

## Influência da incorporação de resíduo de lapidação de vidro nas propriedades da argamassa de cimento Portland

### Influence of the incorporation of glass lapidary residue on the properties of Portland cement mortar

Emerson Anchieta Santos<sup>1</sup>, Giovanna Victória do Nascimento Araujo<sup>1</sup>, Guilherme Menezes Fonsêca<sup>1</sup>,  
Vanessa Gentil de Oliveira Almeida<sup>1</sup>, Herbet Alves de Oliveira<sup>1</sup>, Luciano de Melo<sup>1</sup>,  
Fernanda Martins Cavalcante de Melo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Sergipe. Rua Café Filho, n. 260, Estância, SE, Brasil.

e-mail: emersonedf16@gmail.com, gioaraujo1504@gmail.com, gmenezes861@gmail.com, vanessa.almeida@ifs.edu.br, herbet.oliveira@ifs.edu.br, luciano.melo@ifs.edu.br, fernanda.melo@ifs.edu.br

#### RESUMO

O setor da construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento social, mas é responsável pelo consumo de recursos naturais e energéticos do mundo. Portanto, as pesquisas buscam incorporar resíduos na produção de materiais, alinhando-se com metas globais de redução das emissões de CO<sub>2</sub>, descarte em aterros sanitários e extração dos recursos. Entre os resíduos industriais, destaca-se o resíduo proveniente do processo de lapidação do vidro (RLV), pouco explorado na literatura e com taxas significativas de descarte em aterros. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar as propriedades de argamassas com incorporação de RLV, em substituição parcial ao cimento Portland e ao agregado, por meio de uma investigação abrangente das propriedades do material produzido. Os materiais componentes das misturas e as argamassas foram caracterizados de acordo com as prescrições normativas. Os dados obtidos foram analisados por meio da metodologia de análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey. Os resultados mostraram que o RLV influenciou no índice de consistência, na massa específica real e na aderência à tração das argamassas, reduziu a absorção de água, absorção por capilaridade e retração. Quanto à resistência à compressão, observou-se que até 10% pelo RLV, em substituição ao cimento, não compromete esta propriedade, havendo aumento relativo de resistência, quando em substituição à areia. Já para a durabilidade, houve uma melhoria nesta propriedade. Conclui-se que a utilização de RLV, em substituição parcial ao cimento Portland e ao agregado miúdo, na produção de argamassas é uma alternativa técnica, pois apresentou desempenho que possibilita seu uso, e atende aos princípios do desenvolvimento sustentável, os quais apresentam alternativas capazes de contribuir para a economia de energia e recursos naturais.

**Palavras-chave:** Resíduo de lapidação de vidro; Argamassa; Sustentabilidade; Resíduo.

#### ABSTRACT

The construction sector plays a fundamental role in social development, but is responsible for the consumption of the world's natural and energy resources. Therefore, research seeks to incorporate waste into the production of materials, aligning with global goals for reducing CO<sub>2</sub> emissions, disposal in landfills and resource extraction. Among industrial waste, waste from the glass cutting process (GCW) stands out, little explored in the literature and with significant rates of disposal in landfills. Therefore, this research aims to evaluate the properties of mortars incorporating GCW, as a partial replacement for Portland cement and aggregate, through a comprehensive investigation of the properties of the material produced. The materials that make up the mixtures and mortars were characterized in accordance with regulatory requirements. The data obtained were analyzed using the analysis of variance (ANOVA) methodology and Tukey test. The results showed that the GCW influenced the consistency index, the specific gravity and the tensile bond strength of the mortars, reducing water absorption, capillary absorption and shrinkage. As for compressive strength, it was observed that up to 10% by GCW, replacing cement, does not compromise this property, with a relative increase in strength when replacing sand. As for durability, there was an improvement in this property. It is concluded that the use of GCW, in partial

replacement of Portland cement and fine aggregate, in the production of mortars is a technical alternative, as it presented performance that enables its use, and meets the principles of sustainable development, which present capable alternatives to contribute to saving energy and natural resources.

**Keywords:** Glass cutting waste; Mortar; Sustainability; Waste.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem uma importância considerável no progresso da sociedade, em razão de ser atuante direto na transformação do ambiente [1]. Com esse crescimento, problemas ambientais e de saúde são gerados associados ao rápido aumento dos resíduos [2]. Além disso, grandes quantidades de recursos naturais e energia são consumidos para fabricar materiais para construção civil, entre eles o cimento Portland, essencial para produção do material mais utilizado na Terra, depois da água: o concreto [3].

No entanto, estima-se que para produzir uma tonelada de cimento, necessita-se de 1,5 toneladas de matéria-prima. Além disso, o cimento Portland tem um processo consumidor de energia poluente, que fornece cerca de 7% de emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera, contribuindo com o efeito estufa. Supõe-se que para produzir uma tonelada de cimento, uma tonelada de  $\text{CO}_2$  é lançada na atmosfera, devido à queima tanto da matéria-prima quanto do combustível [4, 5]. Assim, a mitigação das fontes de emissão antropogênica de carbono ajudará a reduzir os níveis de gases com efeito estufa a nível mundial [6].

A intensidade das emissões diretas de  $\text{CO}_2$  na produção de cimento permaneceu estável nos últimos cinco anos e estima-se que tenha aumentado aproximadamente 1% em 2022. Todavia, são necessárias reduções anuais de emissão de  $\text{CO}_2$  de 4% até 2030, para que o setor alcance emissões líquidas zero até 2050 (*Net Zero 2050*). A redução da proporção de clínquer no cimento, melhorias contínuas na eficiência energética e dos materiais, adoção de combustíveis com baixo teor de carbono e implantação de tecnologias inovadoras, como a captura e armazenamento de carbono (CCS), devem ser implementadas para alcançar esse objetivo [7].

Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais com o uso convencional de materiais, o estudo da utilização de subprodutos cimentícios e pozolânicos, como adições minerais, têm aumentado. Pesquisas apontam resultados positivos para as propriedades de trabalhabilidade, durabilidade e resistência mecânica, em decorrência da utilização desses subprodutos cimentícios na forma de aglomerantes, agregados e pozolanas em argamassas [8, 9]. Uma outra alternativa para mitigar os efeitos do cimento Portland no meio ambiente é a utilização de outros ligantes, como os geopolímeros, considerados materiais compósitos avançados e alternativos ao cimento Portland, por apresentarem baixas emissões de  $\text{CO}_2$  durante a produção e também por serem produzidos a partir de resíduos industriais [10].

A crescente taxa de geração de resíduos industriais, o reduzido espaço nos aterros e o aumento no custo de disposição no solo, tornam essencial reciclar e reutilizar resíduos industriais. Portanto, o crescimento na demanda por novos materiais de construção visando a redução dos impactos ambientais está aumentando cada vez mais [11]. A partir da década de 1970, pesquisadores estudam sobre a incorporação de resíduo de vidro como agregado ou substitutos de cimento em argamassas e concretos [12] e sabe-se que 75% do vidro são descartados em aterros sanitários em todo o mundo e são gerados em todos os estados brasileiros [13].

Os percentuais adotados em estudos sobre a utilização de resíduos de vidro em argamassas variam de 5% a 100% e a granulometria utilizada oscila de 8,35  $\mu\text{m}$  – 5,0 mm [4, 14–20]. Segundo AFSHINNIA e RANGARAJU [21] quanto menores as partículas do resíduo de vidro, a argamassa torna-se mais reativa e suas propriedades são melhoradas. Em relação à composição química dos resíduos de vidros utilizados, há predominância do dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$  – 63% a 73%) e o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$  – 9% a 12%) [9, 12, 15, 22, 23], logo, o alto teor de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{CaO}$  indicam a potencialidade de propriedades pozolânicas e reforçam a indicação do seu uso em materiais cimentícios [15].

SUN *et al.* [24] avaliaram o potencial de aproveitamento do resíduo de vidro, com percentuais de 10%, 20% e 30%, em substituição parcial ao agregado natural na produção de argamassas. Os resultados mostraram que a incorporação destes resíduos na argamassa resultou na redução da resistência à compressão para todas as faixas de substituição, aos 28 dias, em comparação com a argamassa de referência. A granulometria do vidro gerou à não homogeneidades com a pasta cimentícia. Também, observou-se um aumento na expansão, em razão da reação álcali-silica. O aumento da expansão foi justificado pelos autores em função da reação pozolânica do resíduo de vidro, que tende a gerar géis que expandem a argamassa.

JIANG *et al.* [15] desenvolveram um estudo sobre a influência do pó de vidro residual como material cimentício suplementar. Por meio da análise de amostras contendo frações de 0%, 10%, 20% e 30% de incorporação de partículas de vidro de 18,21 $\mu\text{m}$ , observou-se que a resistência à compressão teve uma redução pouca significativa e menor que 1,8% para a amostra com 20% de incorporação de resíduo de vidro. Além disso,

o resultado de expansão devido à reação álcali-sílica foi menor para todas as amostras, em comparação com as amostras de referência.

Ainda que seja desafiador reduzir as emissões oriundas da produção de cimento, devido à dependência de matérias-primas [13], a redução da demanda por cimento na produção de argamassas e concretos proporciona benefícios sustentáveis e econômicos. Desse modo, é clara a necessidade de produção de materiais sustentáveis na construção civil com a incorporação de resíduos gerados em diversos ramos industriais.

Embora existam estudos na literatura sobre argamassa com incorporação de resíduo de vidro moído, é evidente a escassez de pesquisas voltadas para a utilização de resíduo proveniente do processo de lapidação do vidro (RLV), os quais apresentam taxas significativas de descarte em aterros por não serem reutilizados, o que acarreta em problemas ambientais [12]. Portanto, a presente pesquisa avaliou as propriedades de argamassas com incorporação de resíduo de lapidação de vidro, em substituição parcial ao cimento Portland e ao agregado. Esta pesquisa é de relevância significativa, pois se alinha com metas globais de redução das emissões de CO<sub>2</sub>, do descarte de resíduos em aterros sanitários e da extração de recursos naturais, contribuindo assim para a meta de *Net Zero 2050*. Além disso, apresenta uma investigação abrangente de propriedades importantes para a validação técnica de sua incorporação em argamassas. As argamassas foram caracterizadas quanto às suas propriedades no estado fresco, por meio do ensaio de índice de consistência, e no estado endurecido, por ensaios de massa específica, absorção de água, absorção por capilaridade, retração, resistência à compressão, resistência potencial de aderência à tração e durabilidade.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização das matérias-primas

O aglomerante empregado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), escolhido devido ao seu baixo teor de adições. O agregado miúdo utilizado foi uma areia normal, padronizada e livre de contaminantes que possam interferir nos resultados deste trabalho (NBR 7214 [25]), com quatro frações diferentes: grossa, média grossa, média fina e fina, fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). A água para a mistura da argamassa foi proveniente de sistema de abastecimento público. O resíduo de lapidação de vidro foi fornecido pela Sergipe Vidros LTDA, situada no município de Lagarto-SE, empresa especializada na fabricação de vidros temperados e laminados.

A granulometria do resíduo de lapidação de vidro, que substituiu parcialmente o cimento Portland, foi o passante na peneira de n.º 200 (0,075 mm). Segundo PARGHI e ALAM [23] a finura do resíduo influencia diretamente na melhoria das propriedades físicas e mecânicas das argamassas. Entretanto, o resíduo de lapidação de vidro, que substituiu parcialmente o agregado miúdo, passou pela correção da distribuição granulométrica com limites indicados na Tabela 1 da NBR 7215 [26], que denomina quatro frações com as respectivas aberturas: grossa (2,4 mm e 1,2 mm), média grossa (1,2 mm e 0,6 mm), média fina (0,6 mm e 0,3 mm) e fina (0,3 mm e 0,15 mm).

O RLV foi caracterizado quanto à sua massa específica, de acordo com a NBR 16605 [27], índice de finura, conforme a NBR 11579 [28] e superfície específica, segundo a NBR 16372 [29]. A composição química foi determinada através de medidas semiquantitativas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento no EZScan, do Primini Rigaku, utilizando amostras com massa de 12 g, que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 60 mm e espessura de 5 mm, aproximadamente. A difratometria de raios X (DRX) foi determinada a partir de um difratômetro de raios X Shimadzu 6000, com radiação Cu K $\alpha$ 1 ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) em modo de varredura contínua, em intervalo angular de 5 a 70° (2 $\theta$ ), com velocidade de varredura 2°/min. A identificação das estruturas cristalinas foi realizada com base nos padrões obtidos no banco de dados do *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) e analisados pelo software *Match*, versão Demo.

### 2.2. Preparação das formulações

Para avaliação das propriedades da argamassa foram moldadas sete formulações (Tabela 1), sendo uma de referência (REF), três em substituição parcial do cimento por RLV (RLV5ci, RLV10ci e RLV20ci) e três com substituição parcial da areia por RLV (RLV5ar, RLV10ar e RLV20ar), em 5%, 10% e 20%. O traço adotado foi 1:3 (cimento:areia), com relação água/cimento de 0,48. O traço foi escolhido por ser o mais usual na literatura e prescrito na NBR 7215 [26].

Os procedimentos de dosagem e mistura foram determinados pelo método da NBR 7215 [26]. A preparação das argamassas foi realizada através de um misturador mecânico de eixo vertical (argamassadeira) com capacidade para 5 litros. Foram moldados 252 corpos de prova, 36 para cada formulação, sendo seis para determinação da resistência à compressão, nove para os ensaios de durabilidade, três para determinação da retração, seis para determinação da resistência potencial de aderência à tração, seis para absorção de água e massa específica real e seis para o ensaio de absorção por capilaridade.

**Tabela 1:** Percentuais e consumo dos materiais componentes na mistura.

NOME	MATERIAL SUBSTITUÍDO	RLV (%)	CIMENTO (G)	AREIA (G)	ÁGUA (G)
REF	–	–	624,0	1872,0	300
RLV5ci	Cimento	5	592,8	1872,0	300
RLV10ci	Cimento	10	561,6	1872,0	300
RLV20ci	Cimento	20	499,2	1872,0	300
RLV5ar	Areia	5	624,0	1778,4	300
RLV10ar	Areia	10	624,0	1684,8	300
RLV20ar	Areia	20	624,0	1497,6	300

### 2.3. Ensaios realizados no estado fresco e endurecido

As argamassas foram caracterizadas, no estado fresco, por meio do ensaio de índice de consistência (NBR 13276 [30]), e no estado endurecido, foram realizados os seguintes ensaios: massa específica e absorção de água (NBR 9778 [31]), determinação da absorção por capilaridade (NBR 9779 [32]), retração (NBR 15261 [33]), resistência à compressão (NBR 7215 [26]), resistência potencial de aderência à tração (NBR 13528-2 [34]) e o ensaio de durabilidade (NBR 13583 [35] e NBR 15577-4 [36]). Para os corpos de prova com substituição do cimento pelo RLV (NBR 13583 [35]), foram moldadas barras de argamassas (25 mm × 25 mm × 285 mm) que foram expostas a água saturada com cal e à solução de sulfato de sódio (100,0 g de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> anidro e 800 mL de água, para obter 1,0 L de solução). Para os corpos de prova com substituição da areia pelo RLV (NBR 15577-4 [36]), as barras de argamassa foram expostas a solução de hidróxido de sódio (40,0 g de NaOH p.a. e 900 mL de água, para obter 1,0 L de solução). As idades adotadas no ensaio de durabilidade foram as especificadas nas respectivas normas. As imagens da microestrutura foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um microscópio de marca Jeol, modelo JSM-6510LV.

### 2.4. Tratamento e análise dos dados

Os dados dos ensaios de caracterização das argamassas foram apresentados considerando a média aritmética dos corpos de prova, seguida do desvio padrão. Após os resultados obtidos nos ensaios, verificou-se a normalidade dos dados e, por seguinte, aplicou-se a metodologia de análise de variância (ANOVA), por meio do software *Paleontological Statistics* (PAST), adotando-se uma probabilidade de significância (valor-p) menor que ou igual a 0,05, seguida do teste de Tukey. Assim, as análises são apresentadas na seguinte ordem:

- (a) análise da influência da incorporação do RLV em substituição ao cimento (RLV5ci, RLV10ci e RLV20ci);
- (b) análise da influência da incorporação do RLV em substituição a areia (RLV5ar, RLV10ar e RLV20ar).

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Caracterização das matérias-primas

Os resultados médios obtidos através dos ensaios de caracterização do cimento Portland CP V-ARI estão na Tabela 2. Os valores dos ensaios de caracterização do cimento, atenderam aos requisitos mínimos especificados pela NBR 16697 [37].

Os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização do agregado miúdo estão na Tabela 3 e a curva granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 1. A granulometria dos grãos é de grande importância quanto a coesão das partículas com a pasta e o desempenho das argamassas. Verifica-se, pelo comportamento da curva, que o agregado tem uma distribuição granulométrica bem graduada, com coeficiente de uniformidade (Cu) igual a 7 e coeficiente de curvatura (Cc) igual a 1,5. Quanto ao módulo de finura, a areia analisada encontra-se na zona considerada ótima (2,20 – 2,90), de acordo com a ABNT NBR 7211 [38].

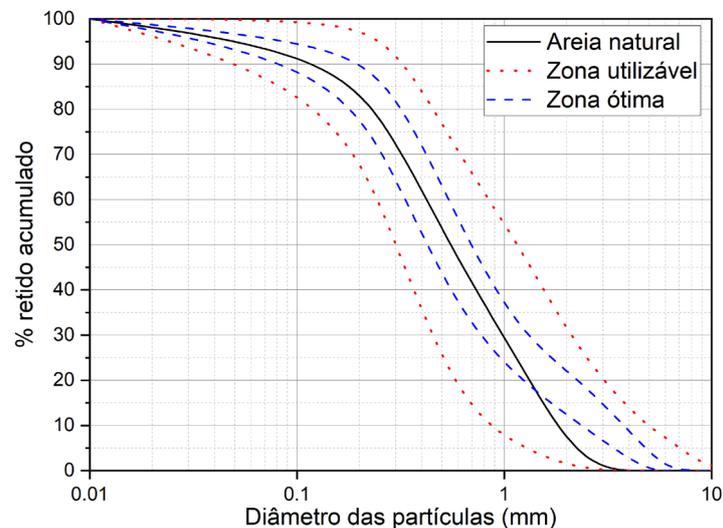
Quando substituído pelo cimento, o índice de finura do RLV foi igual a 0%, devido ao fato de ter sido utilizado o passante na malha de 75 µm. A superfície específica do RLV foi de 4800 cm<sup>2</sup>/g, ou seja, o resíduo é mais fino que o cimento (4186 cm<sup>2</sup>/g), o que contribui para confirmar a discussão realizada nos tópicos de caracterização das argamassas. A massa específica obtida foi de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, o mesmo apresentou-se próximo aos

**Tabela 2:** Resultados dos ensaios de caracterização do cimento Portland.

CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS	REQUISITOS NORMATIVOS
Índice de Finura (%)	1,6	≤6,0
Superfície específica (cm <sup>2</sup> /g)	4186	–
Consistência Normal (% de água)	30,7	–
Início de Pega (min)	170	≥ 60
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,14	–
Expansibilidade <i>Le Chatelier</i> (mm)	3	≤ 5,0
Resistência à compressão (MPa) (1 dia – 3 dias e 7 dias)	18,9 – 30,1 e 35,4	≥ 14 – ≥ 24,0 e ≥ 34,0

**Tabela 3:** Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo.

CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS
Absorção de água (%)	0,2
Módulo de finura	2,36
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,60
Diâmetro máximo (mm)	2,36
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1510
Estado solto	1640
Estado compactado	

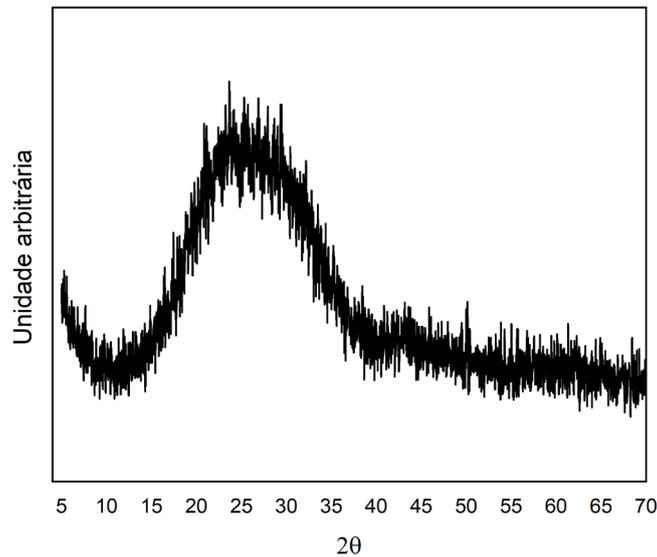

**Figura 1:** Curva granulométrica do agregado miúdo.

resultados encontrados em pesquisas semelhantes [12, 39]. Comparando com os materiais que serão substituídos, o resíduo apresentou massa específica próxima à da areia (2,60 g/cm<sup>3</sup>) e inferior à do cimento (3,14 g/cm<sup>3</sup>).

Na Tabela 4 é apresentada a composição química do RLV. A NBR 12653 [40] determina os parâmetros para um material ser classificado como pozolânico, sendo um dos critérios utilizados para esta classificação, a soma dos percentuais de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que deve ser de no mínimo 70%. O RLV apresentou um total de 77,47%, logo, alcançou uma das exigências normativas. Com base na análise química, verifica-se que os percentuais dos compostos químicos estão correlacionados com os resultados encontrados por outros autores [12, 15, 39, 41, 42].

**Tabela 4:** Composição química (%) do resíduo de lapidação de vidro.

	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	PF
RLV	76,31	13,06	7,21	1,02	0,60	0,60	0,56	0,47	0,14	0,03	0



**Figura 2:** Difratograma do resíduo de lapidação de vidro.

Com relação à análise de difração de raios X (Figura 2), foi possível observar que o RLV está predominantemente no estado amorfo, não foram apresentados picos difratados de elementos e houve um grande halo onde se estendeu-se entre 19,82° e 32,22°. Tal comportamento está coerente aos achados de TRENTIN *et al.* [43] e PAIVA [44] que ao analisar esse material, constatou-se que é de natureza amorfa e observou um halo característico e bastante largo de 18° a 35°, e sem picos de difração definidos.

### 3.2. Caracterização das argamassas produzidas

Na Tabela 5 são apresentados os resultados da ANOVA para todas as propriedades que serão analisadas nas argamassas produzidas. Nota-se que para todas as propriedades estudadas existe uma variação significativa entre as médias das amostras ( $F > F_{\text{crítico}}$  e valor- $p < 0,05$ ). Nos tópicos seguintes estão elencadas quais são essas variações, considerando análise por meio do teste de Tukey.

### 3.3. Caracterização das argamassas no estado fresco

Na Figura 3 são apresentados os resultados médios do índice de consistência obtidos nos ensaios realizados com as argamassas.

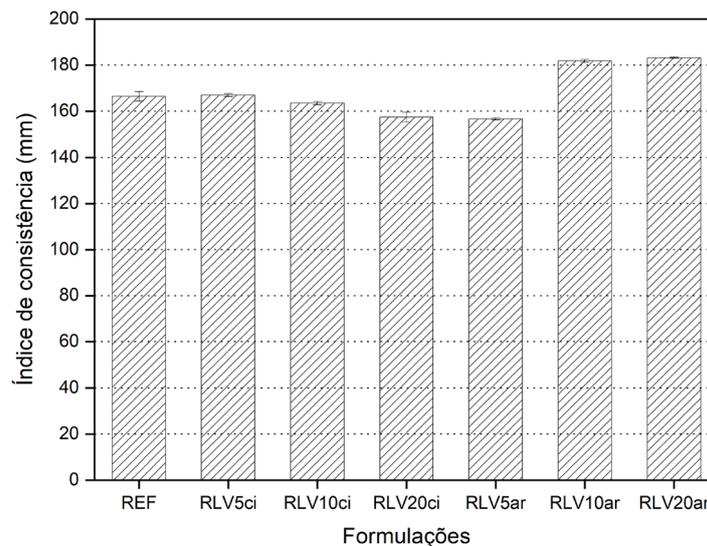
#### 3.3.1. Índice de consistência

(a) Em relação a influência da incorporação do RLV em substituição ao cimento (RLV5ci, RLV10ci e RLV20ci), nota-se que somente a amostra de RLV20ci apresentou diminuição significativa da consistência quando comparada à composição de referência, sendo essa redução de somente 5%. Assim como mencionado por SOLANKI *et al.* [45] o aumento da área superficial do resíduo de vidro demanda uma maior quantidade de água para hidratar o resíduo e, conseqüentemente, reduz a fluidez [9].

YAN *et al.* [46] que observaram que ao adicionar resíduo de pó de vidro em concreto de ultra alto desempenho, em uma proporção de substituição apropriada (até 20%), não prejudicou a trabalhabilidade. As principais razões citadas são: o efeito de diluição do cimento reduz os primeiros produtos de hidratação da pasta cimentícia, e a redução da ponte entre os produtos de hidratação também implica em uma menor resistência ao escoamento; em segundo lugar, a superfície lisa e a baixa absorção de água das partículas de vidro reduzem a resistência ao atrito entre o vidro e a pasta cimentícia.

**Tabela 5:** Resultados da ANOVA.

PROPRIEDADE	F	F <sub>CRÍTICO</sub>	VALOR-P
Índice de consistência (mm)	150,01	3,87	$4,93 \cdot 10^{-7}$
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	75,13	3,69	$1,66 \cdot 10^{-6}$
Absorção de água (%)	4,04	3,49	$3,37 \cdot 10^{-2}$
Absorção de água por capilaridade (%) 3 horas – 6 horas 24 horas – 48 horas – 72 horas	17,56 – 16,29 15,72 – 29,93 – 49,05	2,60 – 2,67 2,45 – 2,43 – 2,45	$5,16 \cdot 10^{-7}$ – $2,17 \cdot 10^{-6}$ $8,10 \cdot 10^{-8}$ – $3,59 \cdot 10^{-11}$ – $1,42 \cdot 10^{-11}$
Retração (mm) 3 dias – 7 dias – 28 dias	27,34 – 13,30 – 32,19	3,0 – 3,0 – 3,0	$2,49 \cdot 10^{-6}$ – $1,1 \cdot 10^{-4}$ – $1,01 \cdot 10^{-6}$
Resistência à compressão (MPa)	29,96	2,49	$2,96 \cdot 10^{-10}$
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	5,57	3,11	$7,71 \cdot 10^{-3}$
Durabilidade – hidróxido de sódio (% de perda de massa) 5 dias – 9 dias – 12 dias 16 dias – 20 dias – 23 dias 26 dias e 30 dias	324,60 – 467,14 – 57,02 126,72 – 287,08 – 157,59 234,25 – 101,06	4,35 – 4,35 – 4,07 4,07 – 4,36 – 4,07 4,07 – 4,07	$7,13 \cdot 10^{-8}$ – $2,01 \cdot 10^{-8}$ – $9,63 \cdot 10^{-6}$ $4,40 \cdot 10^{-7}$ – $1,09 \cdot 10^{-7}$ – $1,87 \cdot 10^{-7}$ $3,93 \cdot 10^{-8}$ – $1,06 \cdot 10^{-6}$



**Figura 3:** Resultados do índice de consistência das argamassas.

(b) Em relação a influência da incorporação do resíduo de lapidação de vidro em substituição a areia (RLV5ar, RLV10ar e RLV20ar), observa-se que todas as amostras com incorporação de RLV mostraram variações significativas quando comparadas à amostra de referência. A formulação RLV5ar apresentou diminuição do índice de consistência de 6%. As formulações RLV10ar e RLV20ar apresentaram aumento de 9% e 10%, respectivamente. Os *fillers* podem aumentar a plasticidade [47]. No entanto, percebeu-se um maior espalhamento, porém menos coeso que o da referência.

OLIVEIRA *et al.* [20] substituíram o agregado natural por resíduo de vidro e perceberam que o teor de água da argamassa diminuiu devido à incorporação de finos de vidro na mistura, em decorrência do efeito *filler*, visto que os vazios entre os agregados que eram preenchidos com água, foram ocupados pelo resíduo de vidro. AZEVEDO *et al.* [48] constataram que quanto maior o nível de incorporação (10, 15 ou 20%) de resíduo de vidro, maior o teor de ar incorporado, o que aumentou a trabalhabilidade da mistura.

### 3.4. Caracterização das argamassas no estado endurecido

#### 3.4.1. Massa específica real

Os resultados médios de massa específica real das argamassas produzidas são apresentados na Figura 4.

(a) Constata-se que o aumento percentual da incorporação de RLV por cimento Portland não resultou em uma variação significativa na massa específica das argamassas com esse tipo de resíduo, quando comparada à amostra de referência. Outros pesquisadores [49] observaram que a massa específica diminuiu em relação à amostra de referência, justificada pela existência de vazios na microestrutura das argamassas produzidas.

(b) Nota-se um aumento de massa específica real com a incorporação parcial de RLV nas amostras em substituição ao agregado, em comparação às amostras de referência. As amostras RLV10ar e RLV20ar apresentaram aumento de massa específica real de 12% e 11%, respectivamente. Esse comportamento está coerente com o estudo de GUEDES FILHO *et al.* [50], onde foi possível observar que esse aumento é devido ao efeito *filler*, pois as partículas do resíduo de vidro ocupam os espaços vazios entre os grãos do agregado miúdo.

Na presente pesquisa, foi observado a densificação da microestrutura, mediante análise da microscopia eletrônica de varredura (ver item 3.4.8.), o que está coerente com os valores encontrados para a massa específica.

#### 3.4.2. Absorção de água

Na Figura 5 estão os resultados médios de absorção de água das argamassas.

(a) Todas as amostras com substituição parcial do cimento por RLV apresentaram diminuição significativa, entre 8% – 17%, de absorção de água quando comparadas à referência. O aumento do teor de resíduo de lapidação de vidro na argamassa gera redução de absorção de água. A amostra RLV20ci mostrou redução significativa de 10%, em relação a RLV5ci, assim como registrado por outros autores [14]. O que pode ser atribuído à baixa capacidade de absorção de água do resíduo de vidro e o preenchimento dos poros por finos de vidro [51]. MATOS e SOUSA-COUTINHO [51] explicam que a reação pozolânica do resíduo de vidro produz o C-S-H secundário, o qual também diminui a porosidade capilar da argamassa e melhora significativamente a interface pasta-agregado.

(b) Verifica-se que o aumento do teor de RLV à mistura em substituição ao agregado gerou redução de absorção de água. As amostras de 10% e 20% apresentaram diminuição significativa de 25% e 15%, respectivamente, em relação ao REF. Assim como, KHAN e SARKER [16] mostraram em sua pesquisa a influência da incorporação parcial e total de resíduos de vidro em argamassas e também observaram que ao aumentar a taxa de substituição do resíduo de vidro em até 100% de substituição do agregado na mistura, a absorção de água diminuiu. Logo, assim como nas substituições pelo cimento, este comportamento é atribuído à baixa capacidade de absorção de água do resíduo de vidro em relação ao agregado natural. Ainda, este fato já foi explicado considerando que a existe uma melhor compactação dos grãos de vidro em relação aos da areia natural [52].

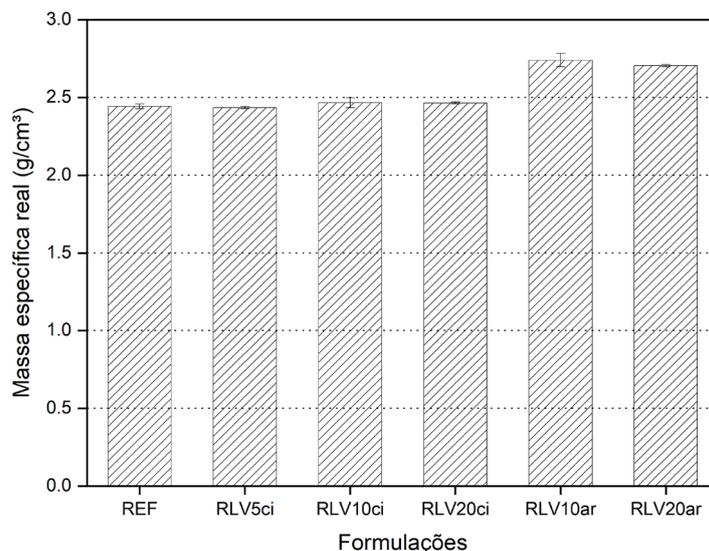


Figura 4: Resultados da massa específica real das argamassas.

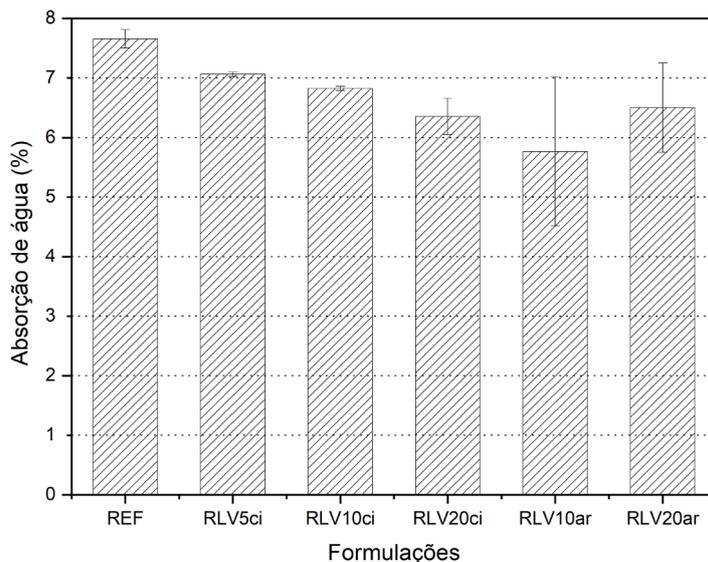


Figura 5: Resultados da absorção de água das argamassas.

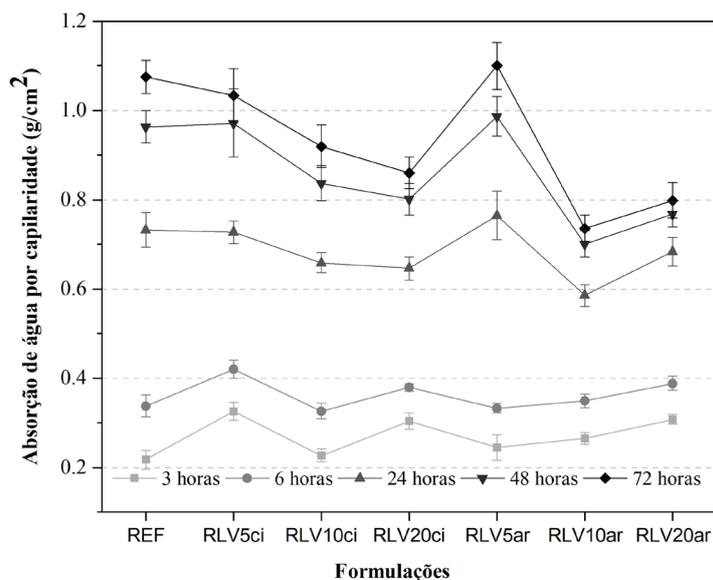


Figura 6: Resultados de absorção por capilaridade das argamassas.

### 3.4.3. Absorção por capilaridade

Na Figura 6 estão os resultados médios de absorção por capilaridade das argamassas.

(a) Verifica-se que a substituição parcial do cimento Portland por resíduo de lapidação de vidro resultou em um aumento significativo de absorção por capilaridade para as amostras de RLV5ci e RLV20ci, até as primeiras 6 horas. Entretanto, a partir de 24 horas tende a diminuir com o aumento do percentual de substituição do cimento Portland. Com 72 horas, todas as amostras com mistura de RLV em substituição parcial ao cimento Portland apresentaram redução de absorção capilar quando comparadas à amostra de referência, evidenciando a RLV10ci e RLV20ci que registraram o maior índice de decréscimo, sendo este de 15% e 20%, respectivamente.

RODIER e SAVASTANO JUNIOR [8] incorporaram resíduo de pó de vidro como substituto parcial do cimento Portland na produção de argamassa e constataram uma diminuição de 18% na absorção de água para as amostras com 10% de substituição do cimento em comparação com as amostras de referência. Este comportamento foi atribuído à diminuição da porosidade das argamassas, pois, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H)

produzido preencheu os poros capilares, conduzindo a uma densificação da microestrutura; conseqüentemente, resultou na redução do volume total de vazios permeáveis e da água absorvida.

(b) A amostra de RLV20ar apresentou aumento significativo de 15% na absorção por capilaridade em relação à amostra de referência até a idade de 6 horas. A partir de 24 horas, as amostras com incorporação de RLV em substituição a areia mostraram redução de absorção por capilaridade, sendo que com 72 horas de ensaio, resultou em um decréscimo de 32% e 26%, respectivamente, para o RLV10ar e RLV20ar, em relação ao REF. Outros pesquisadores [20] constataram que as amostras com 20% do resíduo de vidro, em substituição parcial da areia, reduziram a absorção de água em 51,59% em relação à mistura de referência. Foi possível perceber que os finos de vidro preencheram os vazios da argamassa, diminuindo o tamanho dos poros e ocasionando uma lenta percolação da água no interior da argamassa.

### 3.4.4. Retração

Na Figura 7 estão os resultados médios de variação dimensional de retração realizados com as argamassas.

(a) A diminuição da variação dimensional só foi expressiva aos 28 dias de ensaio. As amostras de 5 – 20% de substituição de cimento, apresentaram redução de 43% a 49%, respectivamente, quando comparadas ao REF. BERNARDO *et al.* [22] observaram que ao utilizar resíduo de vidro, como substituto parcial do cimento, o vidro promoveu uma rede mais rígida, suportando as tensões resultantes que contribui para menores retrações das argamassas. Para LU *et al.* [53], o motivo pode estar relacionado à redução do grau de hidratação do cimento devido ao efeito de diluição. A maior relação água/cimento efetiva resultante da substituição do cimento por RLV resulta em uma menor retração.

(b) Na substituição parcial da areia por RLV, apenas a amostra de RLV10ar demonstrou variação significativa, até aos 7 dias de ensaio. Com 28 dias, somente a formulação com 5% de RLV apresentou redução expressiva de 49% em relação ao REF. KHAN e SARKER [16] em sua pesquisa avaliaram o efeito do resíduo de vidro na retração da argamassa e observaram a redução na retração à medida que aumentavam os percentuais de substituição parcial de vidro por agregados. Portanto, quanto maior a quantidade de incorporação do resíduo de vidro menor é a retração, o que pode ser atribuída à baixa absorção de água do vidro.

YAN *et al.* [46] observaram que quando o pó de resíduos de vidro é finamente moído, ele é disperso de maneira mais uniforme nos poros dos materiais cimentícios, melhorando a compactação do material. E o C-S-H, produzido pela reação pozolânica, preenche os poros, aumentando a dificuldade de migração da umidade no concreto em condições de secagem e, assim, reduzindo a retração no material.

### 3.4.5. Resistência à compressão

Na Figura 8 estão os resultados médios de resistência à compressão, aos 28 dias, obtidos nos ensaios realizados com as argamassas.

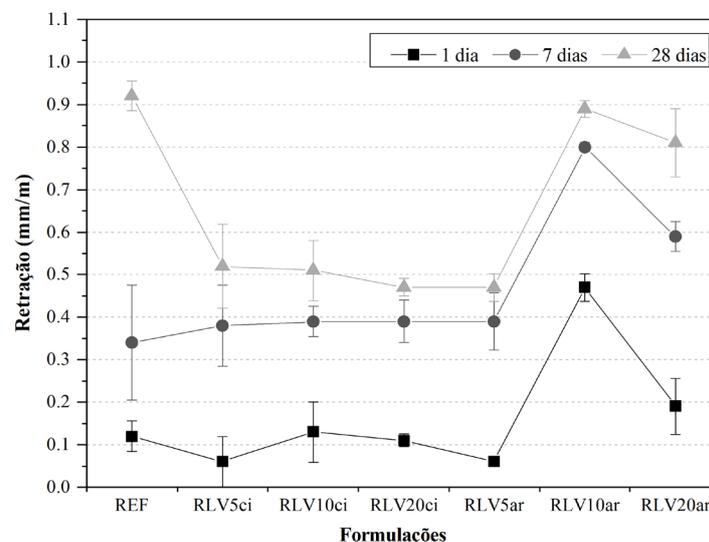
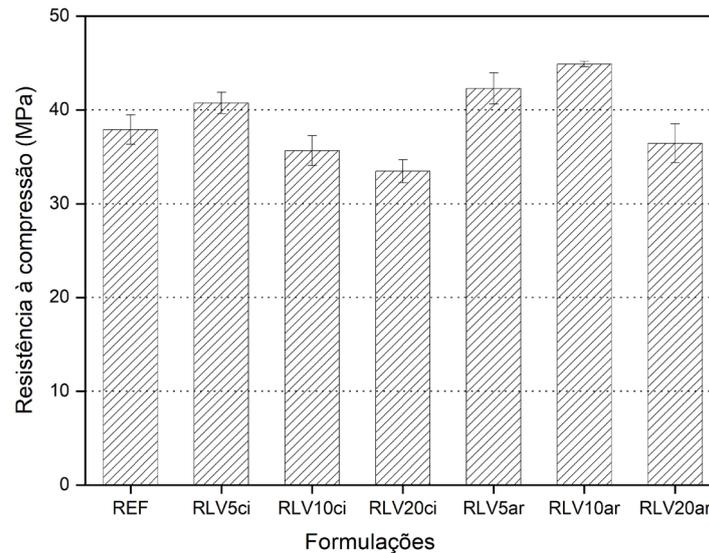


Figura 7: Resultados da retração das argamassas.



**Figura 8:** Resultados da resistência à compressão das argamassas.

(a) Para as amostras com RLV em substituição ao cimento, a diminuição da resistência à compressão só foi significativa para a amostra com 20% de incorporação de resíduo de lapidação de vidro em relação ao REF, sendo essa redução, entre a média, de 12%. A tendência é que o aumento da substituição do cimento por vidro leve a uma diminuição na resistência à compressão [51], em função da redução significativa de cimento, responsável pelo aumento da resistência. NAHI *et al.* [54] substituíram pó de vidro verde em substituição parcial ao cimento e as formulações com 25% de resíduo de vidro reduziram a resistência à compressão em 22%.

Portanto, nesta pesquisa, foi possível substituir até 10% do cimento sem comprometimento da resistência à compressão. Outras pesquisas abordaram que a substituição parcial do cimento em 10% aumenta a resistência à compressão das argamassas, em aproximadamente 11% [8]. Outros autores [55, 56] justificaram este aumento em função de estruturas mais densas das argamassas com resíduo de vidro. Quando o cimento foi substituído pelo resíduo mais fino, os produtos de hidratação secundária, devido à reação pozolânica entre o resíduo mais fino e os íons de cálcio na zona de transição, preencheram os poros e compactaram a matriz cimentícia, resultando assim em um aumento de resistência. Além disso, as imagens do MEV mostraram que as partículas de vidro que não reagiram ainda estavam disponíveis na matriz mesmo aos 90 dias, revelando que as micropartículas de resíduo de vidro poderiam desempenhar o mesmo papel que os microagregados no enchimento da microestrutura das argamassas. Portanto, pode-se inferir que a resistência da argamassa preparada com resíduo de vidro pode ser aumentada devido à reação contínua entre as partículas de vidro e CH remanescente.

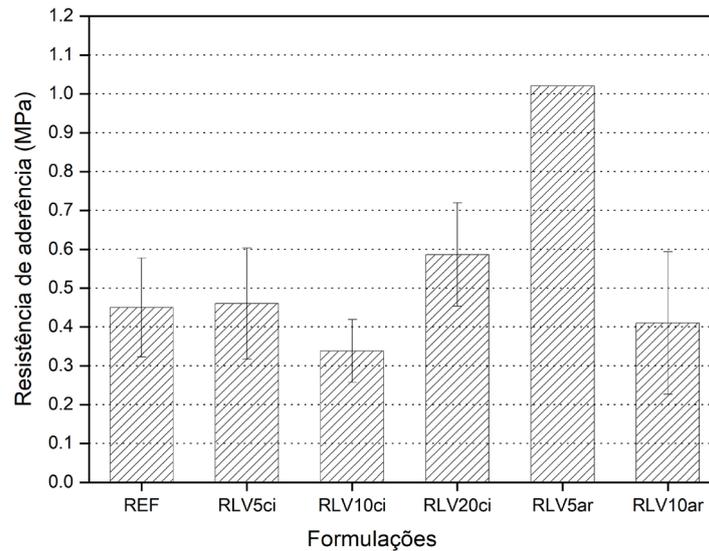
(b) Nota-se aumento de resistência à compressão para as amostras com até 10% de incorporação de resíduo de lapidação de vidro, quando comparadas a de referência. As amostras de 5% e 10% de substituição do agregado quando comparadas com o REF apresentaram aumento expressivo de 13% e 18%, respectivamente. OLIVEIRA *et al.* [20] incorporaram resíduo de vidro em substituição parcial ao agregado miúdo na produção de argamassas e obtiveram um maior desempenho de resistência conforme a incorporação de pó de vidro aumentava. O acréscimo de resistência foi associado ao efeito *filler*, e por um possível efeito pozolânico provocado pelas partículas finas do vidro.

Ressalta-se que foi possível produzir argamassas com incorporação de resíduos com resistência média a partir de 33,5 MPa e argamassas estruturais com incorporação de resíduos, até 20%. O efeito *filler*, com a densificação da microestrutura, o potencial pozolânico do RLV e a redução da absorção e da retração das argamassas contribuíram para esse desempenho.

### 3.4.6. Resistência de aderência à tração

Os resultados médios de resistência potencial de aderência à tração, aos 28 dias, estão representados na Figura 9.

(a) O aumento da incorporação de RLV na mistura da argamassa não provocou influência significativa na resistência potencial de aderência à tração das amostras com substituição do cimento. SAUER [57] incorporou



**Figura 9:** Resultados de resistência potencial de aderência à tração.

resíduos de vidro laminado em substituição parcial ao cimento e notou muita variação nos resultados de todas as amostras, justificada pela variação da espessura da cola e pelas diferentes formas de absorção ao substrato, pois ao aplicar a argamassa, parte da água de amassamento penetra pelos poros do substrato.

(b) A amostra com 5% de substituição da areia resultou em um aumento de 127% quando comparada ao REF. A formulação de RLV10ar não apresentou variação significativa, em relação à composição de referência. Nas amostras com 20% ocorreu o deslocamento da argamassa do substrato. Tal comportamento foi coerente com os achados de OLIVEIRA *et al.* [20] onde analisaram a influência da incorporação de agregados finos de vidro na resistência de aderência à tração e constataram que a incorporação de resíduo de vidro resulta no aumento de materiais finos, que o contribui para reduzir a sucção da água de amassamento e, conseqüentemente, para uma melhor aderência da argamassa no substrato.

Portanto, todas as amostras apresentaram resistência potencial de aderência à tração superior ao mínimo de 0,3 MPa, estabelecido pela NBR 13749 [58]. A forma de ruptura mais recorrente no ensaio foi a ruptura na argamassa seguida de ruptura na interface chapisco/argamassa, especificadas conforme a NBR 13528-2 [34].

### 3.4.7. Durabilidade

Na Figura 10 são apresentados os resultados de perda de massa devido a resistência ao sulfato de sódio das argamassas com substituição do cimento Portland por RLV.

(a) Verificou-se diminuição significativa nos resultados de perda de massa das argamassas com RLV em substituição ao cimento. Na idade de 14 dias, as amostras com 5%, 10% e 20% apresentaram redução significativa de 128%, 103% e 123%, respectivamente, de perda de massa em relação a REF. Já aos 42 dias, os corpos de prova RLV5ci, RLV10ci e RLV20ci, apresentaram diminuição de 98%, 110% e 89%, respectivamente, em relação ao REF. SIAD *et al.* [59] analisaram a influência do efeito do pó de vidro na durabilidade ao ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) em argamassa com substituição parcial ao cimento e registraram redução na massa de todas as amostras, sendo a amostra de referência com a maior perda de massa e a amostra com 45% de substituição de pó de vidro com a menor. A menor perda de massa das amostras com percentuais de vidro pode ser entendida pela redução do consumo de hidróxido de cálcio na reação pozolânica do vidro.

RODIER e SAVASTANO JUNIOR [8] constataram que o teor de hidróxido de cálcio diminui com o percentual de substituição do cimento por resíduo de vidro durante todo o tempo de cura. De acordo com os resultados obtidos, o resíduo de pó de vidro pode ser utilizado como substituição parcial em até 10%, em massa, para melhorar a durabilidade de materiais cimentícios. O resíduo de vidro melhora a resistência ao sulfato sem comprometer a resistência. Portanto, este material residual pode aumentar a durabilidade e contribuir ainda mais para a sustentabilidade na construção [51].

Na Figura 11 estão os resultados de perda de massa das amostras em substituição parcial da areia pelo resíduo.

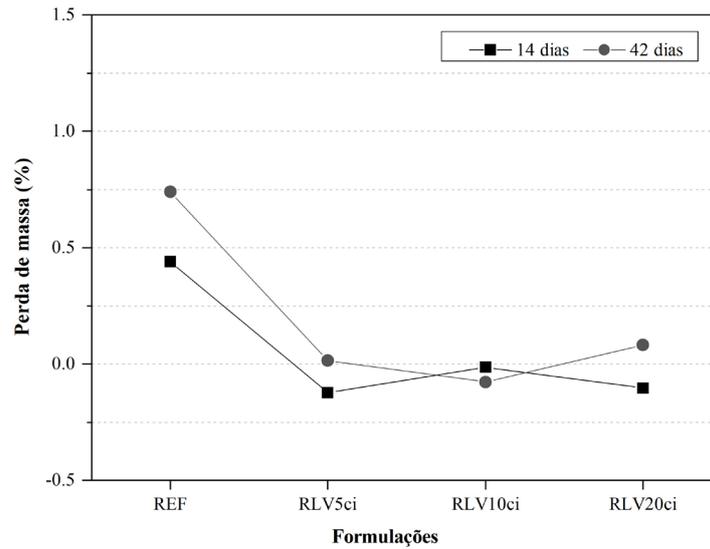


Figura 10: Resultados de perda de massa das argamassas submetidas ao sulfato de sódio.

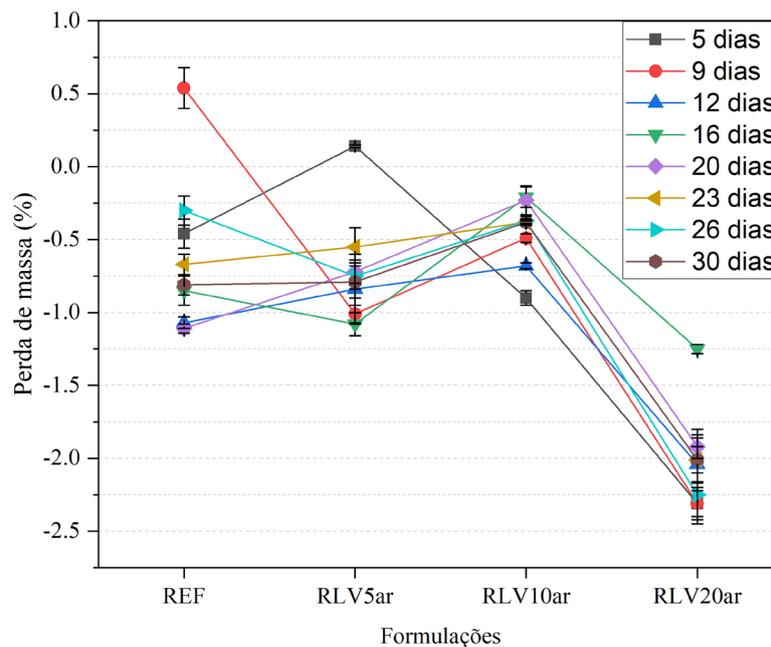
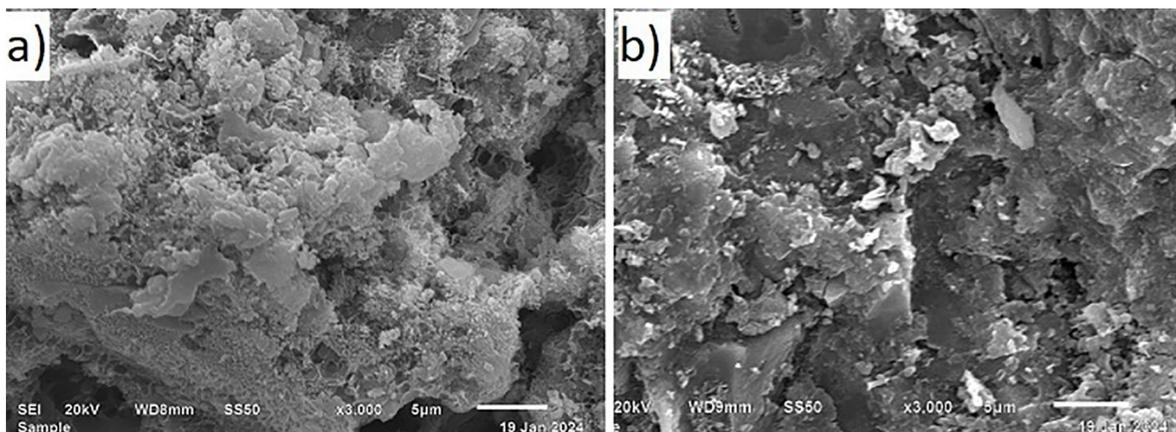


Figura 11: Resultados de perda de massa das argamassas submetidas ao hidróxido de sódio.

(b) O aumento do teor de RLV em substituição da areia proporcionou variação significativa nos resultados de perda de massa das argamassas em todas as idades. Aos 30 dias, as amostras com 5% apresentaram valores semelhantes ao REF. Já RLV10ar, ao fim do ensaio, registrou comportamento superior à referência, sendo a melhor formulação com a menor perda de massa. As amostras com 20% apresentaram perda de massa expressiva em todas as idades.

LU *et al.* [53] utilizaram pó de vidro para melhorar a durabilidade de argamassas preparadas com agregados de vidro e notaram que o vidro melhorou efetivamente a resistência das argamassas ao ataque do ácido sulfúrico; quanto mais finas as partículas do resíduo utilizadas, mais significativas foram as melhorias. As considerações apresentadas para explicar os efeitos benéficos do resíduo na resistência aos ácidos,



**Figura 12:** Microscopia eletrônica de varredura de amostra (a) sem resíduo e (b) com RLV.

foram: (i) a reação pozolânica do resíduo de vidro poderia consumir grande quantidade de hidróxido de cálcio, que geralmente é o produto de hidratação do cimento mais vulnerável em relação ao ataque por ácido. Além disso, a formação adicional de C-S-H permitiu melhor resistência ao ácido sulfúrico; (ii) a redução do teor de hidróxido de cálcio e da fase aluminato devido ao efeito de diluição reduziu a quantidade de formação de gesso e etringita, mitigando assim o desenvolvimento de pressão expansiva.

Ressalta-se que a redução do ataque agressivo nas estruturas resulta em uma diminuição dos custos com manutenção e reparos dessas edificações.

#### 3.4.8. Análise da microestrutura

Na Figura 12 são apresentadas as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de (a) uma amostra de referência (sem resíduos) e (b) outra com RLV. Na Figura 12b, são observados aglomerados típicos de densificação. Ou seja, a adição de resíduo de vidro melhorou a microestrutura das amostras, formando uma microestrutura densa. Outros autores [46] mencionam que isto pode ser atribuído ao resíduo de vidro, que apresenta boa atividade pozolânica, consumindo alguns cristais de CH através de reações de hidratação secundária e formando gel C-S-H adicional para preencher os poros da microestrutura. Também, pode-se atribuir ao encapsulamento de sítios de nucleação. Sendo o resíduo de vidro muito mais fino que o agregado miúdo, as partículas podem preencher os vazios entre os agregados e, assim, refinar a estrutura dos poros. As mudanças na microestrutura das argamassas correspondem ao desenvolvimento das propriedades mencionadas e discutidas anteriormente.

## 4. CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou uma investigação abrangente das propriedades de argamassas com incorporação de resíduo de lapidação de vidro, em substituição parcial ao cimento Portland e ao agregado. Uma sequência de considerações será elencada:

- A incorporação de resíduo de lapidação de vidro em substituição ao cimento e ao agregado influenciou no índice de consistência.
- Somente a massa específica real das argamassas contendo RLV em substituição da areia apresentou aumento, a partir de 10% de substituição.
- Em relação à absorção de água foi observada uma redução gradual com a substituição do cimento e o agregado pelo RLV.
- Quanto à retração, houve diminuição de retração aos 28 dias de ensaio, para todas as amostras de substituição do cimento e para a amostra de RLV5ar.
- Para os resultados de resistência à compressão, observou-se que até 10% de RLV, em substituição ao cimento, não há comprometimento desta propriedade, e há aumento relativo de resistência em substituição à areia.
- Na resistência potencial de aderência à tração, observou-se que a incorporação de RLV não influenciou significativamente, mas foi notado um aumento para o percentual de 5% de incorporação de RLV em substituição à areia.
- Já para a durabilidade, houve uma melhoria nesta propriedade com incorporação do RLV. A adição de resíduo de vidro resultou em uma microestrutura densa para as argamassas.

Logo, foi possível produzir um material sustentável para construção civil, comprovando a viabilidade técnica da utilização de resíduo de lapidação de vidro como substituto parcial ao cimento Portland e ao agregado em argamassas. Além disso, que atende aos princípios do desenvolvimento sustentável, os quais apresentam alternativas capazes de contribuir para a economia de energia e recursos naturais, dentre elas a redução da destinação de resíduos para aterros, extração de recursos naturais e emissões de CO<sub>2</sub>.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Sergipe (IFS), por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI). Aos laboratórios do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CUM/CCT/UEDESC), Laboratório da Universidade Federal de Sergipe, Centro Multiusuário de Nanotecnologia (CMNano) e da Empresa Mizu Cimentos Especiais, bem como à empresa SERGIPE VIDROS, pela doação do resíduo utilizado.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] MOUSAVI, S.R., AFSHOON, I., BAYATPUR, M.A., *et al.*, “Effect of waste glass and curing aging on fracture toughness of self-compacting mortars using ENDB specimen”, *Construction & Building Materials*, v. 282, e122711, Fev. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122711>.
- [2] DUAN, H., LI, J., “Construction and demolition waste management: China’s lessons”, *Waste Management & Research*, v. 34, n. 5, pp. 397–398, Maio. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X16647603>. PubMed PMID: 27178091.
- [3] GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION, <https://gccassociation.org/our-story-cement-and-concrete/>, acessado em janeiro de 2024.
- [4] LIU, G., FLOREA, M.V., BROUWERS, H.J., “Characterization and performance of high volume recycled waste glass and ground granulated blast furnace slag or fly ash blended mortars”, *Journal of Cleaner Production*, v. 235, pp. 461–472, Out. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.334>.
- [5] PATIL, S.S., PATIL, Y.D., “Effect of high temperature on the strength of mortar containing glass as a supplementary cementitious material: an experimental study”, *Materials Today: Proceedings*, v. 65, pp. 1511–1515, Maio. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.496>.
- [6] HUNTZINGER, D.N., EATMON, T.D., “A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies”, *Journal of Cleaner Production*, v. 17, n. 7, pp. 668–675, Maio. 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>.
- [7] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, <https://www.iea.org/energy-system/buildings>, acessado em janeiro de 2024.
- [8] RODIER, L., SAVASTANO JUNIOR, H., “Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials”, *Journal of Cleaner Production*, v. 184, pp. 333–341, Maio. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.269>.
- [9] LI, Q., QIAO, H., LI, A., *et al.*, “Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar”, *Construction & Building Materials*, v. 324, p. 126531, Mar. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126531>.
- [10] CARVALHO, A.R., CALDERÓN-MORALES, B.R.S., BORBA JÚNIOR, J.C., *et al.*, “Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore tailings with phosphoric acid”, *Construction & Building Materials*, v. 403, pp. 133078, Nov. 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133078>.
- [11] HAMZAH, H.K., HUSEIEN, G.F., ASAAD, M.A., *et al.*, “Effect of waste glass bottles-derived nano-powder as slag replacement on mortars with alkali activation: durability characteristics”, *Construction & Building Materials*, v. 15, e00775, Dez. 2021.
- [12] KIM, J., YI, C., ZI, G., “Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar”, *Construction & Building Materials*, v. 75, pp. 242–246, Jan. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.007>.
- [13] LOPES, C.M.N., MENDES, V.F., GARCIA, D.R., *et al.*, “Residues in cement-based composites: occurrence mapping in Brazil”, *Case Studies in Construction Materials*, v. 18, e01763, Jul. 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01763>.
- [14] GUPTA, J., JETHOO, A.S., RAMANA, P.V., “Valorization of soda lime glass in cement sand matrix”, *Materials Today: Proceedings*, v. 49, pp. 1230–1238, Jun. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.295>.

- [15] JIANG, X., XIAO, R., BAI, Y., *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, pp. 130778, Mar. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130778>.
- [16] KHAN, M.N.N., SARKER, P.K., “Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar”, *Construction & Building Materials*, v. 263, pp. 120177, Dez. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120177>.
- [17] HOU, S., DUAN, Z., MA, Z., *et al.*, “Improvement on the properties of waste glass mortar with nanomaterials”, *Construction & Building Materials*, v. 254, pp. 118973, Set. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118973>.
- [18] SACCANI, A., MANZI, S., LANCELLOTTI, I., *et al.*, “Manufacturing and durability of alkali activated mortars containing different types of glass waste as aggregates valorisation”, *Construction & Building Materials*, v. 237, pp. 117733, Mar. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117733>.
- [19] YANG, S., LU, J., POON, C.S., “Recycling of waste glass in cement mortars: Mechanical properties under high temperature loading”, *Resources, Conservation and Recycling*, v. 174, pp. 105831, Nov. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105831>.
- [20] OLIVEIRA, R., BRITO, J., VEIGA, M.R., “Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidro: efeito de filler”, In: *Conferência Construção FCTUC*, Coimbra, Portugal, 2012.
- [21] AFSHINNIA, K., RANGARAJU, P.R., “Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars”, *Construction & Building Materials*, v. 81, pp. 257–267, Abr. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041>.
- [22] BERNARDO, E., ELSAYED, H., MAZZI, A., *et al.*, “Double-life sustainable construction materials from alkali activation of volcanic ash/discarded glass mixture”, *Construction & Building Materials*, v. 359, pp. 129540, Dez. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129540>.
- [23] PARGHI, A., ALAM, M.S., “Shariah. Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR)”, *Construction & Building Materials*, v. 104, pp. 34–43, Fev. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.006>.
- [24] SUN, J., YUE, L., XU, K., *et al.*, “Multi-objective optimisation for mortar containing activated waste glass powder”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 18, pp. 1391–1411, Jun. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.123>.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Areia Normal para Ensaio de Cimento – Especificação*, ABNT NBR 7214, Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*, ABNT NBR 7215, Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Massa Específica*, ABNT NBR 16605, Rio de Janeiro, ABNT, 2017.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland – Determinação do Índice de Finura por Meio da Peneira 75 µm (n 200)*, ABNT NBR 11579, Rio de Janeiro, ABNT, 2013.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine)*, ABNT NBR 16372, Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação do Índice de Consistência*, ABNT NBR 13276, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica*, ABNT NBR 9778, Rio de Janeiro, ABNT, 2009.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Capilaridade*, ABNT NBR 9779, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Argamassa para Amassamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação da Variação Dimensional (Retração ou Expansão Linear)*, ABNT NBR 15261, Rio de Janeiro, ABNT, 2005.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Revestimento de Paredes de Argamassas Inorgânicas – Determinação da Resistência de Aderência à Tração – Parte 2: Aderência ao Substrato*, ABNT NBR 13528-2, Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland – Determinação da Variação Dimensional de Barras de Argamassas de Cimento Portland Expostas à Solução de Sulfato de Sódio*, ABNT NBR 13583, Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Agregados – Reatividade Álcali-Agregado Parte 4: Determinação da Expansão em Barras de Argamassas Pelo Método Acelerado*, ABNT NBR 15577-4, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Cimento Portland: Requisitos*, ABNT NBR 16697, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Agregados para Concreto – Especificações*, ABNT NBR 7211, Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- [39] YIN, W., LI, X., SUN T., *et al.*, “Utilization of waste glass powder as partial replacement of cement for the cementitious grouts with superplasticizer and viscosity modifying agent binary mixtures: Rheological and mechanical performances”, *Construction & Building Materials*, v. 286, pp. 122953, Jun. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122953>.
- [40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Materiais Pozolânicos – Requisitos*, ABNT NBR 12653, Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [41] OLIVEIRA, H.A., SANTOS, C.P., OLIVEIRA, R.M.P.B., *et al.*, “Produção de agregado sintético de argila com reaproveitamento de resíduo de vidro”, *Matéria*, v. 24, n. 1, e12318, Out. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0653>.
- [42] ZACCARON, A., FRIZZO, R.G., ZANONI, E.T., *et al.*, “Efeito da adição de resíduo de vidro em massa de cerâmica de alvenaria”, *Matéria*, v. 24, n. 4, e12496, Maio. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0821>.
- [43] TRENTIN, P.O., MANICA, J., VANZETTO, S.C., *et al.*, “Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa”, *Matéria*, v. 25, n. 1, e12576, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0903>.
- [44] PAIVA, O.A., “*Resíduo industrial de vidro moído em argamassas de cimento Portland*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.
- [45] SOLANKI, P., BIERMA, T., JIN, G., “Properties of flowable fill produced by substituting fly ash with recycled glass powder”, *Construction & Building Materials*, v. 265, pp. 120330, Dez. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120330>.
- [46] YAN, P., CHEN, B., ZHU, M., *et al.*, “Study on mechanical properties and microstructure of green ultra-high performance concrete prepared by recycling waste glass powder”, *Journal of Building Engineering*, v. 82, pp. 108206, Abr. 2024. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108206>.
- [47] CARVALHO, A.R., SILVA JÚNIOR, G., FONTES, W.C., *et al.*, “Influência do efeito filer do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados”, *Ambiente Construído*, v. 23, n. 4, pp. 217–239, Oct/Dec. 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000400700>.
- [48] AZEVEDO, A.R.G., ALEXANDRE, J., ZANELATO, E.B., *et al.*, “Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar”, *Construction & Building Materials*, v. 148, pp. 359–368, Set. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.208>.
- [49] ALVARENGA, C.B.C.S., MAXIMO, O.H., CASSIMIRO, I., *et al.*, “Influence the use of glass sludge on the thermal diffusivity of structural mortars using thermography”, *Matéria*, v. 25, n. 4, e12880, Jun. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1180>.
- [50] GUEDES FILHO, J.F., ALMEIDA, J.E.D., SOUZA, M.C.R., *et al.*, “Avaliação das propriedades de argamassa com substituição parcial do agregado por resíduo de vidro”, In: *Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências (CONASPESEC)*, Paraíba, 2019.

- [51] MATOS, A.M., SOUSA-COUTINHO, J., “Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement”, *Construction & Building Materials*, v. 36, pp. 205–215, Nov. 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>.
- [52] FLORES-ALÉS, V., JIMÉNEZ-BAYARRI, V., PÉREZ-FARGALLO, A., “Influencia de la incorporación de vidrio triturado en las propiedades y el comportamiento a alta temperatura de morteros de cemento”, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, v. 57, n. 6, pp. 257–265, Nov-Dez. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.03.001>.
- [53] LU, J., ZHAN, B., DUAN, Z., *et al.*, “Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates”, *Materials & Design*, v. 135, pp. 102–111, Dez. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.016>.
- [54] NAHI, S., LEKLOU, N., KHELIDJ, A., *et al.*, “Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder”, *Construction & Building Materials*, v. 262, pp. 120875, Nov. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120875>.
- [55] LU, J., DUAN, Z., POON, C.S., “Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar”, *Cement and Concrete Composites*, v. 82, pp. 34–44, Set. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.011>.
- [56] LAM, W.L., CAI, Y., SUN, K., *et al.*, “Roles of ultra-fine waste glass powder in early hydration of Portland cement: Hydration kinetics, mechanical performance, and microstructure”, *Construction & Building Materials*, v. 415, pp. 135042, Fev. 2024. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135042>.
- [57] SAUER, A.S., “*Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.
- [58] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Revestimento de Paredes e Tetos de Argamassas Inorgânicas – Especificação*, ABNT NBR 13749, Rio de Janeiro, ABNT, 2013.
- [59] SIAD, H., LACHEMI, M., SAHMARAN, M., *et al.*, “Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials”, *Construction & Building Materials*, v. 113, pp. 163–173, Jun. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.049>.