H. **Recomendações para execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação interna e externa e tetos**. São Paulo: EPUSP, 1998, 36 p.

MATOS, Ana M.; SOUSA-COUTINHO, Joana. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 36, 2012, p. 205-215.

MELO, Márcio C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste. Caruaru – PE. 2012.

NAHI, Samir et al. Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder. **Construction and Building Materials**, v. 262, 2020, 120875.

NAKAKURA, Elza Hissae. **Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a MERUC**. 2003. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 2003.

NASSAR, Roz-Ud-Din et al. Strength, electrical resistivity and sulfate attack resistance of blended mortars produced with agriculture waste ashes. **Case Studies in Construction Materials**, v.16, 2022, e00944.

OLIVEIRA, I. R. et al. Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo Arte Editorial**, 2000. Não paginado.

OLIVEIRA, R.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine glass aggregates in renderings. **Construction and Building Materials**, v. 44, 2013, p. 329-341.

PARGHI, Anant; ALAM, M. Shariah. Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR). **Construction and Building Materials**, v. 104, 2016, p. 34-43.

PATEL, Dharendra et al. Properties of cement mortar in substitution with waste fine glass powder and environmental impact study. **Journal of Building Engineering**, v. 27, 2020, 100940.

PATEL, Dharendra et al. Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 199, 2019, p. 406-415.

PENACHO, Paulo M. **Desempenho de argamassas com incorporação de resíduos finos de vidro**. 2012. 428 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. 2012.

PINTO, Fernando M. C. A. **Influência da pressão exterior na embebição de materiais de construção**. 1999. 113 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto. Portugal. 1999.

RAMOS, Telma; MATOS, Ana M.; SOUSA-COUTINHO, Joana. Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion. **Construction and Building Materials**, v. 49, 2013, p. 343-351.

RASHIDIAN-DEZFOULI, Hassan; RANGARAJU, Prasada R. Study on the effect of selected parameters on the alkali-silica reaction of aggregate in ground glass fiber and fly ash-based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**, v. 271, 2021, 121549.

RECENA, Fernando A. P. **Conhecendo a argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015. 188 p.

RESENDE, Domingos S. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**. 2013. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto - MG, 2013.

RIBEIRO, Anderson O. **Estudo de resíduo de lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland**. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2015.

SACCANI, Andrea et al. Effect of the chemical composition of different types of recycled glass used as aggregates on the ASR performance of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 154, 2017, p. 804-809.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. 2014. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia das Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2014.

SALIM, Muhammad U.; MOSABERPANAH, Mohammad A. Mechanical and durability properties of high-performance mortar containing binary mixes of cenosphere and waste glass powder under different curing regimes. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, 2021, p. 602-617.

SANTOS, Diogo P. **Influência do resíduo de vidro nas propriedades de uma argamassa colante**. 2016. 118 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes - RJ. 2016.

SASUI, Sasui, et al. Effects of waste glass as a sand replacement on the strength and durability of fly ash/GGBS based alkali activated mortar. **Ceramics International**, v. 47, 2021, p. 21175-21196.

SAUER, Aline S. **Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural**. 2013. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES. 2013.

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, 2018, p. 2-26.

SIAD, Hocine et al. Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 113, 2016, p. 163-173.

SIDDIQUE, Rafat. Utilization of wood ash inete manufacturing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 67, 2012, p. 27-33.

SIGVARDSEN, Nina M.; GEIKER, Mette R.; OTTOSEN, Lisbeth M. Reaction mechanisms of wood ash for use as a partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 286, 2021, 122889.

SIGVARDSEN, Nina M. et al. Impact of production parameters on physiochemical characteristics of wood ash for possible utilisation in cement-based materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, 2019, p. 230-240.

SILVA, Heloisa R. T. et al. Resíduo de lapidação de vidro: caracterização e efeito de sua incorporação na resistência mecânica de uma argamassa. **Brazilian Journals of Business**, v. 2, n.2, 2020, p. 1504-1517.

SOLDADO, Eliana et al. Durability of mortar matrices of low-cement concrete with specific additions. **Construction and Building Materials**, v. 309, 2021, 125060.

SOUZA, D. J.; ANTUNES, L. R.; SANCHEZ, L. F. M. The evaluation of Wood Ash as a potential preventive measure against alkali-silica reaction induced expansion and deterioration. **Journal of Cleaner Production**, v. 358, 2022, 131984.

SOUZA, et al. Study for the incorporation of wood ash in soil-cement brick. **Cerâmica** 68, v.385, 2022, p.38-45.

TICIANELLI, Ticiane R. **Incorporação de vidro em substituição ao agregado miúdo (areia) em argamassas**. 2018. 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Rondônia – FARO, Porto Velho – RO. 2018.

TOSTI, Lorenzo et al. Technical and environmental performance of lower carbon footprint cement mortars containing biomass fly ash as a secondary cementitious material. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 134, 2018, p. 24-33.

TRENTIN, Priscila O. et al. Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. **Revista Matéria**, v. 25, 2020, E-12576.

WANG, Her-Yung. The effect of the proportion of thin film transistor–liquid crystal display (TFT–LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, 2011, p. 791-797.