



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

DANIELY CAVALCANTI MULITERNO DAS NEVES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
ARGAMASSAS PARA CONCRETO PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE
VIDRO**

Recife, PE

2022



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

DANIELY CAVALCANTI MULITERNO DAS NEVES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
ARGAMASSAS PARA CONCRETO PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE
VIDRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Recife, PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

N511a Neves, Daniely Cavalcanti Muliterno das
Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para concreto produzidas com resíduo de vidro. / Daniely Cavalcanti Muliterno das Neves. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2022.

93 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

1. Resíduo de Vidro. 2. Agregados Reciclados. 3. Argamassa. 4. Concreto. I. Engenharia Civil - Dissertação. II. Monteiro, Eliana Cristina Barreto (orient.). III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD: 690.028

DANIELY CAVALCANTI MULITERNO DAS NEVES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
ARGAMASSAS PARA CONCRETO PRODUZIDAS COM
RESÍDUO DE VIDRO**

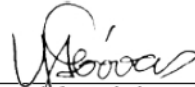
BANCA EXAMINADORA:

Orientadora:



Prof. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade de Pernambuco

Examinadores:



Prof. Dra. Yeda Vieira Póvoas
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco

Recife, PE

2022

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por toda dedicação que sempre tiveram por mim.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo constante incentivo e apoio para que eu me tornasse a melhor profissional que eu pudesse ser.

À minha mãe, por ser meu porto seguro durante os momentos difíceis, sempre fazendo o possível para me ajudar. Sem o seu cuidado e carinho, não teria chegado aqui.

Aos meus irmãos, que tem papel fundamental na minha formação pessoal e acadêmica.

À Professora Eliana, pela orientação, compreensão e paciência e pelo apoio e constante estímulo transmitido durante o período de mestrado. É uma honra me espelhar na senhora.

Aos professores Yeda Póvoas e Romilde Almeida, que muito contribuíram com sugestões e incentivos desde à qualificação até a defesa, sempre dispostos a agregar seus vastos conhecimentos à minha pesquisa.

A Adegilson, amigo fiel durante a graduação e mestrado, que dividiu comigo as dores e as glórias de ser pesquisador.

A Carlos, que em pouco tempo de convivência em laboratório se tornou um grande amigo e por quem tenho grande admiração pela sagacidade, resiliência e altruísmo.

A Carol, por tornar meus dias mais leves e estar sempre disposta a me ajudar mesmo de longe.

A Bárbara, pela parceria de domingo a domingo e pelo suporte em todas as áreas da minha vida.

À Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, casa em que tive o privilégio de me tornar uma profissional, inspirada pelos grandes mestres que a compõem, e para onde retornei com o intuito de ampliar minhas experiências profissionais e pessoais.

À UPE, entidade do Governo do Estado de Pernambuco voltada para o fomento ao Ensino, Pesquisa e a Extensão.

À CAPES, pelo fomento à pesquisa.

À Universo Empreendimentos por fornecer o resíduo para a elaboração da pesquisa.

Ao Professor Antônio Acácio e ao Doutorando Victor, do Labtag-UFPE, pelo auxílio no ensaio de DRX.

Aos amigos e a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

“Que nada nos limite, que nada nos defina, que nada nos sujeite. Que a liberdade seja nossa própria substância, já que viver é ser livre.”

Simone de Beauvoir

RESUMO

Com o impacto ecológico resultante da construção civil, é de suma importância a busca por materiais alternativos para a confecção de compósitos cimentícios. O resíduo de vidro (RV) surge como uma opção de substituição na composição de matrizes cimentícias segundo diversos estudos da área. Os estudos apresentados comprovam a possibilidade de obtenção de materiais com propriedades equivalentes às especificadas em norma, apresentando então uma vantagem técnica. Há indícios de que a utilização de resíduo de vidro em compósitos cimentícios é viável quando se leva em conta os benefícios sociais, ambientais e econômicos que a prática agrega à construção. Esta pesquisa tem como objetivo principal a análise da influência da adição de resíduo de vidro em substituição parcial do agregado miúdo em argamassas de cimento Portland, visando a produção de concreto. Para atingir esse objetivo, foram moldados corpos de prova cilíndricos de Ø 5 x 10 cm com substituição parcial da areia em 0%, 5%, 15% e 25%. Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados, como massa unitária, índice de volume de vazios, massa específica, absorção de água, composição granulométrica, módulo de finura e espectrometria de fluorescência e de difração de raios X, e ensaios de caracterização das argamassas nos estados fresco e endurecido, como determinação do índice de consistência, densidade de massa, resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, absorção por imersão e capilaridade e carbonatação das argamassas. Identificou-se que o resíduo de vidro tem granulometria similar a da areia e tem em sua composição 72,72% de sílica. Quanto à consistência, verificou-se que quanto mais resíduo é adicionado, mais trabalhável fica o material. Quanto à densidade de massa, de modo geral há redução conforme o teor de resíduo aumenta. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração demonstram que as argamassas preparadas com a dosagem indicada não podem ser utilizadas para fins estruturais, pois não atingiu a resistência mínima de 20 MPa. O decréscimo máximo de 21,20% aos 28 dias e 31,98% aos 91 dias na resistência à compressão está relacionado à baixa atividade pozolânica nas primeiras idades da argamassa e também por conta da textura lisa e formato do grão do resíduo de vidro. Em relação aos ensaios de absorção por imersão e índice de vazios não notou-se grandes variações nos resultados, já para a absorção por capilaridade houve uma variação maior entre 3% a 21% aos 28 dias 2% a 13% aos 91 dias. Quando a profundidade de carbonatação, é possível notar um aumento da área carbonatada conforme o teor de resíduo também aumenta. De modo geral, conclui-se que a substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro apresenta vantagens técnicas e ecológicas até a proporção de 15%, ainda que sejam necessários mais estudos para atingir a proporção ideal de substituição que garanta o melhor benefício em todas as propriedades.

Palavras-chave: Resíduo de vidro. Agregados reciclados. Argamassa. Concreto.

ABSTRACT

With the ecological impact resulting from civil construction, the search for alternative materials for the manufacture of cement composites is of paramount importance. Glass waste (GW) appears as a replacement option in the composition of cementitious matrices according to several studies in the area. The studies presented prove the possibility of obtaining materials with properties equivalent to those specified in the standards, thus presenting a technical advantage. There are indications that the use of waste glass in cementitious composites is viable when taking into account the social, environmental and economic benefits that the practice adds to construction. This research aims to analyse the influence of the addition of waste glass in partial replacement of the fine aggregate in Portland cement mortars, aiming at the production of concrete. To achieve this objective, Ø 5 x 10 cm cylindrical specimens were molded with partial replacement of the sand at 0%, 5%, 15% and 25%. Characterization tests of the aggregates were carried out, such as unit mass, void volume index, specific mass, water absorption, granulometric composition, fineness modulus and fluorescence and X-ray diffraction spectrometry, and characterization tests of the mortars in fresh and hardened states, such as determination of consistency index, mass density, resistance to axial compression and tensile strength by diametrical compression, absorption by immersion and capillarity and carbonation of the mortars. It was identified that the glass residue has a granulometry similar to that of sand and has 72.72% silica in its composition. As for consistency, it was found that the more residue is added, the more workable the material. As for the mass density, in general there is a reduction as the residue content increases. The results of the tests of compressive strength and tensile strength demonstrate that the mortars prepared with the indicated dosage cannot be used for structural purposes, as it did not reach the minimum strength of 20 MPa for compressive strength. The maximum decrease of 21.20% at 28 days and 31.98% at 91 days in compressive strength is related to the low pozzolanic activity in the early ages of the mortar and also due to the smooth texture and grain shape of the glass residue. Regarding the tests of absorption by immersion and void index, great variations were not noticed in the results. For the absorption by capillarity test there was a greater variation between 3% to 21% at 28 days and 2% to 13% at 91 days. As for carbonation depth, it is possible to notice an increase in the carbonated area as the residue content also increases. In general, it is concluded that the partial replacement of the fine aggregate by glass waste presents technical and ecological advantages up to the proportion of 15%, although more studies are needed to reach the ideal replacement proportion that guarantees the best benefit in all the properties.

Keywords: Glass waste. Recycled aggregates. Mortar. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Critérios de seleção para artigos pela metodologia PRISMA	18
Figura 2 - Difratoograma do resíduo de vidro	21
Figura 3 - Resultados de resistência à compressão	25
Figura 4 - Eletromicrografia de argamassas com 10% e 20% de resíduo de vidro	29
Figura 5 - Resíduo de vidro triturado	30
Figura 6 - Corpos de prova após moldagem.....	34
Figura 7 - Corpos de prova identificados após desmoldagem.....	35
Figura 8 - Ensaio para determinação do índice de consistência	36
Figura 9 - Retificação dos corpos de prova	37
Figura 10 - Corpo de prova preparado para o ensaio de resistência à compressão	38
Figura 11 - Corpo de prova preparado para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral	38
Figura 12 - Corpos de prova durante ensaio de absorção por imersão.....	39
Figura 13 - Corpos de prova durante ensaio de absorção por capilaridade.....	40
Figura 14 - Câmara de carbonatação	41
Figura 15 - Corpos de prova rompidos aspergidos com a solução de fenolftaleína.....	42
Figura 16 - Curva granulométrica do resíduo de vidro	45
Figura 17 - Composição granulométrica do resíduo de vidro	45
Figura 18 - Difratoograma do resíduo de vidro	46
Figura 19 - Curva granulométrica da areia.....	47
Figura 20 - Ensaio de índice de consistência.....	48
Figura 21 - Índice de consistência	49
Figura 22 - Densidade de massa.....	50
Figura 23 - Resistência à compressão.....	53
Figura 24 - Resistência à tração por compressão diametral	55
Figura 25 - Absorção de água por imersão	58
Figura 26 - Índice de vazios aos 28 e 91 dias	60
Figura 27 - Absorção de água por capilaridade aos 28 e 91 dias	62
Figura 28 - Profundidade carbonatada.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da literatura sobre propriedades físicas no estado fresco	26
Tabela 2 - Dados da literatura sobre propriedades físicas no estado endurecido	27
Tabela 3 - Dados da literatura sobre propriedades mecânicas das argamassas com RV.....	28
Tabela 4 - Proporções da dosagem	33
Tabela 5 - Quantitativo de corpos de prova moldados	34
Tabela 6 - Caracterização do resíduo de vidro	44
Tabela 7 - Composição granulométrica do resíduo de vidro.....	44
Tabela 8 - Análise química semiquantitativa do RV.....	46
Tabela 9 - Composição granulométrica da areia	47
Tabela 10 - Caracterização da areia.....	48
Tabela 11 - Densidade de massa.....	49
Tabela 12 - Análise de variância da densidade de massa	50
Tabela 13 - Resistência à compressão aos 7 dias	50
Tabela 14 - Análise de variância da resistência à compressão aos 7 dias	51
Tabela 15 - Resistência à compressão aos 28 dias	51
Tabela 16 - Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias	51
Tabela 17 - Resistência à compressão aos 91 dias	52
Tabela 18 - Análise de variância da resistência à compressão aos 91 dias	52
Tabela 19 - Resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias	53
Tabela 20 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias	54
Tabela 21 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias	54
Tabela 22 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias	54
Tabela 23 - Resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias	55
Tabela 24 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias	55
Tabela 25 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 dias	56
Tabela 26 - Análise de variância da absorção por imersão aos 28 dias para 72 horas	56
Tabela 27 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 91 dias	57
Tabela 28 - Análise de variância da absorção por imersão aos 91 dias para 72 horas	57
Tabela 29 - Índice de vazios aos 28 dias	58
Tabela 30 - Análise de variância do índice de vazios aos 28 dias (%).....	59

Tabela 31 - Índice de vazios aos 91 dias	59
Tabela 32 - Análise de variância do índice de vazios aos 91 dias (%).....	59
Tabela 33 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias	60
Tabela 34 - Análise de variância da absorção por capilaridade aos 28 dias para 72 horas	61
Tabela 35 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 91 dias	61
Tabela 36 - Análise de variância da absorção por capilaridade aos 91 dias para 72 horas	62
Tabela 37 - Profundidade carbonatada aos 91 dias (mm)	62
Tabela 38 - Análise de variância da profundidade carbonatada aos 91 dias (mm)	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo de estudos com argamassa complementando ou substituindo cimento ...	20
Quadro 2 - Resumo de estudos com argamassa substituindo areia	24
Quadro 3 - Ensaios de caracterização do resíduo de vidro.....	31
Quadro 4 - Ensaios de caracterização da areia	32
Quadro 5 - Propriedades químicas do cimento.....	32
Quadro 6 - Propriedades físico-mecânicas do cimento	33
Quadro 7 - Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco	35
Quadro 8 - Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido	37
Quadro 9 – Resumo dos resultados de caracterização das argamassas nos estados fresco e endurecido	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1.	Considerações iniciais e justificativa	14
1.2.	Objetivos	16
1.2.1.	Objetivo geral	16
1.2.2.	Objetivos específicos	16
1.3.	Estrutura do trabalho	17
2	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	18
2.1.	Revisão sistemática	18
2.2.	Concretos utilizando resíduo de vidro	19
2.3.	Argamassas utilizando resíduo de vidro	20
2.4.	Efeito do uso de resíduo de vidro nas propriedades da argamassa	26
2.4.1.	Propriedades físicas no estado fresco	26
2.4.2.	Propriedades físicas no estado endurecido	27
2.4.3.	Propriedades mecânicas	27
2.4.4.	Propriedades microestruturais	28
3	METODOLOGIA	30
3.1.	Materiais	30
3.1.1.	Resíduo de vidro	30
3.1.2.	Areia	32
3.1.3.	Cimento	32
3.1.4.	Água	33
3.2.	Métodos	33
3.2.1.	Dosagem, moldagem e cura das argamassas	33
3.2.2.	Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco	35
3.2.2.1.	<i>Determinação do índice de consistência</i>	36
3.2.2.2.	<i>Densidade de massa</i>	36
3.2.3.	Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido	37
3.2.3.1.	<i>Resistência à compressão axial</i>	37
3.2.3.2.	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	38
3.2.3.3.	<i>Absorção de água por imersão</i>	39
3.2.3.4.	<i>Determinação do índice de vazios</i>	40
3.2.3.5.	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	40

3.2.3.6. Carbonatação.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1. Caracterização dos materiais	44
4.1.1. Caracterização do resíduo de vidro	44
4.1.2. Caracterização da areia.....	47
4.2. Propriedade das argamassas no estado fresco.....	48
4.2.1. Índice de consistência.....	48
4.2.2. Densidade de massa.....	49
4.3. Propriedades das argamassas no estado endurecido	50
4.3.1. Resistência à compressão axial	50
4.3.2. Resistência à tração por compressão diametral	53
4.3.3. Absorção de água por imersão	56
4.3.4. Índice de vazios	58
4.3.5. Absorção de água por capilaridade	60
4.3.6. Profundidade carbonatada	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
REFERÊNCIAS	70
ANEXO A – BOLETIM DE ENSAIOS DE CIMENTO	76
ANEXO B – RESULTADOS DE ENSAIOS EM ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)	77
APÊNDICE A – DENSIDADE DE MASSA	80
APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	81
APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL ...	84
APÊNDICE D – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	87
APÊNDICE E – ÍNDICE DE VAZIOS	89
APÊNDICE F – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	91
APÊNDICE G – PROFUNDIDADE CARBONATADA	93

1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste capítulo uma breve contextualização do tema, que envolve as duas grandes áreas de Construção Civil e Sustentabilidade, as justificativas que indicam a relevância do tema escolhido e os objetivos a serem alcançados durante o desenvolvimento da pesquisa.

1.1. Considerações iniciais e justificativa

Os danos ao meio ambiente causados pela ação humana estão cada dia mais crescentes. Mudanças ambientais provenientes de mudanças no clima, extinção de matrizes energéticas e esgotamento de recursos naturais são temas que requerem atenção, bem como a crescente geração de resíduos (POSTAY, 2015).

Segundo o CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem, no Brasil são produzidas, por ano, uma média de 980 mil toneladas de embalagens de vidro, sendo quase metade representada pela matéria-prima em forma de cacos, e grande parte desse material não tem a destinação correta (CEMPRE, 2017), mas pode ser reciclado e se tornar vidro novamente.

Os resíduos sólidos são um dos maiores poluidores do ambiente marinho atualmente. Eles estão distribuídos por praticamente todos dos oceanos e regiões costeiras do mundo, podendo trazer sérios problemas ambientais, econômicos e sociais (GUIMARÃES; BRITO, 2017). Segundo Araújo (2015), a geração e o gerenciamento dos resíduos sólidos se apresentam como um importante desafio da atividade turística sustentável, especialmente em destinos turísticos insulares, como é o caso de Fernando de Noronha, um dos principais atrativos no turismo do Estado de Pernambuco, que, apesar de apresentar alto nível de visitação, é caracterizado pela insuficiência de infraestrutura urbana compatível para atender a demanda de visitantes.

Importante salientar que, para algumas indústrias, o vidro é um dos materiais menos interessantes para se reciclar, pois as matérias-primas para sua elaboração são relativamente baixas e abundantes. Contudo, a reciclagem de vidros reporta a inúmeros benefícios ambientais, principalmente se for levado em consideração que uma garrafa de vidro leva em média 4 mil anos para se decompor (NASCIMENTO; PETARNELLA, 2017).

A gestão de resíduos é parte, e uma das mais importantes da gestão ambiental e consiste na atividade de elaborar políticas e planos integrados com o objetivo de prevenir a geração, obter o máximo aproveitamento e reciclagem de materiais, reduzir ao máximo o volume e/ou periculosidade dos resíduos gerados e definir as melhores soluções para tratamento e disposição (ARAUJO, 2015).

O resíduo de vidro (RV) surge como uma opção de substituição na composição de matrizes cimentícias segundo diversos estudos da área. Kong *et al.* (2016) definem o resíduo de vidro como um material composto principalmente por sílica (SiO_2) amorfa. De acordo com Sales *et al.* (2017), o resíduo de vidro é um material cerâmico não cristalino, com alta concentração de sílica, inerte e não biodegradável e a sua utilização na forma de pó de vidro não é economicamente viável no Brasil.

Os estudos que analisaram argamassas produzidas com resíduo de vidro mostram aumento nas propriedades mecânicas do material (MALEK *et al.*, 2020), aumento na porosidade e absorção de água, durabilidade adequada, resistência à corrosão e redução na resistência ao desgaste (SALES *et al.*, 2017; SIKORA *et al.*, 2016; CZAPIK, 2020), entretanto nos estudos de Sales *et al.* (2017) só foram identificadas estas vantagens quando houve inclusão de nano-sílica e aditivos químicos. Gómez-Soberón *et al.* (2018) analisaram ainda a consistência, densidade e teor de ar incorporado.

Lu e Poon (2018), em estudo com utilização de cinza volante e escória de alto forno, observaram queda na resistência à compressão, resistência à flexão na porcentagem ideal de 50% e aumento na trabalhabilidade para a argamassa álcali-ativada. Já para a argamassa arquetônica, Tittarelli, Giosuè e Mobili (2018) identificaram aumento na trabalhabilidade, menos aditivos superplastificantes, redução de 16% na resistência à compressão e à flexão, sem redução na durabilidade e permeabilidade.

Os estudos apresentados comprovam a possibilidade de obtenção de materiais com propriedades equivalentes às especificadas em norma, apresentando uma vantagem técnica. Há indícios de que a utilização de resíduo de vidro em compósitos cimentícios é viável quando se leva em conta os benefícios sociais, ambientais e econômicos que a prática agrega à construção. Entretanto, segundo Liu, Florea, Brouwers (2019), em pesquisa com adição ao cimento na composição de argamassas, apesar do uso de resíduo de vidro em substituição ao cimento

apresentar potencial para atingir grandes resistências, para que seja possível seu uso em concretos são necessários estudos mais profundos acerca de durabilidade e desenvolvimento da zona de transição.

O surgimento de manifestações patológicas nas construções existentes também estimula a procura por novos materiais e composições que possam vir a reduzir ou mitigar esses problemas. A carbonatação em peças de concreto é um desses problemas e muitas vezes seus danos só são identificados quando há corrosão das armaduras. Esse processo se dá quando ocorre a penetração do dióxido de carbono (CO_2) existente na atmosfera nos poros do concreto, reagindo com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na pasta de cimento em estudos com blocos de concreto (MARTINS, 2017).

Portanto, é de suma importância a busca por materiais alternativos para a confecção de compósitos cimentícios que garantam um bom desempenho e alta durabilidade. Identifica-se ainda uma vantagem ambiental, uma vez que evitará a disposição do material no meio ambiente e reduzirá a utilização de matérias-primas naturais. Desse modo, espera-se com esta pesquisa identificar as propriedades e a viabilidade técnica da utilização de resíduos de vidro em compósitos cimentícios.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é analisar a influência da adição de resíduo de vidro em substituição parcial do agregado miúdo em argamassas de cimento Portland, visando a produção de concreto.

1.2.2. Objetivos específicos

A fim de se atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Verificar as propriedades físicas e microestruturais do resíduo de vidro;
- Verificar as propriedades físicas das argamassas com e sem adição do resíduo no estado fresco, bem como as propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido;

- Avaliar o efeito da substituição parcial da areia por resíduos de vidro em diferentes teores na resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em 6 capítulos, onde o Capítulo 1 apresenta a introdução, com contextualização e justificativa para escolha do tema e os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 relata as mais recentes utilizações de resíduo de vidro em pesquisas experimentais na construção civil e a influência nas propriedades dos materiais.

No Capítulo 3 constam a metodologia adotada, as etapas do procedimento experimental e os materiais utilizados nos ensaios.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados alcançados.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais da pesquisa.

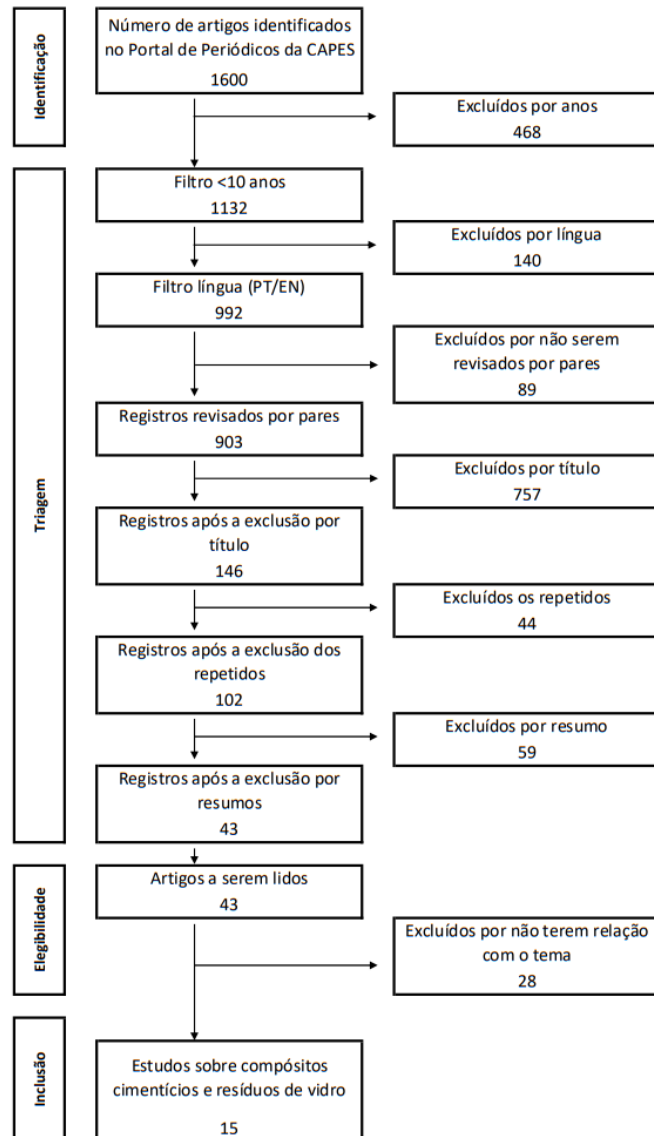
No Capítulo 6 são sugeridas abordagens complementares para trabalhos futuros.

2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1. Revisão sistemática

Para embasar a revisão bibliográfica, foi realizada uma revisão sistemática da literatura através da metodologia PRISMA (Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises), ferramenta desenvolvida para análise organizada de dados, a fim de otimizar o entendimento das informações propostas, propiciando a contextualização dos fatores influentes nas propriedades dos compósitos com resíduos de vidro. Os resultados da seleção dos artigos utilizados estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Critérios de seleção para artigos pela metodologia PRISMA



Fonte: Autora

2.2. Concretos utilizando resíduo de vidro

Resíduos de vidro provenientes dos mais diversos tipos de materiais vêm sendo estudados para utilização no concreto, como vidros de janelas de carro estragadas (TARIQ *et al.*, 2020), vidros de display de cristal líquido (LCD) (KIM *et al.*, 2017) e até tubos de raios catódicos (LIU *et al.*, 2018).

Harish *et al.* (2016) utilizaram resíduos de vidro de silicato de soda-cal em substituição de cimento nos teores 0%, 10%, 20%, 30% e 40% e concluíram que o concreto estudado apresentou, conforme aumento dos teores em relação ao traço de referência, aumento na resistência à compressão, à tração e à flexão com o uso de pó de vidro com partículas menores que 150 μ . No caso de partículas menores que 300 μ , observaram redução dos valores das mesmas propriedades.

Elaqra *et al.* (2019) utilizaram pó de vidro em substituição ao cimento em 2,5%, 5%, 10% e 20%, com relação água/cimento de 0,67 e encontraram aumento na resistência à compressão nas idades iniciais relacionado à presença de íons livres de sódio, cálcio e silício, que participam da reação pozolânica, e aumento da propriedade aos 28 e 90 dias devido à formação de produtos mais hidratados nos poros.

Esse aumento está relacionado à reação pozolânica do pó de vidro, ao aumento da formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e à diminuição da quantidade de hidróxido de cálcio (C-H) presente na mistura, tendo como resultado a formação de uma forte zona de transição interfacial entre o agregado e a pasta de cimento.

Já Rocha (2019) realizou estudo utilizando RV em substituição parcial de agregados miúdos em 0%, 15% e 30%, com relação água/cimento de 0,55, e verificou que não há mitigação do ataque químico sofrido pelo concreto na presença de íons cloretos de sódio, obtendo valores de resistência à compressão aos 28 dias para o traço de referência 25,61 MPa, para 15% de substituição 23,75 MPa e para 30%, 21,52 MPa, representando uma redução máxima de 15,97%.

2.3. Argamassas utilizando resíduo de vidro

Nos estudos analisando a utilização de resíduo de vidro em argamassas existem duas vertentes, uma utilizando-o como substituição ou complemento ao cimento e outra como substituição ou complemento ao agregado miúdo. O Quadro 1 apresenta um resumo de alguns trabalhos realizados utilizando o resíduo de vidro nos componentes da argamassa complementando ou substituindo cimento.

Quadro 1 - Resumo de estudos com argamassa complementando ou substituindo cimento

Referência	País	Compósito	Fonte Do Resíduo	% De Aplicação	Tipo De Cimento	A/C
Kong <i>et al.</i> (2016)	China	Argamassa	Pó de vidro de garrafas	Substituição de cimento: 0, 15, 30 e 45	Cimento PI 42.5	-
Lu, Duan e Poon (2017)	Hong Kong	Argamassa Arquitetônica	Pó de vidro e cacos de vidro	Complemento ao cimento	Cimento Portland Comum Branco	0,4
Sales <i>et al.</i> (2017)	Brasil	Argamassa	Pratos de vidro âmbar e incolor	Substituição de cimento: 0, 10, 20	Cimento Portland ARI	0,50
Ke <i>et al.</i> (2018)	China	Argamassa	Pó de vidro (Garrafas de vidro branco)	Substituição de cimento – 0, 10, 20 e 30	Cimento Portland PO 42.5	0,47
Liu, Florea e Brouwers (2019)	China	Argamassa de alta resistência	Pó de vidro colorido de cal sodada	Substituição de cimento: 0, 10, 30 e 60	Cimento Portland CEM III/A 52.5 N	0,25 e 0,50
Patel <i>et al.</i> (2019)	Índia	Argamassa	Pó de vidro	Substituição de cimento: 0, 5, 10, 15 e 20	Cimento Portland 43	0,40
Barkauskas, Nagrockienė e Norkus (2020)	Lituânia	Argamassa	Resíduo de vidro	Substituição de cimento 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30	Cimento Portland CEM I 42.5R	0,46
Wang <i>et al.</i> (2020)	China	Argamassa	Pó de vidro colorido de garrafas	Substituição de cimento 0, 10, 20 e 30	Cimento Portland 42.5	0,35, 0,40, 0,50 e 0,60

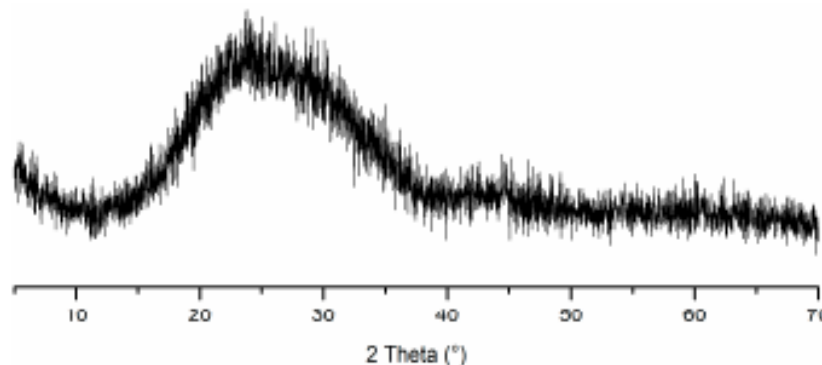
Fonte: Autora

Através de ensaios de resistência à compressão, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e espectrometria de difração de raios X

(DRX), submetendo os corpos de prova a processos de cura a vapor e por microondas, Kong *et al.* (2016) identificaram uma melhoria na microestrutura identificada na zona de transição interfacial e aumento de resistência, devido ao aumento da temperatura de hidratação do cimento no processo de cura por microondas. Observaram ainda que ocorria dissolução de sódio nas partículas finas do RV formando C-S-H mais reticular, conseqüentemente tornando a estrutura mais densa e estável, justificando o aumento encontrado para a resistência.

No caso de cura úmida, foi identificado que a reação pozolânica do pó de vidro se tornou visível para as porcentagens de 15% e 30%, resultando em um aumento na resistência à compressão em relação aos corpos de prova de controle, enquanto para 45% de substituição houve uma queda na resistência. Kong *et al.* (2016) relacionaram isto à pequena superfície específica dos grãos, que diminui as atividades pozolânicas. No ensaio de DRX, encontraram que o pó de vidro consiste principalmente de uma fase amorfa (Figura 2). O ensaio de FRX mostrou maior presença de SiO_2 , CaO , e Na_2O , mas teores de Al_2O_3 muito menores.

Figura 2 - Difratoograma do resíduo de vidro



Fonte: Kong *et al.* (2016)

Lu, Duan e Poon (2017) realizaram ensaios de resistência à compressão e à flexão, MEV e porosimetria por inserção de mercúrio e constataram que o tamanho das partículas do RV reduz significativamente a trabalhabilidade. Os autores relacionam a queda nesta propriedade ao tamanho e formato irregular das partículas do pó de vidro, apesar de terem encontrado na literatura informações conflitantes quanto a essa justificativa devido à superfície lisa e à natureza não-absorvente dos cacos de vidro. Concluíram então que quanto maior e mais irregulares fossem as partículas haveria aumento da resistência à trabalhabilidade, enquanto as partículas mais finas reduziriam o atrito devido ao formato irregular.

Ao suplementar o teor de cimento com o RV, verificaram ainda que a temperatura de hidratação do cimento diminuiu, bem como a atividade pozolânica. A resistência à flexão aumentou com o tempo, apresentando uma estrutura menos porosa e com uma zona de transição interfacial mais densa. Já a resistência à compressão diminuiu utilizando o pó de vidro, fato diretamente relacionado à baixa atividade pozolânica nas primeiras idades da argamassa (LU; DUAN; POON, 2017).

Nos estudos de Sales *et al.* (2017), verificou-se que as amostras com maior porcentagem de RV apresentam maior profundidade de carbonatação que a amostra de controle, com um aumento de até 1,3 mm em relação ao traço de referência. Os autores relacionam o valor relativamente baixo da variação ao fato de terem armazenado as amostras em ambiente com 48% de umidade, condição que pode ter impedido a difusão de CO₂ nos poros, já que as maiores taxas de carbonatação acontecem em umidades relativas entre 50% e 75%.

Vale salientar que os autores identificaram que para resíduos de vidro incolores e âmbar, tendo o último melhor desempenho quanto à porosidade, inibição da reação alkali-sílica, enquanto os RV de vidro apresentaram melhor resistência à corrosão.

As micropartículas de vidro inibem as reações álcali-sílica (RAS), significativamente utilizando 20% de RV âmbar, pois a sílica presente na mistura reage nas primeiras idades com o hidróxido de cálcio, não restando grandes quantidades para reações em idades mais avançadas.

Os efeitos da granulometria das partículas de RV, o uso de cinzas volantes e a RAS foram objetos de estudo de Ke *et al.* (2018), mediante os ensaios de MEV e imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH). Identificou-se que as RAS eram menos evidentes em misturas com partículas menores que 300 µm e mais evidentes em partículas maiores e com concentração de 30%. A quantidade de C-H foi reduzida pois houve reação com o pó de vidro, resultando em um aumento do C-S-H, que preencheu os poros da estrutura tornando-a mais densa.

Liu, Florea e Brouwers (2019) produziram argamassas de alta resistência à compressão, chegando a 99 MPa, substituindo em 60% a quantidade de cimento. O material aumentou a trabalhabilidade da mistura ao manter a quantidade de aditivo plastificante constante e

apresentou uma microestrutura mais densa nas amostras com mais RV e menor empacotamento de partículas nas amostras com menos RV.

Patel *et al.* (2019) identificaram em suas amostras microestruturas densas devido à utilização do pó de vidro, que permitiu o preenchimento dos poros da matriz cimentícia hidratada durante as primeiras idades. Contudo, as propriedades no estado endurecido limitam o uso do resíduo em 20% para um material com partículas de 63 μ e em 10% a 15% para partículas de 75 μ .

Através de ensaios de resistência à compressão e à flexão, DRX, MEV e ultrassom, Barkauskas, Nagrockienė e Norkus (2020) obtiveram resultados mais expressivos na substituição de cimento em 5%, pois identificaram maior velocidade de pulso ultrassônico, estrutura densa sem grandes poros e maior adesão do cimento ao RV. Observaram microscopicamente a presença de cristais irregulares e angulares nos RV com até 0,56 μ m e identificaram atividade pozolânica no RV, possibilitando seu uso na construção civil.

Wang *et al.* (2020) concluíram em sua pesquisa que a argamassa produzida com RV não apresentou grandes riscos para a ocorrência de RAS. Entretanto, identificaram que a substituição de cimento em 0%, 10%, 20% e 30% apresentaram queda significativa na resistência à compressão.

De forma geral, é possível concluir que ao substituir ou complementar a quantidade de cimento nas argamassas com resíduo de vidro há aumento na profundidade de carbonatação, diminuição na temperatura de hidratação do cimento e na atividade pozolânica. Barkauskas, Nagrockienė e Norkus (2020) obtiveram resultados mais expressivos na substituição de cimento em 5%, pois identificaram maior velocidade de pulso ultrassônico, estrutura densa menos porosa e maior adesão do cimento ao RV. Kong *et al.* (2016) verificaram aumento na resistência à compressão em compósitos com até 30% de substituição do cimento por RV, enquanto Wang *et al.* (2020) avaliou que as proporções até 30% reduzem significativamente a propriedade.

O Quadro 2 apresenta um resumo de alguns trabalhos realizados utilizando o resíduo de vidro nos componentes da argamassa complementando ou substituindo o agregado miúdo e avaliaram suas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais. Foram utilizados em sua maioria vidros triturados provenientes de garrafas de vidro e resíduos de vidro reciclado, de diversas colorações.

Quadro 2 - Resumo de estudos com argamassa substituindo areia

Sikora <i>et al.</i> (2016)	Polônia	Argamassa	Garrafas (vidro de cal sodada)	Substituição de areia: 25, 50, 75, 100	CEM II/A-S 42.5 R	0,50
Gómez-Soberón <i>et al.</i> (2018)	Espanha	Argamassa	Resíduo de vidro transparente	Substituição de agregado miúdo: 15, 30, 60, 100	Cimento Portland CEM I 42.5 N/SR	0,50
Lu e Poon (2018)	Hong Kong	Argamassa álcali-ativada	Garrafas (vidro de silicato de cal sodada)	Substituição de areia: 0, 25, 50, 75, 100	-	0,40
Tuaum, Shitote e Oyawa (2018)	Kenia	Argamassa auto-compactável	Resíduo de vidro de Silicato de cal sodada	Substituição de areia: 0, 10, 20, 30, 40 e 50	Cimento Portland CEM I 42.5N	0,40
Tittarelli, Giosuè, Mobili (2018)	Itália	Argamassa Arquitetônica (não estrutural)	Resíduos de vidro reciclado	Substituição de agregado miúdo: 0, 33, 66, 100	Cimento Branco CEM II/B-LL 32.5 R	0,47
Czapik (2020)	Polônia	Argamassa	Garrafas (vidro de cal sodada)	Substituição total de agregado miúdo	Cimento Portland CEM I 42.5R	0,47
Malek <i>et al.</i> (2020)	Polônia	Argamassa	Resíduos de vidro pós-consumo, na sua maioria garrafas	Substituição de areia: 0, 5, 10, 15, 20	Cimento Portland CEM I 52.5R	0,49

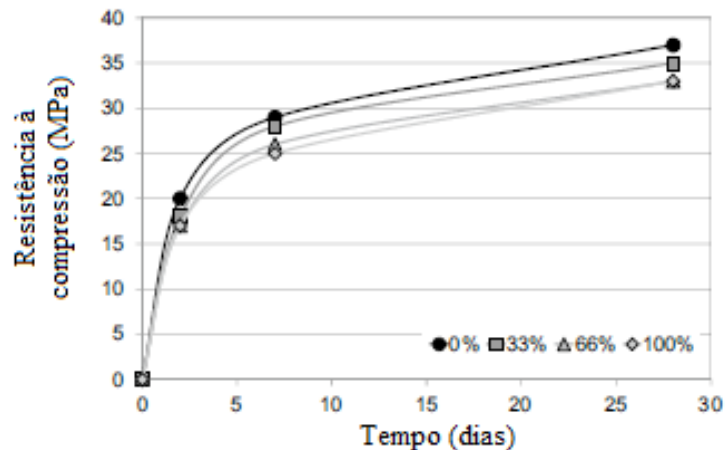
Fonte: Autora

Sikora *et al.* (2016), em estudo com adição de nano-sílica e aditivos químicos, pontuam que devido à superfície lisa do RV a consistência aumenta significativamente em comparação com argamassas preparadas com agregado de quartzo. Observaram ainda que a presença do RV aumenta a porosidade e absorção de água das argamassas. Quanto à resistência à compressão, identificaram que nas amostras que apresentaram aumento na resistência esta condição está relacionada estritamente ao uso da nano-sílica, enquanto o aumento da concentração de resíduo de vidro, entre 25% e 100%, causa redução na propriedade e segundo os autores isso se dá por conta do grão do pó de vidro ter textura lisa e formato plano, em forma de agulha e alongado.

Gómez-Soberón *et al.* (2018) identificaram que em misturas de argamassas os resíduos de vidro transparente apresentavam uma absorção de água equivalente a 0,6%, módulo de finura igual a 1,8 e uma porcentagem de material mais fino que 75 µm, equivalente a 5,3%.

Para argamassas não estruturais, Tittarelli, Giosuè e Mobili (2018) concluíram que é possível a substituição total do agregado miúdo por RV, aumentando a trabalhabilidade sem a necessidade de aditivos superplastificantes, apresentando pouca redução de, no máximo, 16% na resistência e na durabilidade (Figura 3).

Figura 3 - Resultados de resistência à compressão



Fonte: Adaptado de Tittarelli, Giosuè e Mobili (2018)

Lu e Poon (2018) identificaram um aumento na trabalhabilidade com a substituição do agregado miúdo pelo RV devido à presença de partículas maiores, diminuindo, entretanto, quando se substituía também as cinzas volantes utilizadas. Conforme os teores de RV aumentavam, a resistência à compressão decrescia, em função da baixa reatividade em comparação com o uso de escória de alto forno e cinzas volantes. Concluíram então que o material poderia ser utilizado para confecção de tijolos não estruturais.

Já Tuaum, Shitote e Oyawa (2018) observaram que o uso de até 30% do RV não infere em grandes reduções na resistência à compressão e à flexão e as argamassas com RV apresentam baixa absorção de água quando comparadas à amostra de controle. Identificaram ainda que ao aumentar o teor de RV, a expansão devido à RAS aumentava.

Czapik (2020) observou que a expansão devido à RAS ocorre significativamente com maiores idades da argamassa, quando o material expande até romper e identifica-se microscopicamente a descoloração do RV, deixando-o mais transparente. Atribui-se a expansão do material à presença de partículas de RV maiores que 1mm que reagem com o álcali, formando gel nas fissuras da expansão.

Malek *et al.* (2020) identificaram aumento nas propriedades mecânicas dos compósitos devido à utilização de partículas finas do agregado de vidro, variando de 0 a 1,5 mm. Quanto ao modo de elasticidade, a adição de 20% de RV apresentou resultados 3% maiores que a amostra de referência.

De forma geral, é possível concluir que a substituição de agregado miúdo por resíduo de vidro entre 25% e 100% causa decréscimo na resistência à compressão (SIKORA *et al.*, 2016) e que o uso de até 30% do RV não infere em grandes reduções nesta propriedade que pode ser de até, no máximo, 16% (TITTARELLI; GIOSUÈ; MOBILI, 2018).

2.4. Efeito do uso de resíduo de vidro nas propriedades da argamassa

2.4.1. Propriedades físicas no estado fresco

Em argamassas no estado fresco, é possível se avaliar a consistência, densidade, retenção de água e o teor de ar incorporado, que influenciam diretamente na trabalhabilidade. Na Tabela 1 estão dispostos alguns resultados quanto à consistência encontrados na literatura.

Tabela 1 - Dados da literatura sobre propriedades físicas no estado fresco

Referência	% RV	Consistência (mm)
Sikora <i>et al.</i> (2016) (relação a/c = 0,50)	0	160
	25	160
	50	167
	75	167
	100	166
Tittarelli, Giosuè e Mobili (2018) (relação a/c = 0,47)	0	200
	33	188
	66	195
	100	185
Tuaum, Shitote e Oyawa (2018) (relação a/c = 0,40)	0	250
	10	255
	20	249
	30	242
	40	248
	50	252

Fonte: Autora

É notório que no estudo de Sikora *et al.* (2016) com adição de nano-sílica e aditivos químicos foram obtidos maiores espalhamentos em relação aos estudos sem adição. Entretanto, nos outros estudos foram utilizadas relações água-cimento menores.

2.4.2. *Propriedades físicas no estado endurecido*

Os ensaios de absorção por capilaridade e por imersão permitem analisar o nível de penetração de água nos corpos de prova. Apresentados na Tabela 2 estão alguns resultados de absorção encontrados na literatura.

Tabela 2 - Dados da literatura sobre propriedades físicas no estado endurecido

Referência	% RV	Absorção de água por imersão (%)	Absorção de água por capilaridade (mm/h ^{1/2})
Sikora <i>et al.</i> (2016) (relação a/c = 0,50)	0	8,00	-
	25	8,80	-
	50	9,30	-
	75	10,50	-
	100	11,00	-
Tuaum, Shitote e Oyawa (2018) (relação a/c = 0,40)	0	7,11	2,83
	10	7,07	2,02
	20	6,88	1,79
	30	6,61	1,55
	40	6,52	1,40
	50	6,29	1,35

Fonte: Autora

É possível notar que o estudo com relação água-cimento de 0,50 apresentou maiores porcentagens de absorção de água por imersão. Isto se dá pelo fato de gerar amostras mais porosas que o estudo que utilizou relação a/c 0,40.

2.4.3. *Propriedades mecânicas*

Para definir a viabilidade técnica da utilização de resíduos de vidro em argamassas é fundamental avaliar os resultados de resistência à compressão. Alguns resultados disponíveis na literatura estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados da literatura sobre propriedades mecânicas das argamassas com RV

Estudo de referência	% RV	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
Sikora <i>et al.</i> (2016) (relação a/c = 0,50)	0	50,40	-
	25	54,70	-
	50	48,00	-
	75	47,50	-
	100	46,40	-
Tittarelli, Giosuè e Mobili (2018) (relação a/c = 0,47)	0	37,00	-
	33	35,00	-
	66	32,50	-
	100	33,50	-
Tuaum, Shitote e Oyawa (2018) (relação a/c = 0,40)	0	57,05	-
	10	56,04	-
	20	55,62	-
	30	53,30	-
	40	50,85	-
	50	48,33	-
Malek <i>et al.</i> (2020) (relação a/c = 0,49)	0	53	4,12
	5	59	4,93
	10	62	4,98
	15	66	5,02
	20	68	5,06

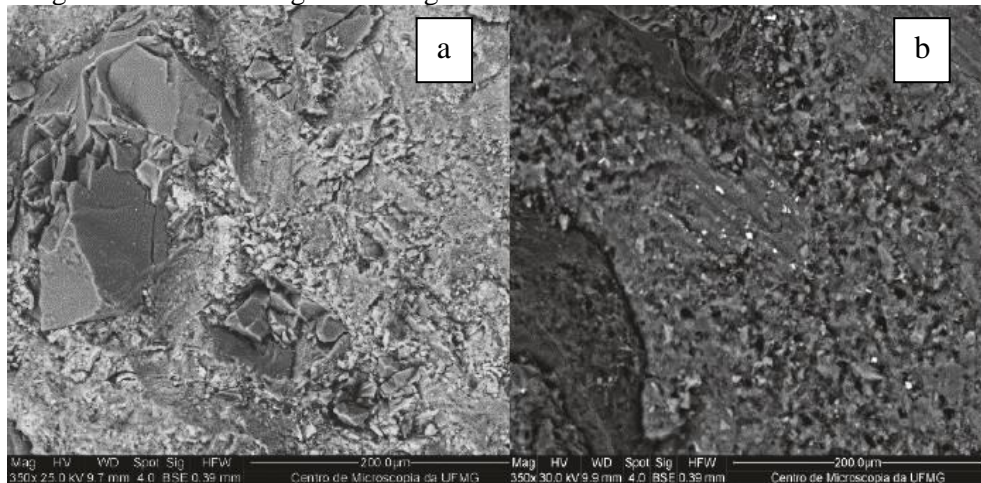
Fonte: Autora

A queda na resistência à compressão está relacionada à textura lisa e ao formato dos grãos do resíduo de vidro. Considera-se pelos estudos citados que o uso de até 30% do RV é indicado para que não decaia tanto a resistência à compressão do material (TITTARELLI; GIOSUÈ; MOBILI, 2018). Quanto à resistência à tração na compressão diametral, Malek *et al.* (2020) admitem que o aumento na propriedade está relacionado à utilização de partículas finas do agregado de vidro, variando de 0 a 1,5 mm.

2.4.4. Propriedades microestruturais

De modo geral, os estudos que realizaram ensaios de microscopia eletrônica de varredura encontraram estruturas densas e pouco porosas. A Figura 4 mostra eletromicrografias de misturas com 10% (a) e 20% (b) de vidro incolor em substituição ao cimento.

Figura 4 - Eletromicrografia de argamassas com 10% e 20% de resíduo de vidro



Fonte: (SALES *et al.*, 2017)

Sales *et al.* (2017) relataram que as argamassas contendo RV em substituição parcial de cimento apresentam menos cristais e baixo teor de hidróxido de cálcio em comparação às argamassas feitas apenas com cimento, devido à ocorrência da reação pozolânica, o que poderia contribuir para maior durabilidade do composto.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nos ensaios e os procedimentos realizados para atingir os objetivos da pesquisa.

3.1. Materiais

O estudo das propriedades do concreto através da argamassa foi definido em função da semelhança entre a estrutura das pastas dos materiais, considerando os efeitos na zona de transição entre a pasta do concreto e o agregado graúdo, conforme estabelecido na pesquisa de Mota (2011). Deste modo, é possível estimar o comportamento do cobrimento do concreto.

3.1.1. Resíduo de vidro

O resíduo de vidro foi fornecido por uma empresa de coleta seletiva de lixo no arquipélago de Fernando de Noronha. O material, majoritariamente da cor verde, é triturado em uma central de resíduos na ilha e enviado para o continente para reciclagem (Figura 5). O resíduo de vidro utilizado nesta pesquisa é proveniente de garrafas de cerveja do tipo *long neck*, predominantemente na cor verde.

Figura 5 - Resíduo de vidro triturado



Fonte: Autora

Na preparação do RV, primeiramente, foi realizada uma triagem do material visto que o resíduo triturado estava misturado aos rótulos plásticos ou de papel das garrafas. Optou-se por utilizar o material nas condições de recebimento para simular as condições reais de obras da construção civil. Para ser utilizado na confecção dos corpos de prova, o material foi passado na peneira de abertura 4,8 mm, pois devido ao formato lamelar dos cacos de vidro, considerou-se que essa porção poderia afetar a trabalhabilidade e não seria adequada para substituir o agregado miúdo.

Os ensaios de caracterização do resíduo de vidro foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – POLI/UPE, com exceção dos ensaios de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), que foi realizado no Núcleo de Estudos Geoquímicos – Laboratório de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE), e espectrometria de difração de raios X (DRX), que foi realizado no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag), ambos localizados na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). No Quadro 3 estão descritos os ensaios conduzidos, bem como as respectivas normas da ABNT que foram seguidas.

Quadro 3 - Ensaios de caracterização do resíduo de vidro

Ensaio	Norma
Massa Unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Índice de volume de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Espectrometria de fluorescência de raios X	NBR 16137 (ABNT, 2016)
Espectrometria de difração de raios X	-

Fonte: Autora

O ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X tem o intuito de analisar quantitativamente os compostos químicos presentes na amostra. Antes de iniciar o ensaio, as amostras foram secas em estufa a 110°C, sendo uma porção da amostra seca prensada em uma cápsula de alumínio com 30 toneladas de força. A pastilha prensada foi então analisada em um aparelho espectrômetro de fluorescência de raios X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores, fornecendo resultados em porcentagem do peso.

Já o ensaio de espectrometria de difração de raios X busca identificar os minerais presentes na amostra caracterizando sua estrutura cristalina. No ensaio de DRX foi utilizado o difratômetro Bruker modelo D2 Phaser. Os parâmetros do ensaio foram: Passo Angular 0,02°; tempo por

passo: 1 s; faixa de varredura: 5 - 80° (2theta); voltagem e corrente do equipamento: 30 kV e 10 mA; velocidade do goniômetro: 15 rpm.

3.1.2. Areia

A areia utilizada foi do tipo natural lavada, encontrada lojas de construção da Região Metropolitana do Recife (RMR). Antes de ser adicionada à mistura ou ser ensaiada, a areia foi seca em estufa à 105 °C até ser detectada a constância de massa do material. Para ser utilizada na confecção dos corpos de prova, a areia foi passada na peneira de abertura 4,8 mm e o que ficou retido foi descartado.

Os ensaios de caracterização da areia foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – POLI/UPE. No Quadro 4 estão descritos os ensaios conduzidos, bem como as respectivas normas da ABNT que foram seguidas.

Quadro 4 - Ensaios de caracterização da areia

Ensaio	Norma
Massa Unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Índice de volume de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Fonte: Autora

3.1.3. Cimento

Utilizou-se na pesquisa o cimento Portland com pozolana CP II-Z-32, pois é um dos tipos mais utilizados na RMR e pode ser encontrado com facilidade nas lojas de construção. O Quadro 5 indica as propriedades químicas do cimento, enquanto o Quadro 6 apresenta as propriedades físico-mecânicas, todas fornecidas pelo fabricante.

Quadro 5 - Propriedades químicas do cimento

Característica	Norma	Resultado
Resíduo Insolúvel	NM 15 (ABNT, 2012)	11,04%
Perda ao Fogo	NM 18 (ABNT, 2012)	8,33%
Óxido de Magnésio - MgO	NM 14 (ABNT, 2012)	2,36%
Trióxido de Enxofre - SO ₃	NM 16 (ABNT, 2012)	2,73%

Fonte: Elaborada pela autora de acordo com dados fornecidos pelo fabricante.

Quadro 6 - Propriedades físico-mecânicas do cimento

Característica	Norma	Resultado
Área específica	NBR 16372 (ABNT, 2015)	4403,75 cm ² /g
Índice de Finura - #75µm (nº 200)	NBR 11579 (ABNT, 2012)	0,68%
Resíduo na peneira #325	NBR 9202 (ABNT, 1985)	6,29%
Início de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)	226,67 min
Fim de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)	316,67 min
Resistência à compressão - 3 dias	NBR 7215 (ABNT, 2019)	23,99 MPa
Resistência à compressão - 7 dias	NBR 7215 (ABNT, 2019)	29,53 MPa

Fonte: Elaborada pela autora de acordo com dados fornecidos pelo fabricante.

3.1.4. Água

Foi utilizada água potável distribuída pela rede pública de abastecimento de Recife, fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa). Admitiu-se que pode ser utilizada para ensaios em argamassa uma vez que poderia ser usada em ensaios em concreto sem necessidade de ensaios específicos conforme a NBR 15900 (ABNT, 2009).

3.2. Métodos

3.2.1. Dosagem, moldagem e cura das argamassas

Foram definidas as proporções de substituição em massa do agregado miúdo pelo RV nos teores de 0%, 5%, 15% e 25%, fixando a relação água/cimento (a/c) de 0,60. Considerando a pesquisa de Rocha (2019), que utilizou a/c de 0,55 e agregados com maior granulometria, optou-se por utilizar uma relação a/c maior buscando aumentar a trabalhabilidade da mistura sem a necessidade do uso de aditivo plastificante que implicaria no aumento de custo do material. As proporções de cimento, areia, vidro e relação água/cimento (c:a:v:a/c) e a nomenclatura de cada família encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Proporções da dosagem

Família	Percentual de RV (%)	Proporções (c:a:v:a/c)
RV0	0	1:3:0:0,60
RV5	5	1:2,85:0,15:0,60
RV15	15	1:2,55:0,45:0,60
RV25	25	1:2,25:0,75:0,60

Fonte: Autora

Foram utilizados nesta pesquisa moldes cilíndricos Ø 5 x 10 cm. A quantidade de corpos de provas moldados para realização dos ensaios está disposta na Tabela 5. Para o ensaio de carbonatação serão utilizados 8 corpos de prova de cada família, que deverão ser rompidos aos 91 dias.

Tabela 5 - Quantitativo de corpos de prova moldados

Ensaio	Idade	Número de corpos de prova por família			
		RV0	RV5	RV15	RV25
Resistência à compressão axial	7 dias	8	8	8	8
	28 dias	8	8	8	8
	91 dias	8	8	8	8
Resistência à tração por compressão diametral	7 dias	8	8	8	8
	28 dias	8	8	8	8
	91 dias	8	8	8	8
Absorção por capilaridade	28 dias	4	4	4	4
	91 dias	4	4	4	4
Absorção por imersão e índice de vazios	28 dias	4	4	4	4
	91 dias	4	4	4	4

Fonte: Autora

As argamassas foram produzidas em um misturador mecânico em laboratório com temperatura ambiente em torno de 26 °C e 44% de umidade relativa. Após a moldagem, os moldes permaneceram no laboratório com suas faces superiores protegidas por uma placa de vidro para cura inicial (Figura 6).

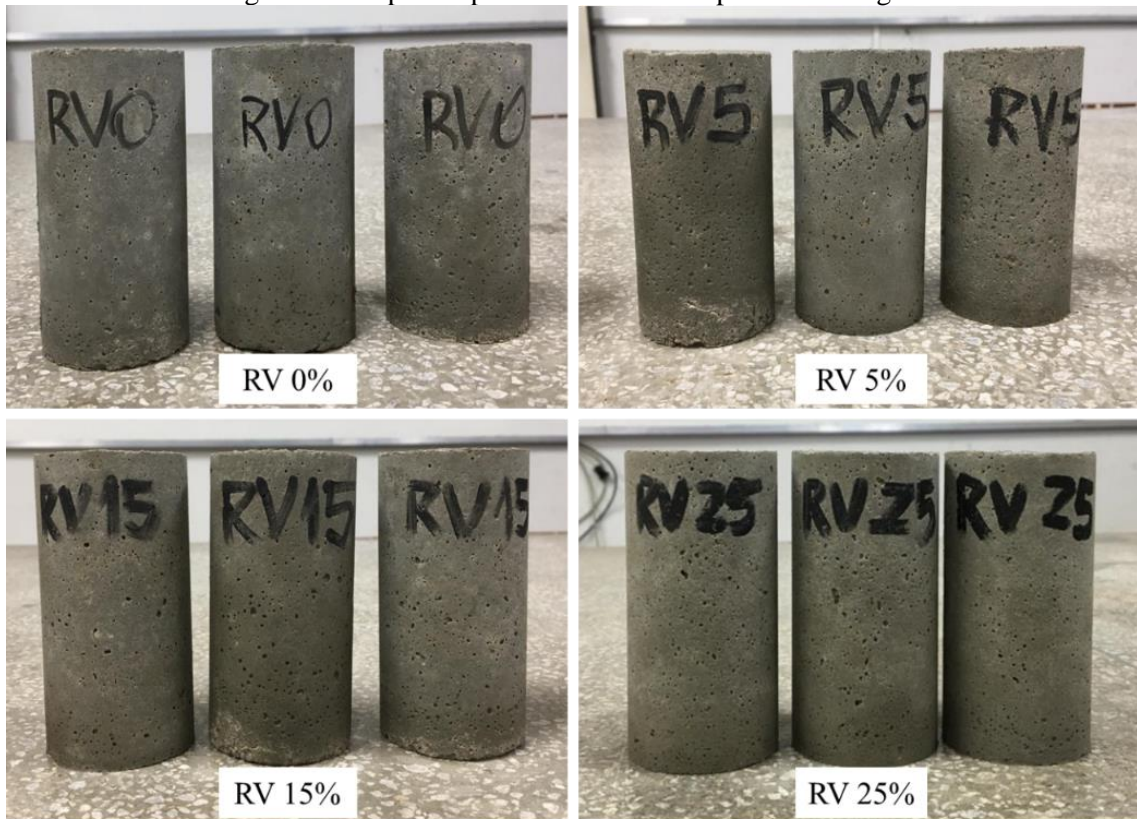
Figura 6 - Corpos de prova após moldagem



Fonte: Autora

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e identificados (Figura 7). Procedeu-se então para a cura submersa em tanques com água saturada de cal, onde os espécimes ficaram desde o momento da desmoldagem até a realização dos ensaios.

Figura 7 - Corpos de prova identificados após desmoldagem



Fonte: Autora

3.2.2. Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco

No Quadro 7 estão expostos os ensaios de caracterização a serem realizados nas argamassas no estado fresco, bem como as normas seguidas. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – POLI/UPE.

Quadro 7 - Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco

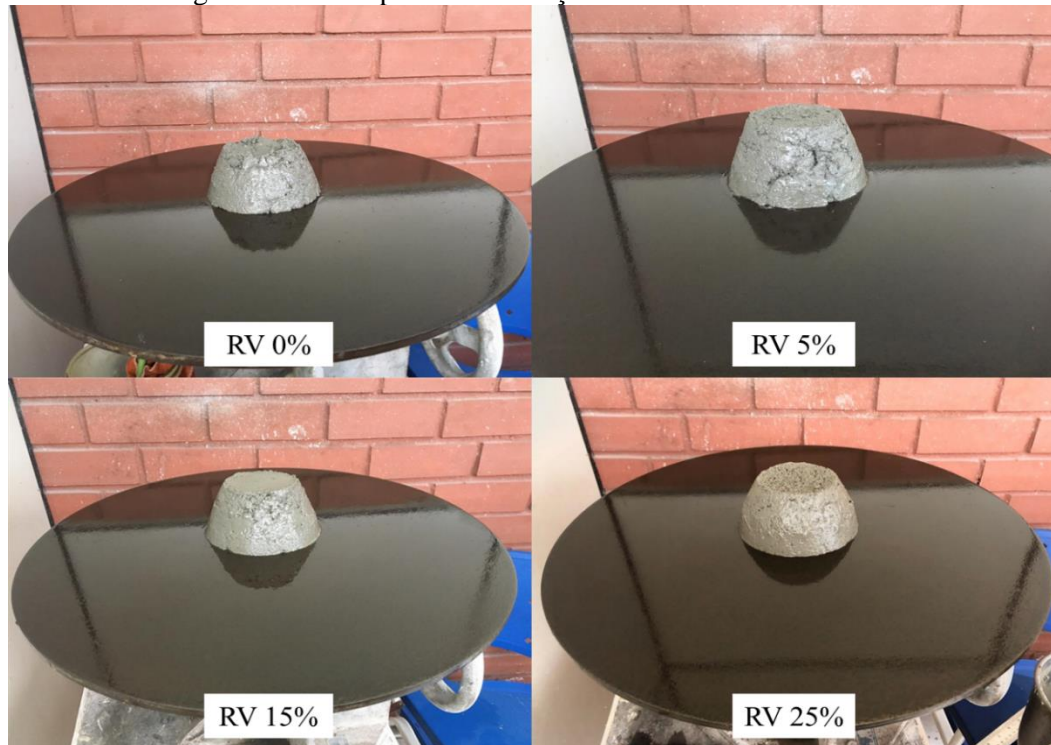
Ensaio	Norma
Determinação do índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Densidade de massa	NBR 13278 (ABNT, 2005)

Fonte: Autora

3.2.2.1. *Determinação do índice de consistência*

A Figura 8 apresenta o ensaio de determinação do índice de consistência, utilizando a flow table para mensurar o espalhamento da argamassa.

Figura 8 - Ensaio para determinação do índice de consistência



Fonte: Autora

3.2.2.2. *Densidade de massa*

Seguindo o procedimento indicado na NBR 13278 (ABNT, 2005), determinou-se a densidade de massa da argamassa no estado fresco utilizando 4 corpos de prova de cada família, e seu valor é obtido através da Equação 1.

$$A = \frac{M_c - M_v}{V_r} \quad (1)$$

Onde:

A - Densidade de massa (g/cm³);

M_c - Massa do recipiente contendo a argamassa fresca (g);

M_v - Massa do recipiente vazio (g); e

V_r - Volume do recipiente (cm³).

3.2.3. Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido

Os ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) – POLI/UPE. No Quadro 8 estão descritos os ensaios conduzidos, bem como suas respectivas normas.

Quadro 8 - Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido

Ensaio	Norma
Resistência à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)
Absorção por imersão	NBR 9778 (ABNT, 2005)
Índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2005)
Absorção por capilaridade	NBR 9779 (ABNT, 2012)
Carbonatação	RILEM CPC-18 (1988)

Fonte: Autora

3.2.3.1. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão foi estabelecida em conformidade com a NBR 7215 (ABNT, 2019). Após o período de cura, os corpos de prova foram retificados para regularização das faces (Figura 9) e tiveram suas medidas aferidas com o auxílio de um paquímetro.

Figura 9 - Retificação dos corpos de prova



Fonte: Autora

Após a retificação, os corpos de prova foram rompidos na Prensa EMIC, com capacidade de carga de 300 KN (Figura 10).

Figura 10 - Corpo de prova preparado para o ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autora

3.2.3.2. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi estabelecida conforme as diretrizes da NBR 7222 (ABNT, 2011), utilizando uma prensa hidráulica manual digital (Figura 11). Foram colocadas duas peças de madeira sobre as partes superior e inferior do corpo de prova com o intuito de distribuir as tensões uniformemente ao longo do espécime.

Figura 11 - Corpo de prova preparado para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autora

3.2.3.3. Absorção de água por imersão

Após o período de cura submersa, os corpos de prova foram secos em estufa a 105 °C durante 72h e foram resfriadas à temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C, aferindo-se a massa seca. Posteriormente as amostras foram imersas em água até 1/3 do seu volume durante 4 h, 2/3 do volume após mais 4 h e por fim totalmente imersas por 72 h (Figura 12). A massa das amostras foi aferida com 24 h, 48 h e 72 h contadas a partir do contato com a água.

Figura 12 - Corpos de prova durante ensaio de absorção por imersão



Fonte: Autora

Após o período de 72h foi realizada a pesagem hidrostática em uma balança de precisão da marca Marte, modelo AS2000C.

A absorção por imersão é obtida através da Equação 2.

$$A = \frac{(msat - ms)}{ms} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

A - Absorção por imersão em porcentagem (%);

msat - Massa das amostras saturadas após imersão (g); e

ms - Massa das amostras secas em estufa (g).

3.2.3.4. *Determinação do índice de vazios*

O ensaio para determinação do índice de vazios, que serve de indicativo da porosidade dos compósitos cimentícios, realiza-se na sequência do ensaio de absorção por imersão, utilizando os valores das pesagens aplicados a Equação 3.

$$I = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

I – índice de vazios (%);

msat - Massa das amostras saturadas após imersão (g); e

ms - Massa das amostras secas em estufa (g).

mi - Massa da amostra saturada imersa em água – balança hidrostática (g).

3.2.3.5. *Absorção de água por capilaridade*

Depois do período de cura submersa, os corpos de prova são pesados, obtendo-se a massa úmida. Após secos em estufa a 105 °C até constância de massa, foram resfriados à temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C, aferindo-se a massa seca. As amostras então são colocadas em um recipiente com temperatura constante de aproximadamente 25 °C sob uma lâmina de água de 5 mm acima da sua face inferior (Figura 13).

Figura 13 - Corpos de prova durante ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Autora

Para garantir que a face inferior das amostras não entre em contato com o recipiente, elas foram colocadas acima de arames posicionados a 6mm do fundo do recipiente e espaçados por peças

de madeira. Após 3h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h contadas a partir do contato com a água, os corpos de prova são pesados, retornando ao recipiente imediatamente após cada pesagem. A cada aferição, o excesso de água deve ser removido com um pano úmido.

Após a última pesagem, as amostras devem ser rompidas por compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), possibilitando a verificação da ascensão de água por capilaridade. A absorção por imersão é obtida através da Equação 3.

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (3)$$

Onde:

C - Absorção de água por capilaridade (g/cm²);

A - Massa das amostras em contato com a água (g);

B - Massa das amostras secas (g); e

S - Área da seção transversal (cm²).

3.2.3.6. Carbonatação

Com o intuito de acelerar o processo de deterioração, os corpos de prova utilizados nos ensaios de carbonatação e resistência à compressão e à tração por compressão diametral aos 91 dias foram inseridos, após os 28 dias de cura úmida, em uma câmara hermeticamente fechada (Figura 14) desenvolvida por (MARINHO, 2020).

Figura 14 - Câmara de carbonatação



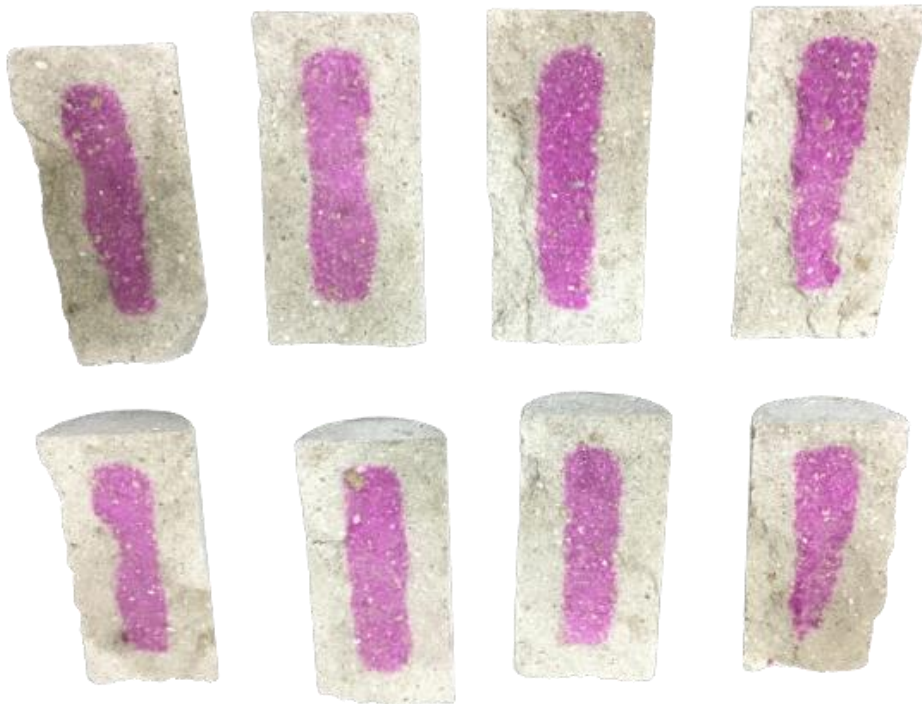
Fonte: Marinho (2020)

O aparato permite a aceleração do processo ao emitir uma quantidade pré-estabelecida de dióxido de carbono (CO_2) e possui um sensor que controla a umidade relativa, que variou nestes ensaios entre 70 e 80%. Definiu-se para o ensaio a concentração de 100% de CO_2 .

De acordo com Bauer (1995), os efeitos da carbonatação são mais detectados em uma fase aquosa de aproximadamente 60 a 80% de umidade. Portanto, segundo Marinho (2020), antes do início da exposição ao CO_2 os corpos de prova devem ser secos em estufa a $60\text{ }^\circ\text{C}$ até constância de massa e depois colocados na câmara para então iniciar o ensaio de carbonatação.

Para realizar a medição da profundidade de carbonatação foi realizado um ensaio com base na norma RILEM CPC-18 (1988). O procedimento se dá através de aspersão de uma solução com o indicador químico fenolftaleína dissolvido em 99g de álcool sob o corpo de prova rompido diametralmente (Figura 15). A fenolftaleína possui faixa de pH entre 8,3 e 10 para mudança de cor, mantendo o material carbonatado incolor e mostrando o material não-carbonatado na cor fúcsia.

Figura 15 - Corpos de prova rompidos aspergidos com a solução de fenolftaleína



Fonte: Autora

Conforme recomendação da norma para permitir melhor visualização da frente de carbonatação, após 24 h da aspersão da solução foram medidas através de um paquímetro as seis maiores profundidades carbonatadas em cada corpo de prova rompido pela diferença de cor no ponto de viragem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados neste capítulo os resultados da caracterização dos materiais utilizados e das propriedades da argamassa no estado fresco e no estado endurecido.

4.1. Caracterização dos materiais

4.1.1. Caracterização do resíduo de vidro

Algumas características físicas do resíduo de vidro podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização do resíduo de vidro

Característica	Resultado
Massa unitária (g/cm ³)	1,27
Índice de volume de vazios (%)	57,48
Massa específica (g/cm ³)	2,10
Absorção de água (%)	0,61

Fonte: Autora

A Tabela 7 apresenta a composição granulométrica do resíduo de vidro. Verificou-se que a dimensão máxima característica (DMC) dos grãos foi de 2,36 mm, enquanto o módulo de finura foi de 2,54. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), esta granulometria se enquadra na zona 3 e equivale a uma areia média.

Tabela 7 - Composição granulométrica do resíduo de vidro

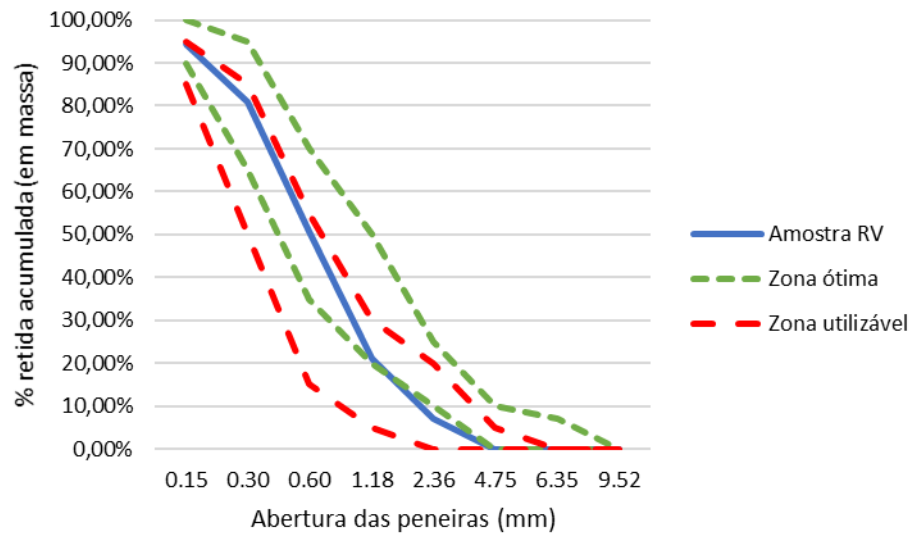
Peneira (mm)	Massa retida (g)			Porcentagens	
	Amostra 1	Amostra 2	Média	% retida	% retida acum.
2,36	21,5	20,0	20,75	7,01	7,01
1,18	41,5	41,7	41,63	14,07	21,08
0,60	92,9	82,9	87,90	29,71	50,79
0,30	86,2	92,6	89,39	30,21	81,00
0,15	39,9	39,6	39,74	13,43	94,43
Fundo	14,5	18,5	16,49	5,57	100,00

Fonte: Autora

A Figura 16 apresenta a curva granulométrica do resíduo de vidro, contínua e bem graduada, indicando que o material se enquadra dentro da zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009), com exceção do material retido na peneira de abertura de malha 2,4 mm, que

ficou dentro do limite inferior de utilização. Na Figura 17 estão dispostos os resíduos de vidro de acordo com as granulometrias encontradas.

Figura 16 - Curva granulométrica do resíduo de vidro



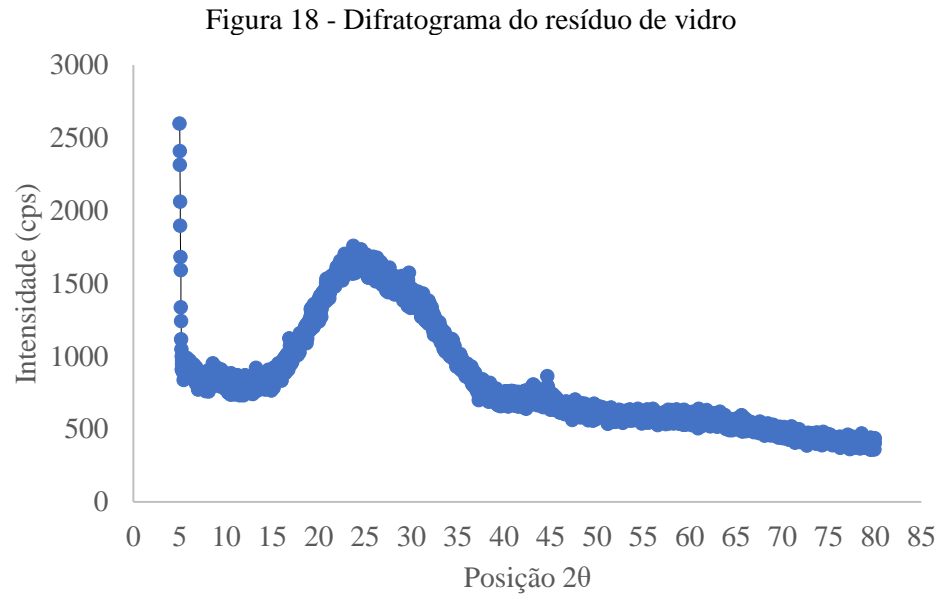
Fonte: Autora

Figura 17 - Composição granulométrica do resíduo de vidro



Fonte: Autora

A DRX realizada com o RV confirma a sua característica halo amorfa, como também foi observado no estudo de Kong *et al.* (2016), e seu difratograma pode ser observado na Figura 18.



Fonte: Autora

O ensaio de FRX confirma a presença de sílica em maior porcentagem na amostra, seguida de óxido de cálcio, óxido de sódio e óxido de alumínio, tal qual o verificado em Kong *et al.* (2016), que identificou 13,2% de Na₂O e reforça que abaixo desta proporção o componente ainda permite que se considere o resíduo de vidro uma pozolana natural (Tabela 8).

Tabela 8 - Análise química semiquantitativa do RV

Composto	Peso %	Composto	Peso %
Na ₂ O	9,23	MnO	0,04
MgO	0,4	Fe ₂ O _{3T}	0,67
Al ₂ O ₃	1,75	NiO	<0,01
SiO ₂	72,72	CuO	<0,01
P ₂ O ₅	0,06	ZnO	0,04
SO ₃	0,28	Rb ₂ O	0,01
Cl	0,04	SrO	0,06
K ₂ O	0,67	ZrO ₂	0,02
CaO	13,7	PbO	0,01
TiO ₂	0,1	Bi ₂ O ₃	<0,01
Cr ₂ O ₃	0,19		

Fonte: Autora

4.1.2. Caracterização da areia

A Tabela 9 apresenta a composição granulométrica da areia. Verificou-se que a dimensão máxima característica (DMC) dos grãos foi de 2,36 mm, enquanto o módulo de finura foi de 2,21. De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), esta granulometria se enquadra na zona 2 e equivale a uma areia fina.

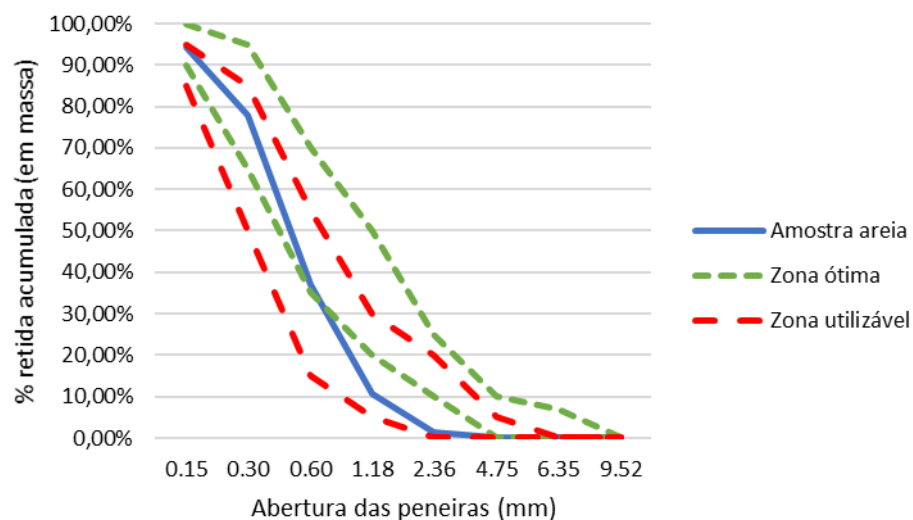
Tabela 9 - Composição granulométrica da areia

Peneira (mm)	Massa retida (g)			Porcentagens	
	Amostra 1	Amostra 2	Média	% retida	% retida acum.
9,52	0	0	0,00	0,00	0,00
6,35	0	0	0,00	0,00	0,00
4,75	0	0,4	0,20	0,07	0,07
2,36	3,4	4,9	4,15	1,38	1,45
1,18	25,6	29,9	27,75	9,25	10,70
0,60	77,1	80,4	78,75	26,25	36,95
0,30	123,2	123,0	123,10	41,03	77,98
0,15	52,9	45,0	48,95	16,32	94,30
Fundo	17,8	16,4	17,10	5,70	100,00

Fonte: Autora

A Figura 19 apresenta a curva granulométrica da areia, contínua e bem graduada, indicando que o material se enquadra parcialmente dentro da zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009), exceto por dois pontos que ficaram dentro do limite inferior de utilização.

Figura 19 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Autora

Outras características físicas da areia podem ser observadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Caracterização da areia

Característica	Resultado
Massa unitária (g/cm ³)	1,39
Índice de volume de vazios (%)	44,75
Massa específica (g/cm ³)	2,57
Absorção de água (%)	0,64

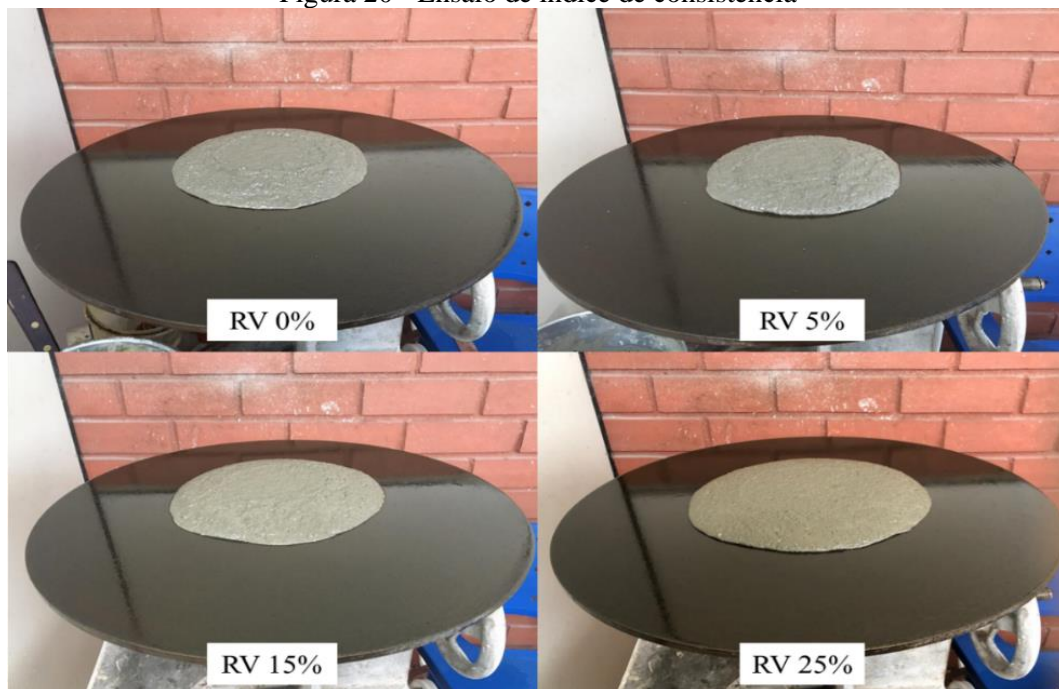
Fonte: Autora

4.2. Propriedade das argamassas no estado fresco

4.2.1. Índice de consistência

A Figura 20 apresenta as argamassas após serem submetidas ao ensaio de índice de consistência.

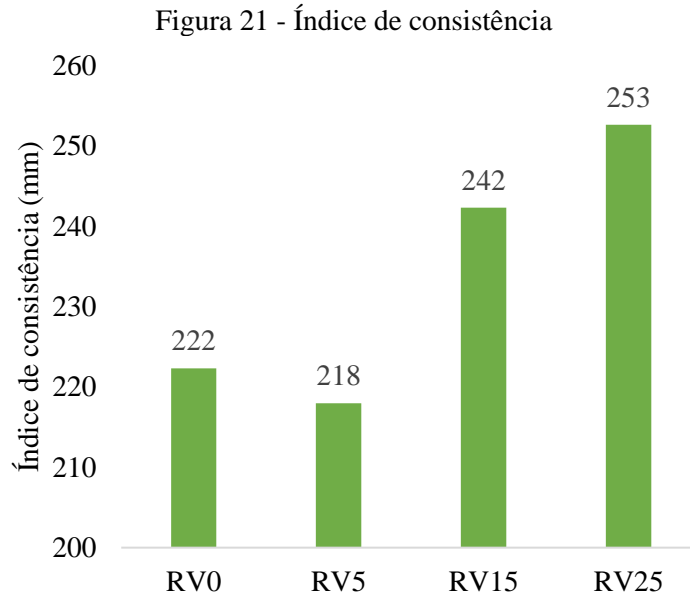
Figura 20 - Ensaio de índice de consistência



Fonte: Autora

Os valores de índice de consistência obtidos estão indicados na Figura 21. Constatou-se que a adição de RV interfere positivamente na trabalhabilidade da matriz cimentícia, pois ao aumentar o teor de resíduo, ela aumenta. Para a família RV5, encontrou-se uma leve redução

de 1,80%, entretanto o aumento de 9% e 13,96% para as argamassas com 15% e 25%, respectivamente, se dá pelo fato do RV absorver menos água do que o agregado miúdo natural.



Fonte: Autora

4.2.2. Densidade de massa

A densidade de massa das argamassas no estado fresco está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Densidade de massa

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
Nº de amostras	4	4	4	4
Média	2,15	2,16	2,09	2,10
Desvio-padrão	0,11	0,11	0,08	0,08
Coefficiente de variação	0,05	0,05	0,04	0,04
Erro padrão	0,05	0,06	0,04	0,04
	2,04	2,05	1,99	2,00
Intervalo de confiança de 95%	2,26	2,27	2,20	2,21

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos estão apresentados na Tabela 12, com os resultados individuais e mais detalhes no Apêndice A. Pela análise de variância pode se concluir que o uso de RV influencia na densidade de massa e o valor-P obtido maior do que 0,05 significa que a relação entre as variáveis não é significativa estatisticamente a 95% de confiança.

Tabela 12 - Análise de variância da densidade de massa

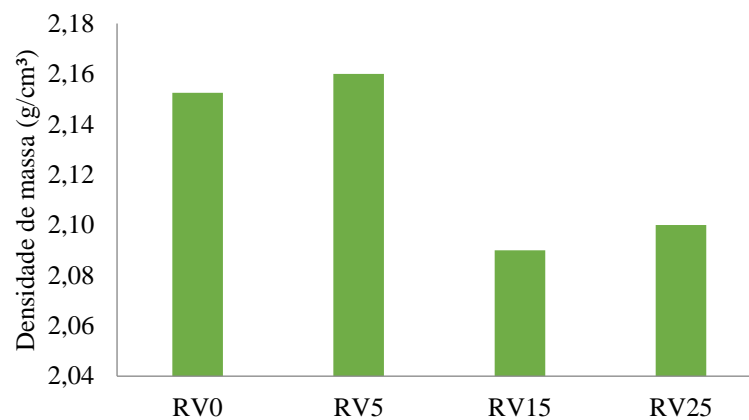
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0146	3,0000	0,0049	0,5216	0,6755	3,4903

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

A Figura 22 apresenta o gráfico de densidade de massa entre as famílias. Nota-se um leve acréscimo de 0,47% entre a família de referência e a argamassa com 5% e uma redução de 2,79% e 2,33% para as famílias de 15% e 25%, respectivamente.

Figura 22 - Densidade de massa



Fonte: Autora

4.3. Propriedades das argamassas no estado endurecido

4.3.1. Resistência à compressão axial

Os resultados médios de resistência à compressão aos 7 dias obtidos para cada família estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resistência à compressão aos 7 dias

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
Nº de amostras	8	8	8	8
Média	15,11	14,57	12,72	9,82
Desvio-padrão	2,41	2,45	2,35	1,59
Coefficiente de variação	0,16	0,17	0,18	0,16
Erro padrão	0,85	0,87	0,83	0,56
Intervalo de confiança de 95%	14,35	13,84	12,08	9,33
	15,86	15,30	13,35	10,31

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados aos 7 dias estão apresentados na Tabela 14, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice B. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV influencia na resistência à compressão aos 7 dias e como o valor-P obtido é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

Tabela 14 - Análise de variância da resistência à compressão aos 7 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	136,4080	3,0000	45,4693	9,1702	0,0002	2,9467

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.
Fonte: Autora

Os resultados médios de resistência à compressão aos 28 dias obtidos para cada família estão apresentados na Tabela 15. É possível notar, em relação ao traço de referência, um leve aumento de 1,32% no teor de 5% e redução de 13,77% no teor de 15% e 21,20% no teor de 25%.

Tabela 15 - Resistência à compressão aos 28 dias

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
Nº de amostras	8	8	8	8
Média	17,36	17,59	14,97	13,68
Desvio-padrão	1,46	3,06	2,43	1,68
Coefficiente de variação	0,08	0,17	0,16	0,12
Erro padrão	0,52	1,08	0,86	0,59
Intervalo de confiança de 95%	16,49	16,71	14,22	13,00
	18,22	18,47	15,71	14,36

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados aos 28 dias estão apresentados na Tabela 16, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice B. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV no geral decresce a resistência à compressão aos 28 dias e como o valor-P obtido é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

Tabela 16 - Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	86,1872	3,0000	28,7291	5,6790	0,0036	2,9467

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.
Fonte: Autora

Os resultados médios de resistência à compressão aos 91 dias obtidos para cada família estão apresentados na Tabela 17. É possível notar, em relação ao traço de referência, um leve aumento de 4,48% no teor de 5% e redução de 21,16% no teor de 15% e 31,98% no teor de 25%.

Tabela 17 - Resistência à compressão aos 91 dias

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
Nº de amostras	8	8	8	8
Média	29,49	28,17	23,25	20,06
Desvio-padrão	4,06	4,25	2,08	1,43
Coefficiente de variação	0,14	0,15	0,09	0,07
Erro padrão	1,44	1,50	0,73	0,51
Intervalo de confiança de 95%	28,01	26,76	22,09	19,06
	30,96	29,58	24,42	21,07

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados aos 91 dias estão apresentados na Tabela 18, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice B. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV decresce a resistência à compressão aos 91 dias. Também pode ser visto que aos 90 dias a variância entre as amostras das famílias RV0 e RV5 são mais acentuadas, indicando que os resultados estão mais dispersos em relação às médias da resistência à compressão. Como o valor-P obtido é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

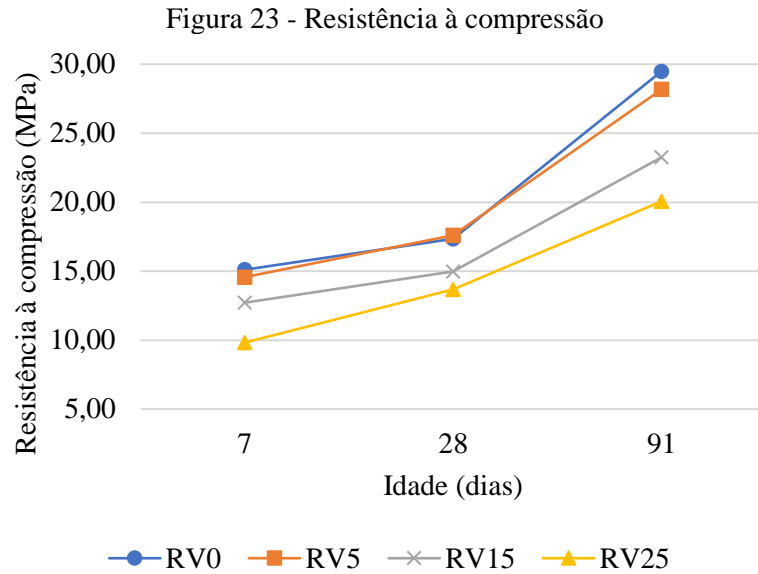
Tabela 18 - Análise de variância da resistência à compressão aos 91 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	459,0359	3,0000	153,0120	14,9753	0,0000	2,9467

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

A Figura 23 apresenta o gráfico de resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias. É possível observar que as famílias de 0% e 5% apresentam resultados similares. É possível notar uma redução máxima da propriedade para 25% de substituição de 21,20% aos 28 dias e de 31,98% aos 91 dias. Este decréscimo na propriedade foi encontrado também na pesquisa Lu, Duan e Poon (2017), que substituíram cimento por RV, e segundo os autores ocorre devido à baixa atividade pozolânica nas primeiras idades da argamassa, e na pesquisa de Rocha (2019), que substituiu areia por resíduo de vidro, e se dá por conta da textura lisa e formato do grão do resíduo de vidro.



Fonte: Autora

4.3.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias obtidos para cada família estão apresentados na Tabela 19. É possível notar, em relação ao traço de referência, um aumento em 9,28% no teor de 5% e uma redução de 15,24% no teor de 15% e 23,57% no teor de 25%.

Tabela 19 - Resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
Nº de amostras	8	8	8	8
Média	4,20	4,59	3,56	3,21
Desvio-padrão	0,59	0,82	0,68	0,49
Coeficiente de variação	0,14	0,18	0,19	0,15
Erro padrão	0,21	0,29	0,24	0,17
Intervalo de confiança de 95%	3,99	4,36	3,38	3,05
	4,41	4,82	3,74	3,37

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados estão apresentados na Tabela 20, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice C. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV influencia na resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias e como o valor-P obtido é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

Tabela 20 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,2756	3	3,0919	7,1484	0,0010	2,9467

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

Os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias obtidos para cada família estão apresentados na Tabela 21. É possível notar uma redução, em relação ao traço de referência, em 19,05% no teor de 5%, 30,51% no teor de 15% e 34,67% no teor de 25%.

Tabela 21 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
Nº de amostras	8	8	8	8,00
Média	6,72	5,44	4,67	4,39
Desvio-padrão	0,43	0,85	0,81	0,38
Coeficiente de variação	0,06	0,16	0,17	0,09
Erro padrão	0,15	0,30	0,29	0,13
	6,39	5,17	4,44	4,17
Intervalo de confiança de 95%	7,06	5,71	4,90	4,61

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados estão apresentados na Tabela 22, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice C. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV influencia na resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias e como o valor-P obtido é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

Tabela 22 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	26,1456	3	8,7152	20,5068	0,0000	2,9467

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

Os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias obtidos para cada família estão apresentados na Tabela 23. É possível notar uma redução, em relação ao traço de referência, em 1,48% no teor de 5%, 27,64% no teor de 15% e 20,22% no teor de 25%.

Tabela 23 - Resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
Nº de amostras	8	8	8	8,00
Média	5,39	5,31	3,90	4,30
Desvio-padrão	0,97	1,28	0,69	0,86
Coefficiente de variação	0,18	0,24	0,18	0,20
Erro padrão	0,34	0,45	0,24	0,31
Intervalo de confiança de 95%	5,12	5,04	3,71	4,09
	5,66	5,57	4,10	4,52

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados estão apresentados na Tabela 24, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice C. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV influencia na resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias e como o valor-P obtido é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

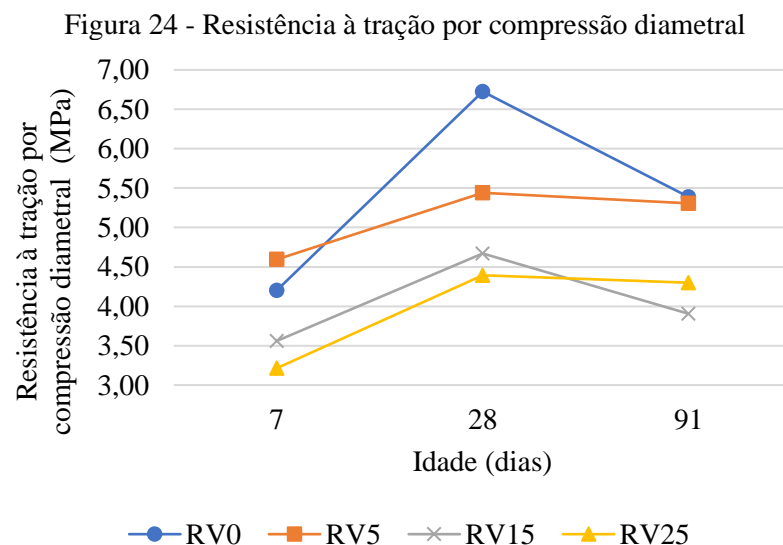
Tabela 24 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral aos 91 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	13,0419	3	4,3473	4,5722	0,0100	2,9467

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

A Figura 24 apresenta o gráfico comparativo de resistência à tração por compressão diametral aos 7, 28 e 91 dias. Não foram encontradas variâncias acentuadas entre amostras analisadas, o que indica que os resultados não estão dispersos em relação às médias.



Malek *et al.* (2020) verificaram aumento não muito significativo nesta propriedade devido ao uso de partículas finas do agregado de vidro, visto que para uma diferença de 15% de adição de resíduo verificaram apenas 3% de aumento. Considera-se o fato do RV utilizado nesta pesquisa ser maior uma das principais razões para a redução na resistência à tração por compressão diametral conforme aumento do teor de RV.

4.3.3. Absorção de água por imersão

A Tabela 25 apresenta os dados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 dias. É possível notar que há redução de 2,75% para 5% de RV e de 0,34% para 15% de RV e acréscimo de 1,28% para 25% de RV.

Tabela 25 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 dias

DADOS	RV0			RV5			RV15			RV25		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h
Nº de amostras	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Absorção mínima	10,90	11,14	11,35	10,65	10,90	11,11	11,07	11,25	11,45	10,84	11,10	11,32
Absorção máxima	11,56	11,74	11,97	11,26	11,38	11,63	11,44	11,57	11,79	11,91	12,04	12,29
Média	11,23	11,43	11,65	10,93	11,08	11,33	11,22	11,41	11,61	11,38	11,54	11,80
Desvio padrão	0,27	0,25	0,25	0,25	0,21	0,23	0,17	0,15	0,15	0,44	0,39	0,40
Coefficiente de variação	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,04	0,03	0,03
Erro padrão	0,14	0,12	0,12	0,13	0,11	0,12	0,08	0,07	0,08	0,22	0,19	0,20
Intervalo de confiança de 95%	10,67	10,86	11,07	10,39	10,53	10,76	10,66	10,84	11,03	10,81	10,96	11,21
	11,80	12,00	12,24	11,48	11,64	11,89	11,78	11,98	12,19	11,95	12,11	12,39

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados estão apresentados na Tabela 26, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice D. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV influencia na absorção de água por imersão aos 28 dias e como o valor-P obtido é maior do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis não é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

Tabela 26 - Análise de variância da absorção por imersão aos 28 dias para 72 horas

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,4678	3	0,1559	2,0793	0,1565	3,4903

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

A Tabela 27 apresenta os dados do ensaio de absorção de água por imersão aos 91 dias. É possível notar que leve aumento de 1,43% para 5% de RV e redução de 1,85% para 15% de RV e 0,84% para 25% de RV.

Tabela 27 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 91 dias

DADOS	RV0			RV5			RV15			RV25		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h
Nº de amostras	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Absorção mínima	11,50	11,65	11,76	11,73	11,89	11,95	11,18	11,33	11,53	11,21	11,38	11,68
Absorção máxima	11,79	11,92	11,97	12,20	12,34	12,20	11,47	11,52	11,94	11,57	11,76	12,04
Média	11,68	11,82	11,90	11,91	12,07	12,07	11,31	11,42	11,68	11,42	11,55	11,85
Desvio padrão	0,13	0,12	0,09	0,21	0,21	0,13	0,13	0,08	0,18	0,16	0,17	0,18
Coeficiente de variação	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Erro padrão	0,06	0,06	0,05	0,11	0,11	0,06	0,06	0,04	0,09	0,08	0,08	0,09
Intervalo de confiança de 95%	11,09	11,23	11,30	11,31	11,46	11,47	10,74	10,85	11,10	10,85	10,97	11,25
	12,26	12,41	12,49	12,50	12,67	12,68	11,88	11,99	12,26	11,99	12,13	12,44

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados estão apresentados na Tabela 28, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice D. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV influencia na absorção de água por imersão aos 91 dias e como o valor-P obtido é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

Tabela 28 - Análise de variância da absorção por imersão aos 91 dias para 72 horas

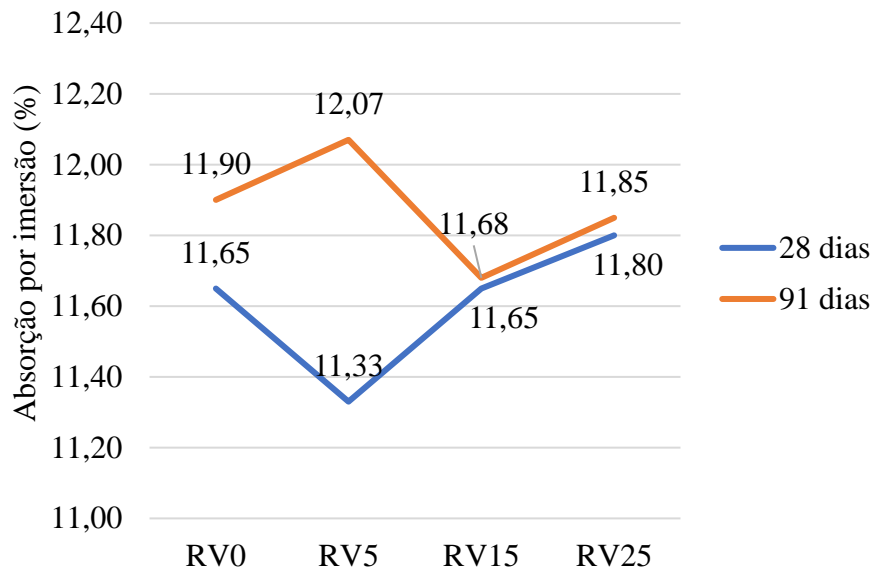
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,3182	3	0,1061	4,7948	0,0203	3,4903

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

Não foram encontradas variâncias acentuadas entre amostras analisadas aos 28 e 91 dias, o que indica que os resultados não estão dispersos em relação às médias. A Figura 25 apresenta o resultado do ensaio de absorção por imersão aos 28 e aos 91 dias. Atribui-se a diferença encontrada para a família RV5 à moldagem de amostras com possivelmente maior porcentagem de finos e mais porosas, conforme visto na pesquisa de Malek *et al.* (2020). É possível notar semelhança no comportamento das amostras com as argamassas analisadas por Sikora *et al.* (2016), que não apresentam grandes variações da absorção por imersão conforme aumenta a adição de resíduo, sendo equivalente a uma variação de 10% para 25% de substituição.

Figura 25 – Absorção de água por imersão



Fonte: Autora

4.3.4. Índice de vazios

A Tabela 29 apresenta os dados do resultado da determinação do índice de vazios das 4 amostras analisadas para cada família aos 28 dias. Há uma redução de 3,40% entre o traço de referência e a família de 5%, de 2,92% para a RV15 e 3,80% para a RV25.

Tabela 29 - Índice de vazios aos 28 dias

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
	I (%)	I (%)	I (%)	I (%)
Média	22,61	21,84	21,95	21,75
Desvio padrão	0,47	0,34	0,19	0,74
Coeficiente de variação	0,02	0,02	0,01	0,03
Erro padrão	0,24	0,17	0,10	0,37
Intervalo de confiança de 95%	21,48	20,75	20,85	20,66
	23,75	22,93	23,05	22,84

Fonte: Autora

Para verificar o índice de vazios aos 28 dias, também foram feitos os cálculos de parâmetros estatísticos dos dados obtidos em cada família que estão apresentados na Tabela 30, bem como a análise de variância (ANOVA), e detalhada no Apêndice E, juntamente com os valores individuais de cada corpo de prova. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV influencia no índice de vazios aos 28 dias e como o valor-P obtido é maior do que 0,05,

conclui-se que a relação entre as variáveis não é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

Tabela 30 - Análise de variância do índice de vazios aos 28 dias (%)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,8553	3	0,6184	2,6645	0,0953	3,4903

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

A Tabela 31 apresenta os dados do resultado da determinação do índice de vazios das 4 amostras analisadas para cada família aos 91 dias. Nota-se uma leve redução de 0,04% entre o traço de referência e a família de 5%, e uma redução mais significativa de 4,60% para a RV15 e 4,69% para a RV25.

Tabela 31 - Índice de vazios aos 91 dias

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
	I (%)	I (%)	I (%)	I (%)
Média	23,02	23,01	21,96	21,94
Desvio padrão	0,20	0,18	0,41	0,50
Coefficiente de variação	0,01	0,01	0,02	0,02
Erro padrão	0,10	0,09	0,20	0,25
Intervalo de confiança de 95%	21,87	21,86	20,86	20,84
	24,17	24,16	23,06	23,03

Fonte: Autora

Para verificar o índice de vazios aos 91 dias, também foram feitos os cálculos de parâmetros estatísticos dos dados obtidos em cada família apresentados na Tabela 32, bem como a análise de variância (ANOVA), e detalhada no Apêndice E, juntamente com os valores individuais de cada corpo de prova. Pela análise de variância é possível concluir que há influência no índice de vazios aos 91 dias e como o valor-P é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%.

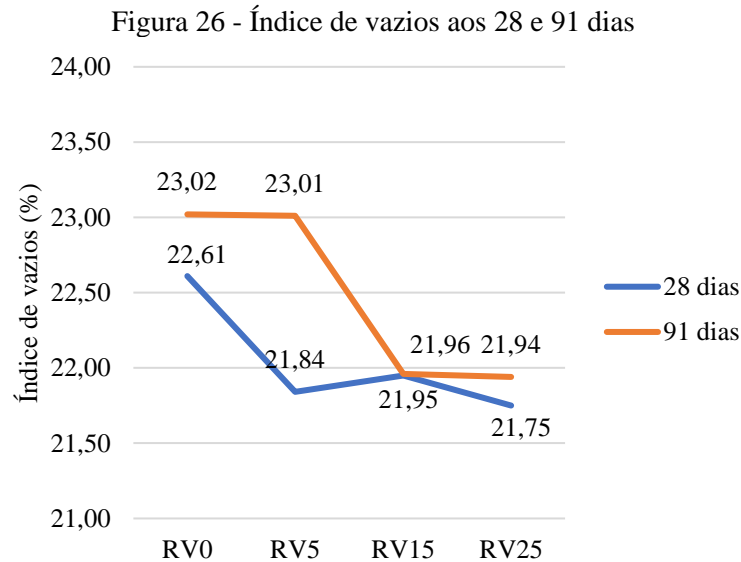
Tabela 32 - Análise de variância do índice de vazios aos 91 dias (%)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,5519	3	1,5173	12,49	0,0005	3,4903

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

A Figura 26 apresenta o gráfico referente aos índices de vazios aos 28 e aos 91 dias. Atribui-se a diferença encontrada para a família RV5 à moldagem de amostras com possivelmente maior porcentagem de finos e mais porosas, semelhante ao comportamento da absorção por imersão.



Fonte: Autora

4.3.5. Absorção de água por capilaridade

A Tabela 33 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias. Nota-se redução de 3,67% entre o traço de referência e a família de 5%, de 21,10% para a RV15 e 12,84% para a RV25.

Tabela 33 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias

Dados	RV0			RV5			RV15			RV25		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h
Nº de amostras	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Absorção mínima	0,92	1,05	1,05	0,60	0,87	1,01	0,59	0,74	0,77	0,72	0,87	0,90
Absorção máxima	1,03	1,11	1,15	0,66	0,96	1,11	0,77	0,88	0,90	0,83	1,01	1,04
Média	0,97	1,08	1,09	0,63	0,91	1,05	0,71	0,83	0,86	0,76	0,92	0,95
Desvio padrão	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,08	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06
Coefficiente de variação	0,05	0,03	0,04	0,06	0,05	0,04	0,11	0,08	0,07	0,06	0,07	0,07
Erro padrão	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
Intervalo de confiança de 95%	0,93	1,03	1,04	0,60	0,86	1,00	0,67	0,79	0,81	0,72	0,87	0,90
	1,02	1,14	1,15	0,66	0,95	1,10	0,74	0,87	0,90	0,79	0,96	0,99

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados estão apresentados na Tabela 34, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice F. Pela análise de variância, que indica que os resultados não estão dispersos em relação às médias, é possível concluir que o uso de RV influencia na absorção de água por capilaridade aos 28 dias e como o valor-P obtido é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%, entretanto serão realizados testes com um maior grupo de amostras para confirmação.

Tabela 34 - Análise de variância da absorção por capilaridade aos 28 dias para 72 horas

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,1357	3	0,0452	16,5742	0,0001	3,4903

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

A Tabela 35 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 91 dias. Nota-se um aumento de 2,53% entre o traço de referência e a família de 5% e redução de 5,06% para a RV15 e 12,65% para a RV25.

Tabela 35 - Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 91 dias

Dados	RV0			RV5			RV15			RV25		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h
Nº de amostras	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Absorção mínima	1,11	1,34	1,50	1,23	1,41	1,54	0,99	1,10	1,25	1,06	1,24	1,27
Absorção máxima	1,35	1,52	1,65	1,30	1,54	1,68	1,42	1,71	1,92	1,08	1,27	1,45
Média	1,24	1,43	1,58	1,27	1,48	1,62	1,15	1,33	1,50	1,07	1,25	1,38
Desvio padrão	0,10	0,08	0,06	0,03	0,06	0,06	0,19	0,27	0,29	0,01	0,02	0,08
Coefficiente de variação	0,08	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,17	0,20	0,20	0,01	0,01	0,06
Erro padrão	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,10	0,13	0,15	0,00	0,01	0,04
Intervalo de confiança de 95%	1,18	1,36	1,50	1,21	1,41	1,54	1,09	1,26	1,43	1,02	1,19	1,31
	1,30	1,50	1,66	1,33	1,55	1,70	1,21	1,40	1,58	1,12	1,31	1,45

Fonte: Autora

Os cálculos de parâmetros estatísticos dos resultados estão apresentados na Tabela 36, com os resultados individuais e mais detalhes apresentados no Apêndice F. Pela análise de variância, é possível concluir que o uso de RV influencia na absorção de água por capilaridade aos 91 dias e como o valor-P obtido é maior do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis não é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%, entretanto serão realizados testes com um maior grupo de amostras para confirmação.

Tabela 36 - Análise de variância da absorção por capilaridade aos 91 dias para 72 horas

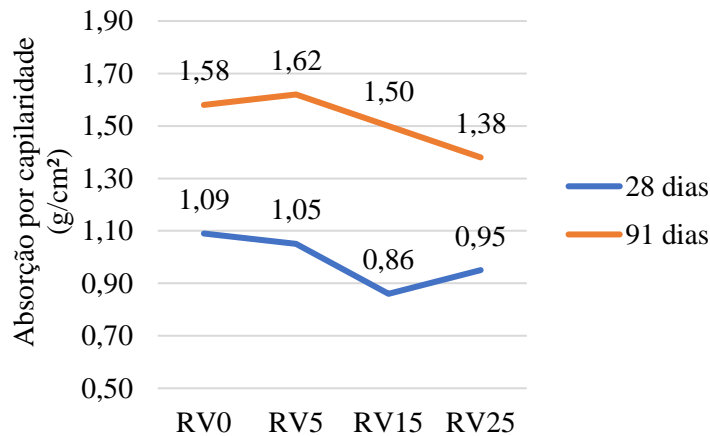
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,1285	3	0,0428	1,7196	0,2160	3,4903

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

A Figura 27 apresenta o gráfico de absorção de água por capilaridade aos 28 e 91 dias. É possível notar semelhança no comportamento nas duas idades e que corroboram com os resultados encontrados por Tuam, Shitote e Oyawa (2018), que apresentam redução na absorção conforme o teor de resíduo de vidro aumenta.

Figura 27 - Absorção de água por capilaridade aos 28 e 91 dias



Fonte: Autora

4.3.6. Profundidade carbonatada

Os resultados médios de profundidade de carbonatação aos 91 dias obtidos para cada família estão apresentados na Tabela 37. É possível notar um aumento, em relação ao traço de referência, em 3,44% no teor de 5%, 16,37% no teor de 15% e 25,24% no teor de 25%.

Tabela 37 - Profundidade carbonatada aos 91 dias (mm)

Dados	RV0	RV5	RV15	RV25
Nº de amostras	8	8	8	8
Média	14,54	15,04	16,92	18,21
Desvio-padrão	1,40	0,71	0,75	1,73
Coefficiente de variação	0,10	0,05	0,04	0,09
Erro padrão	0,49	0,25	0,27	0,61
Intervalo de confiança de 95%	13,81	14,29	16,07	17,30
	15,27	15,79	17,76	19,12

Fonte: Autora

Para verificar a profundidade de carbonatação aos 91 dias, também foram feitos os cálculos de parâmetros estatísticos dos dados obtidos em cada família que estão apresentados na Tabela 38, bem como a análise de variância (ANOVA), e detalhada no Apêndice G, juntamente com os valores individuais de cada corpo de prova. Pela análise de variância é possível concluir que o uso de RV influencia na resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias e como o valor-P obtido é menor do que 0,05, conclui-se que a relação entre as variáveis é significativa estatisticamente a um nível de confiança de 95%, entretanto serão realizados testes com um maior grupo de amostras para confirmação.

Tabela 38 - Análise de variância da profundidade carbonatada aos 91 dias (mm)

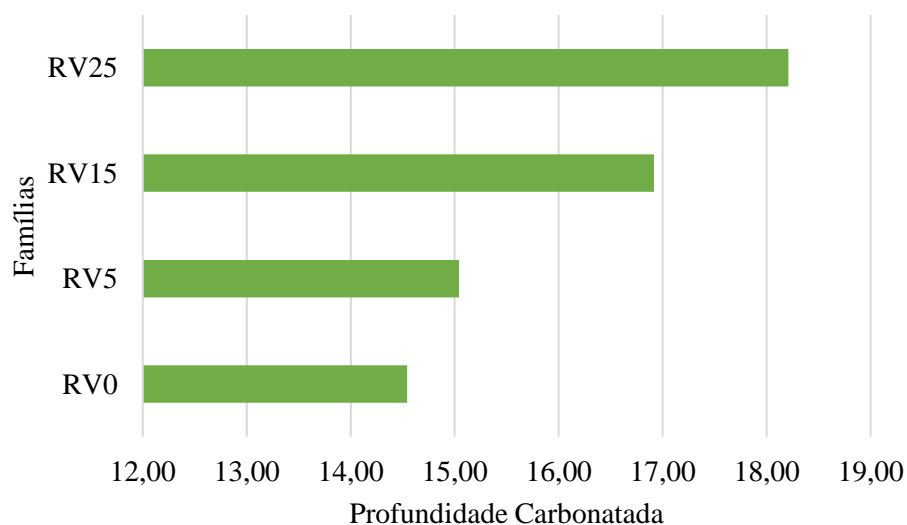
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	69,0938	3	23,0313	15,3389	0,0000	2,9467

Legenda: SQ – soma dos quadrados; gl - grau de liberdade; MQ – média dos quadrados, F – teste F, valor calculado; P – Nível de significância associado ao valor calculado F.

Fonte: Autora

A Figura 28 apresenta os resultados da profundidade carbonatada das famílias em mm. Verificou-se uma diferença absoluta entre o grupo que utilizou maior porcentagem de substituição de vidro e o grupo de controle de 3,67 mm, quase o triplo do que encontrado no trabalho de Sales *et al.* (2017) que substituiu cimento com pó de vidro. Isto pode estar relacionado a maior porosidade das amostras com resíduo em relação à amostra de referência.

Figura 28 - Profundidade carbonatada



Fonte: Autora

O conjunto dos resultados obtidos nesta pesquisa está demonstrado no Quadro 8. Os valores para o traço de referência estão expostos em valores absolutos e para as demais famílias em variação percentual em relação à família RV0. Os resultados indicados em vermelho são referentes aos valores que influenciam negativamente nas propriedades em relação ao traço de referência.

Quadro 9 – Resumo dos resultados de caracterização das argamassas nos estados fresco e endurecido

Estado Físico	Propriedade	RV0	RV5*	RV15*	RV25*	
Fresco	Índice de consistência	222 mm	-1,80	9,01	13,96	
	Densidade de massa	2,15 (g/cm ³)	0,47	-2,79	-2,33	
Endurecido	Resistência à compressão	7 dias	15,11 MPa	-3,57	-15,82	-34,97
		28 dias	17,36 MPa	1,35	-13,76	-21,18
		91 dias	29,49 MPa	-4,46	-21,14	-31,96
	Resistência à tração por compressão diametral	7 dias	4,20 MPa	9,33	-15,29	-23,51
		28 dias	6,72 MPa	-19,10	-30,55	-34,67
		91 dias	5,39 MPa	-1,50	-27,54	-20,16
	Absorção por imersão	28 dias	11,65 %	-2,83	-0,39	1,21
		91 dias	11,90 %	1,43	-1,85	-0,42
	Índice de vazios	28 dias	22,61 %	-3,41	-2,92	-3,80
		91 dias	23,02 %	-0,04	-4,60	-4,69
	Absorção por capilaridade	28 dias	1,09 g/cm ²	-3,67	-21,10	-12,84
		91 dias	1,58 g/cm ²	2,53	-5,06	-12,66
	Carbonatação	91 dias	14,54 mm	3,44	16,37	25,24

*Variação percentual em relação à família RV0

Fonte: Autora

É possível observar que a família RV25 apresenta valores acentuadamente menores que os da família RV0, principalmente quanto à resistência à compressão e à tração por compressão diametral. Portanto considera-se inviável tecnicamente a substituição do RV nesta proporção. Quanto à família RV5, é possível admitir que sua utilização não afeta de maneira rigorosa as propriedades analisadas, podendo então ser objeto de estudo em novas pesquisas.

De modo geral, considera-se que a família RV15 apresenta melhores resultados dentre as proporções estudadas para substituição, principalmente quanto à vantagem ecológica do uso do resíduo, e sugere-se que sejam realizados estudos utilizando outras relações água/cimento e porcentagens de substituição até 15% para análise do comportamento dos materiais e suas propriedades. Ressalta-se ainda a necessidade de ensaios que analisem a interface entre o cimento e o agregado reciclado para definir a quantidade de RV ideal que seja técnica e economicamente viável dentro da faixa de 0% a 15% de substituição.

Vale salientar que para garantir resultados significativos estatisticamente a um nível de confiança de 95% para todas as propriedades estudadas é necessário ampliar a quantidade de amostras analisadas no intuito de diminuir a diferença entre as médias encontradas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração o impacto ambiental causado pela geração de resíduos, é fundamental o desenvolvimento de pesquisas que busquem alternativas para sua destinação correta. Dentre as diversas possibilidades em estudo na área da construção civil, a utilização dos resíduos de vidro se mostra como uma opção importante para substituição de matéria-prima em compósitos cimentícios, visto que há uma grande quantidade deste material sendo descartada anualmente, muitas vezes de maneira incorreta.

Neste trabalho, buscou-se avaliar a influência da adição de resíduo de vidro em substituição parcial do agregado miúdo em argamassas de cimento Portland, visando a produção de concreto. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de Ø 5 x 10 cm com substituição parcial do agregado miúdo em 5%, 15% e 25% por resíduo de vidro triturado proveniente de garrafas *long neck* coletadas e beneficiadas na Ilha de Fernando de Noronha-PE, local que apresenta grandes limitações quanto à capacidade de armazenamento de resíduos.

Com os resultados obtidos nesta pesquisa, é possível concluir que, por possuir granulometria contínua, bem graduada e similar à granulometria da areia, o resíduo de vidro pode ser utilizado em substituição do agregado miúdo em argamassas. Entretanto, a proporção ideal de substituição deve estar vinculada ao seu comportamento perante as propriedades no estado endurecido.

O resultado do DRX mostra que é possível utilizar o RV como substituto do agregado miúdo, porém se faz necessário a realização de ensaio de microscopia eletrônica de varredura para checar a interface entre o cimento e o agregado reciclado. O resultado do FRX permite a classificação do resíduo de vidro utilizado como uma pozolana natural.

Quanto à consistência, verificou-se que a adição de resíduo de vidro interfere positivamente na trabalhabilidade da matriz cimentícia, pois quanto mais resíduo é adicionado, mais trabalhável fica o material, visto que o RV absorve menos água do que o agregado miúdo natural utilizado. Quanto à densidade de massa, de modo geral há redução conforme o teor de resíduo aumenta, devido à massa específica do RV ser 18,28% menor que a da areia.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão demonstram que as argamassas preparadas com a dosagem indicada não podem ser utilizadas para fins estruturais, pois não atingiram a resistência à compressão mínima de 20 Mpa. O decréscimo máximo de 21,20% aos 28 dias e 31,98% aos 91 dias na resistência à compressão está relacionado à baixa atividade pozolânica nas primeiras idades da argamassa e também por conta da textura lisa e formato do grão do resíduo de vidro. Em relação ao trabalho de Rocha (2019) que utilizou relação água/cimento menor do que esta pesquisa e resíduo de vidro com maior granulometria, a redução da resistência à compressão está relacionada ao fato de se ter obtido um material menos consistente e, portanto, menos resistente.

Já os resultados de resistência à tração por compressão diametral mostram que para todos os teores de substituição ocorrem picos de resistência aos 28 dias e posterior queda aos 90 dias. Malek *et al.* (2020) verificaram aumento nesta propriedade relacionado à utilização de partículas finas do agregado de vidro, variando de 0 a 1,5 mm, entretanto não consideraram um aumento significativo visto que para uma diferença de 15% de adição de resíduo verificaram apenas 3% de aumento. Como o resíduo de vidro utilizado nesta pesquisa é maior que a dos autores, considera-se esta uma das principais razões para a redução na resistência à tração por compressão diametral conforme aumento do teor de RV.

Em relação aos ensaios de absorção por imersão não se notou grandes variações nos resultados, variando entre 0 e 3%, tanto para 28 quanto para 91 dias, fato possivelmente relacionado à moldagem de amostras com maior teor de finos porcentagem de finos e mais porosas, com semelhanças aos resultados encontrados por Malek *et al.* (2020) e Sikora *et al.* (2016). Já para a absorção por capilaridade houve uma variação maior entre 3% a 21% aos 28 dias e de 2% a 13% aos 91 dias, mas que ainda estão em conformidade com os resultados encontrados por Tuaum, Shitote e Oyawa (2018).

O índice de vazios também não apresentou diferença significativa para os valores encontrados aos 28 e 91 dias, variando entre 0 e 5%. Quanto à profundidade de carbonatação, é possível notar um aumento da área carbonatada conforme o teor de resíduo também aumenta, fator este relacionado à porosidade dos corpos de prova.

De modo geral, conclui-se que a substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro apresenta vantagens técnicas e ecológicas até a proporção de 15%, ainda que sejam necessários

mais estudos para atingir a proporção ideal de substituição que garanta o melhor benefício em todas as propriedades. Ressalta-se ainda a importância de realizar ensaios na pasta de argamassa para verificar interface entre o cimento e o agregado reciclado e classificar quanto à presença de poros. Vale salientar que a preparação e o beneficiamento com maior controle de qualidade sobre os resíduos gerados provenientes de garrafas *long neck* pode vir a ser favorável a futuras pesquisas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Realização de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e porosimetria;
- Identificação do módulo de elasticidade para avaliar a deformação, fluência e fadiga do material;
- Análise do comportamento dos materiais utilizando outras relações água/cimento e porcentagens de substituição;
- Análise físico-química comparativa entre RV proveniente de outras matérias-primas;
- Estudo da viabilidade econômica da utilização do RV para substituições em concreto em obras;
- Investigação da influência de outras adições associadas ao RV.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, D. R. R. **ANÁLISE QUALI-QUANTITATIVA DOS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS GERADOS NA ILHA DE FERNANDO DE NORONHA**. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Desenvolvimento e Meio Ambiente, A Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/14915/1/DHIEGO%20RAPHAEL%20RODRIGUES%20ARAUJO.pdf>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 14**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 16**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Versão Corrigida:2019. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Versão Corrigida:2009. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Versão Corrigida:2013. Rio de Janeiro, 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos -Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16137**: Ensaios não destrutivos - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

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

BARKAUSKAS, K.; NAGROCKIENĖ, D.; NORKUS, A. The effect of ground glass waste on properties of hardened cement paste and mortar. **Ceramics - Silikaty**, v. 64, n. 4, p. 478–487, 2020.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

CEMPRE, Compromisso Empresarial para Reciclagem, 2017. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>>

CZAPIK, P. Microstructure and degradation of mortar containing waste glass aggregate as evaluated by various microscopic techniques. **Materials**, v. 13, n. 9, p. 25–30, 2020.

ELAQRA, H. A. *et al.* Effect of immersion time of glass powder on mechanical properties of concrete contained glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 674–682, 2019.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. *et al.* Fresh-State Properties of Mortars with Recycled Glass Aggregates: Global Unification of Behavior. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, n. 1, p. 1–11, 2018.

GUIMARÃES, L. F., BRITO, F. S. L. DESCARTE INADEQUADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA PRAIA DE MARUDÁ MARAPANIM-PA. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2017, Campo Grande. **Anais [...]**. Campo Grande: Ibeas – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2017. 8 p. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/III-002.pdf>.

HARISH, B. A. *et al.* An Experimental Investigation on Partial Replacement of Cement by Glass Powder in Concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 3, n. 10, p. 1218–1224, 2016.

KE, G. *et al.* Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali-Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 67, p. 1–14, 2018.

KIM, S. K. *et al.* Effects of Particle Size and Cement Replacement of LCD Glass Powder in Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, n. 1, p. 1–12, 2017.

KONG, Y. *et al.* SEM analysis of the interfacial transition zone between cement-glass powder paste and aggregate of mortar under microwave curing. **Materials**, v. 9, n. 9, p. 1–12, 2016.

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, p. 574–588, 2019.

LIU, T. *et al.* Experimental investigation on the durability performances of concrete using cathode ray tube glass as fine aggregate under chloride ion penetration or sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 634–642, 2018.

LU, J.; DUAN, Z.; POON, C. S. Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 82, p. 34–44, 2017.

LU, J.-X.; POON, C. S. Use of waste glass in alkali activated cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 399–407, 2018.

MALEK, M. *et al.* Effect of Waste Glass Addition as a Replacement for Fine Aggregate on Properties of Mortar. **Materials**, v. 13, n. 14, p. 1–19, 2020.

MARINHO, A. G. **Análise da influência dos espaçadores empregados em obras de construção civil na garantia da durabilidade das estruturas de concreto armado.** 2020. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2020. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1Xs_c8mqpwz7J3vFtsfBLGXdt8pbT1UA-/view>

MARTINS, R. **Desempenho estrutural e durabilidade à carbonatação de alvenarias de blocos de concreto**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 2017.

MOTA, A. C. M. **Avaliação da presença de cloretos livres em argamassas através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2011.

NASCIMENTO, H. R. F. do, PETARNELLA, L. A reciclagem de vidros e o impacto socioambiental: O caso da Corporação de Apoio à Criança Queimada (Coaniquem). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 6., 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: VI Singep, 2017. Disponível em: <http://www.singep.org.br/6singep/resultado/630.pdf>.

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

POSTAY, R. **Correlação entre compacidade, energia incorporada e emissões de CO₂, em projetos de habitação de interesse social**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

RILEM RECOMMENDATIONS. **CPC-18**: Measurement of hardened concrete carbonation depth. 1988. p. 453-455.

ROCHA, G. G. O. de P. **Influência do uso de resíduo de vidro no concreto contaminado por íons cloreto, íons sulfato e CO₂**. Dissertação de mestrado. Universidade Católica de Pernambuco, 2019.

SALES, R. B. C. *et al.* Durability of Mortar Made with Fine Glass Powdered Particles. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, n. 1, p. 1–9, 2017.

SIKORA, P. *et al.* Characterization of Mechanical and Bactericidal Properties of Cement Mortars Containing Waste Glass. **Materials**, v. 9, n. 8, p. 1–16, 2016.

TARIQ, S. *et al.* Durability of high volume glass powder self-compacting concrete. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 22, p. 1–20, 2020.

TITTARELLI, F.; GIOSUÈ, C.; MOBILI, A. Recycled Glass as Aggregate for Architectural Mortars. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 1, 2018.

TUAUM, A.; SHITOTE, S.; OYAWA, W. Experimental Study of Self-Compacting Mortar Incorporating Recycled Glass Aggregate. **Buildings**, v. 8, n. 15, p. 1–18, 2018.

WANG, Y. *et al.* Effective utilization of waste glass as cementitious powder and construction sand in mortar. **Materials**, v. 13, n. 3, p. 1–21, 2020.

ANEXO B – RESULTADOS DE ENSAIOS EM ESPECTRÔMETRO DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)



Nº boletim: 26/2021

28/10/2021

Solicitante: Carlos Fernando G. Nascimento
(81) 98459-2566
Carlosfernando.gn@gmail.com

Página 1/3

Material: Amostras recebidas como pó.

Método: As amostras foram secas em estufa a 110°C. Uma porção da amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio com 30 toneladas de força. A pastilha prensada foi analisada em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados estão expressos em peso%. N.D = não detectado.

Data de recebimento: 28/10/2021

Data da realização das análises: 18/11/2021

Resultados de análises químicas semiquantitativas

	Grafeno 0,03	Grafeno 0,06	Grafeno 0,09	Grafeno 0,12	Grafeno 0,15
Na ₂ O	0,06	0,05	0,10	N.D	0,08
MgO	1,05	1,00	1,06	1,02	0,97
Al ₂ O ₃	3,95	4,04	4,20	4,19	3,99
SiO ₂	44,81	45,27	42,96	42,85	43,53
P ₂ O ₅	0,55	0,55	0,57	0,58	0,56
SO ₃	2,83	2,87	2,98	2,95	2,86
Cl	0,07	0,07	0,07	0,05	0,07
K ₂ O	0,55	0,55	0,60	0,59	0,61
CaO	43,70	43,12	44,91	45,18	44,82
TiO ₂	0,39	0,42	0,41	0,42	0,41
V ₂ O ₅	N.D	N.D	0,03	N.D	N.D
Cr ₂ O ₃	0,03	0,02	N.D	0,03	0,03
MnO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
Fe ₂ O _{3T}	1,79	1,81	1,89	1,89	1,80
NiO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CuO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ZnO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Rb ₂ O	N.D	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
SrO	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Y ₂ O ₃	<0,01	N.D	<0,01	<0,01	<0,01
ZrO ₂	0,15	0,13	0,12	0,15	0,15
Nb ₂ O ₅	N.D	N.D	<0,01	N.D	<0,01
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Boletim nº 26/21

Página 2/3

Resultados de análises semiquantitativas

	REF	Resina Vidro	Cimento	Grafeno Pó	Grafeno Pasta
Na ₂ O	0,10	9,23	0,09	N.D	0,04
MgO	1,02	0,40	1,26	0,08	0,10
Al ₂ O ₃	4,31	1,75	5,21	33,92	32,81
SiO ₂	42,24	72,72	18,81	51,65	51,11
P ₂ O ₅	0,57	0,06	0,56	0,18	0,19
SO ₃	2,99	0,28	4,30	0,06	0,06
Cl	0,06	0,04	0,03	N.D	0,02
K ₂ O	0,58	0,67	1,44	0,35	0,38
CaO	45,54	13,70	64,60	0,10	0,12
TiO ₂	0,41	0,10	0,37	1,62	1,77
V ₂ O ₅	N.D	N.D	0,03	N.D	0,13
Cr ₂ O ₃	0,02	0,19	0,02	0,08	0,10
MnO	N.D	0,04	N.D	0,04	0,05
Fe ₂ O _{3T}	1,92	0,67	3,05	11,71	12,89
NiO	0,01	<0,01	0,01	0,02	0,02
CuO	0,01	<0,01	0,02	0,03	0,04
ZnO	0,03	0,04	0,03	0,01	0,01
Ga ₂ O ₃	N.D	N.D	N.D	0,01	0,01
Rb ₂ O	<0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01
SrO	0,04	0,06	0,07	0,04	0,05
Y ₂ O ₃	N.D	N.D	<0,01	0,01	0,01
ZrO ₂	0,15	0,02	0,02	0,02	0,02
BaO	N.D	N.D	0,07	0,08	0,07
PbO	N.D	0,01	N.D	N.D	N.D
Bi ₂ O ₃	N.D	<0,01	N.D	N.D	N.D
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Boletim nº 26/21

Página 3/3

Resultados de análises semiquantitativas

	Areia Fina
MgO	0,01
Al ₂ O ₃	0,54
SiO ₂	98,76
P ₂ O ₅	0,02
SO ₃	0,03
K ₂ O	0,02
CaO	0,15
TiO ₂	0,24
Cr ₂ O ₃	0,02
Fe ₂ O _{3T}	0,11
ZrO ₂	0,10
Total	100,00

Gilsa Maria de Santana
CRQ 1ª. Região 01103883

Profa. Dra. Valdevez P. Ferreira
Responsável pelo LFRX

Obs.: O presente relatório de resultados só deve ser reproduzido completo. Qualquer análise, ensaio ou teste relacionado a qualquer trabalho efetuado pelo Laboratório de Fluorescência de Raios-X é conduzido de acordo com os melhores serviços de laboratórios analíticos. Nem o laboratório nem seus responsáveis e estagiários assumem responsabilidade direta ou indireta por eventuais erros ou omissões, além da reposição do serviço ou do valor pago pelo cliente pelo próprio serviço.

APÊNDICE A – DENSIDADE DE MASSA

Densidade de massa (g/cm³)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	2,19	2,21	2,14	2,15
CP 2	2,26	2,26	2,17	2,18
CP 3	2,15	2,17	2,07	2,08
CP 4	2,01	2,00	1,99	1,99

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	4	8,61	2,1525	0,0111
RV5	4	8,64	2,1600	0,0127
RV15	4	8,37	2,0925	0,0064
RV25	4	8,40	2,1000	0,0071

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,0146	3,0000	0,0049	0,5216	0,6755	3,4903
Dentro dos grupos	0,1122	12	0,0093			
Total	0,1268	15				

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	19,45	17,38	11,18	11,52
CP 2	14,63	18,24	13,93	12,00
CP 3	16,82	15,15	15,54	10,28
CP 4	16,51	14,51	15,42	9,17
CP 5	13,18	14,77	14,31	9,89
CP 6	13,07	10,80	10,73	10,24
CP 7	15,04	12,96	9,44	8,26
CP 8	12,15	12,73	11,18	7,23

Anova: fator único

RESUMO - Resistência à compressão aos 7 dias

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	8	120,85	15,1063	5,8004
RV5	8	116,54	14,5675	5,9908
RV15	8	101,73	12,7163	5,5280
RV25	8	78,59	9,8238	2,5142

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	136,4080	3	45,4693	9,1702	0,0002	2,9467
Dentro dos grupos	138,8341	28	4,9584			
Total	275,2421	31				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	18,98	15,82	15,05	14,32
CP 2	17,11	19,44	16,61	10,11
CP 3	15,88	20,02	14,43	13,99
CP 4	15,09	14,59	17,65	13,21
CP 5	18,85	21,31	16,42	13,93
CP 6	17,76	15,97	15,09	13,15
CP 7	18,70	13,16	14,90	15,76
CP 8	16,47	20,41	9,58	14,97

Anova: fator único

RESUMO - Resistência à compressão aos 28 dias

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	8	138,84	17,3550	2,1425
RV5	8	140,72	17,5900	9,3572
RV15	8	119,73	14,9663	5,9063
RV25	8	109,44	13,6800	2,8293

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	86,1872	3	28,7291	5,6790	0,0036	2,9467
Dentro dos grupos	141,6474	28	5,0588			
Total	227,8345	31				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resistência à compressão aos 91 dias (MPa)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	24,43	20,65	18,93	17,50
CP 2	24,47	24,59	22,01	19,37
CP 3	29,22	30,11	22,43	19,43
CP 4	31,18	31,46	24,02	19,80
CP 5	34,22	24,66	24,11	19,93
CP 6	26,10	30,77	24,47	21,00
CP 7	32,40	31,35	24,76	21,36
CP 8	33,88	31,79	25,30	22,12

Anova: fator único

RESUMO - Resistência à compressão aos 91 dias

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	8	235,90	29,4875	16,4769
RV5	8	225,38	28,1725	18,0359
RV15	8	186,03	23,2538	4,3108
RV25	8	160,51	20,0638	2,0469

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	459,0359	30	153,0120	14,9753	0,0000	2,9467
Dentro dos grupos	286,0935	28	10,2176			
Total	745,1294	31				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Resistência à tração aos 7 dias (MPa)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	3,86	3,49	4,69	4,16
CP 2	4,22	4,49	3,53	3,06
CP 3	4,71	4,49	3,45	2,41
CP 4	5,14	4,04	2,59	3,22
CP 5	3,53	5,22	2,71	3,37
CP 6	4,22	6,04	3,71	3,30
CP 7	3,39	5,08	3,84	3,28
CP 8	4,55	3,90	3,96	2,92

Anova: fator único

RESUMO - Resistência à tração aos 7 dias

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	8	33,6174	4,2022	0,3534
RV5	8	36,7555	4,5944	0,6770
RV15	8	28,4787	3,5598	0,4599
RV25	8	25,7132	3,2141	0,2398

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	9,2756	3	3,0919	7,1484	0,0010	2,9467
Dentro dos grupos	12,1106	28	0,4325			
Total	21,3862	31				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Resistência à tração aos 28 dias (MPa)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	6,34	5,51	5,37	5,10
CP 2	7,22	5,55	5,00	3,92
CP 3	7,32	3,69	4,00	4,18
CP 4	6,75	6,43	5,61	4,24
CP 5	6,81	5,39	3,28	4,26
CP 6	6,47	4,92	5,30	4,81
CP 7	6,86	6,14	4,14	4,43
CP 8	6,04	5,88	4,67	4,22

Anova: fator único

RESUMO - Resistência à tração aos 28 dias

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	2	53,7996	6,7249	0,1860
RV5	2	43,5221	5,4403	0,7187
RV15	2	37,3635	4,6704	0,6506
RV25	2	35,1472	4,3934	0,1446

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	26,1456	3	8,7152	20,5068	0,0000	2,9467
Dentro dos grupos	11,8997	28	0,4250			
Total	38,0453	31				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Resistência à tração aos 91 dias (MPa)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	7,00	7,02	3,45	6,04
CP 2	4,30	6,34	3,63	4,35
CP 3	5,33	7,04	3,47	4,49
CP 4	4,77	4,43	3,24	3,37
CP 5	5,86	3,98	4,57	3,96
CP 6	5,00	4,49	5,12	3,45
CP 7	6,41	4,92	4,35	4,84
CP 8	4,41	4,22	3,39	3,88

Anova: fator único

RESUMO - Resistência à tração aos 91 dias

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	8	43,0906	5,3863	0,9382
RV5	8	42,4434	5,3054	1,6467
RV15	8	31,2245	3,9031	0,4710
RV25	8	34,4019	4,3002	0,7475

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	13,0419	3	4,3473	4,5722	0,0100	2,9467
Dentro dos grupos	26,6231	28	0,9508			
Total	39,6650	31				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE D – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Absorção de água por imersão aos 28 dias (%)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	11,35	11,19	11,79	11,32
CP 2	11,65	11,63	11,53	12,29
CP 3	11,64	11,36	11,45	11,83
CP 4	11,97	11,11	11,66	11,74

Anova: fator único

RESUMO - Absorção de água por imersão aos 28 dias (%)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	4	46,6179	11,6545	0,0624
RV5	4	45,3004	11,3251	0,0534
RV15	4	46,4364	11,6091	0,0230
RV25	4	47,1837	11,7959	0,1612

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,4678	3	0,1559	2,0793	0,1565	3,4903
Dentro dos grupos	0,8998	12	0,075			
Total	1,3676	15				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE D – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Absorção de água por imersão aos 91 dias (%)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	11,92	12,20	11,64	11,71
CP 2	11,93	12,17	11,53	12,04
CP 3	11,97	11,95	11,62	11,68
CP 4	11,76	11,98	11,94	11,96

Anova: fator único

RESUMO - Absorção de água por imersão aos 91 dias (%)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	4	47,5840	11,8960	0,0087
RV5	4	48,2995	12,0749	0,0169
RV15	4	46,7163	11,6791	0,0315
RV25	4	47,3879	11,8470	0,0313

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,3182	3	0,1061	4,7948	0,0203	3,4903
Dentro dos grupos	0,2655	12	0,0221			
Total	0,58375	15				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE E – ÍNDICE DE VAZIOS

Índice de vazios aos 28 dias (%)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	22,10	21,53	22,22	20,78
CP 2	22,33	22,32	21,86	22,55
CP 3	23,01	21,78	21,77	22,00
CP 4	23,03	21,72	21,95	21,67

Anova: fator único

RESUMO - Índice de vazios aos 28 dias (%)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	4	90,459	22,615	0,224
RV5	4	87,348	21,837	0,113
RV15	4	87,803	21,951	0,037
RV25	4	86,998	21,750	0,554

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,8553	3	0,6184	2,6645	0,0953	3,4903
Dentro dos grupos	2,7852	12	0,2321			
Total	4,6405	15				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE E – ÍNDICE DE VAZIOS

Índice de vazios aos 91 dias (%)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	23,06	23,20	22,11	21,40
CP 2	23,03	23,13	21,37	22,40
CP 3	23,24	22,80	22,07	21,63
CP 4	22,75	22,92	22,29	22,32

Anova: fator único

RESUMO - Índice de vazios aos 91 dias (%)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	4	92,0773	23,0193	0,0410
RV5	4	92,0463	23,0116	0,0339
RV15	4	87,8404	21,9601	0,1645
RV25	4	87,7503	21,9376	0,2465

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,5519	3	1,5173	12,49	0,0005	3,4903
Dentro dos grupos	1,4578	12	0,1215			
Total	6,0097	15				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE F – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (g/cm²)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	1,11	1,11	0,88	0,90
CP 2	1,15	1,06	0,90	0,93
CP 3	1,06	1,01	0,77	0,93
CP 4	1,05	1,02	0,88	1,04

Anova: fator único

RESUMO - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (g/cm²)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	4	4,3749	1,0937	0,0018
RV5	4	4,2017	1,0504	0,0020
RV15	4	3,4276	0,8569	0,0031
RV25	4	3,7892	0,9473	0,0039

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,1357	3	0,0452	16,5742	0,0001	3,4903
Dentro dos grupos	0,0327	12	0,0027			
Total	0,1684	15				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE F – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Absorção de água por capilaridade aos 91 dias (g/cm²)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	1,65	1,60	1,45	1,38
CP 2	1,60	1,64	1,25	1,27
CP 3	1,50	1,54	1,92	1,45
CP 4	1,56	1,68	1,38	1,43

Anova: fator único

RESUMO - Absorção de água por capilaridade aos 91 dias (g/cm²)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	4	6,3100	1,5775	0,0040
RV5	4	6,4600	1,6150	0,0036
RV15	4	6,0000	1,5000	0,0853
RV25	4	5,5300	1,3825	0,0065

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,1285	3	0,0428	1,7196	0,2160	3,4903
Dentro dos grupos	0,2988	12	0,0249			
Total	0,4272	15				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.

APÊNDICE G – PROFUNDIDADE CARBONATADA

Profundidade carbonatada aos 91 dias (mm)

	RV0	RV5	RV15	RV25
CP 1	13,17	14,42	17,50	17,50
CP 2	15,25	14,83	17,75	17,67
CP 3	12,25	14,08	17,50	19,25
CP 4	16,92	15,75	17,58	20,08
CP 5	15,00	15,50	16,25	19,58
CP 6	14,42	15,92	15,92	19,75
CP 7	14,92	15,50	16,08	15,33
CP 8	14,42	14,33	16,75	16,50

Anova: fator único

RESUMO - Profundidade carbonatada aos 91 dias (mm)

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RV0	8	116,3333	14,5417	1,9524
RV5	8	120,3333	15,0417	0,5060
RV15	8	135,3333	16,9167	0,5694
RV25	8	145,6667	18,2083	2,9782

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	69,0938	3	23,0313	15,3389	0,0000	2,9467
Dentro dos grupos	42,0417	28	1,5015			
Total	111,1354	31				

Onde:

F – Teste F, valor calculado;

P – Nível de significância associado ao valor calculado F;

SQ – Soma dos quadrados;

gl – Grau de liberdade; e

MQ – Média dos quadrados.