



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL GONÇALVES TORRES

ESTUDO DA CORROSÃO NO COMPÓSITO CIMENTÍCIO
AUTOADENSÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR
RESÍDUO DE VIDRO

ITAJUBÁ – MG

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL GONÇALVES TORRES

**ESTUDO DA CORROSÃO NO COMPÓSITO CIMENTÍCIO
AUTOADENSÁVEL COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR
RESÍDUO DE VIDRO**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Desenvolvimento, processamento e caracterização de materiais
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo
Coorientador: Prof.^a Dr.^a Valquíria Claret dos Santos

ITAJUBÁ – MG

2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me alcançar com seu infinito amor e ser luz para os meus passos. A Ele toda minha honra e gratidão. A Sua graça me basta.

A minha amada esposa e eterna companheira de vida Patrícia, pelo incondicional amor, apoio, força, paciência, fundamentais para vencer esse desafio.

Aos meus pais, Luiz e Lenice, pelo amor e dedicação, e aos meus irmãos pelo apoio, incentivo e torcida para o meu sucesso.

Em especial, agradeço à Prof.^a Dr.^a Mirian de Lourdes Mota Melo Noronha e Prof.^a Dr.^a Valquíria Claret dos Santos, pela confiança, suporte, disponibilidade constante e valiosa orientação e coorientação que foram fundamentais para realização desta pesquisa.

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e aos professores do curso de pelos conhecimentos compartilhados que contribuíram para meu crescimento profissional.

Ao Prof. Dr. Vander Alkmin e Prof. Dr. Adhimar Oliveira, por toda assistência e contribuição para enriquecimento desta pesquisa.

Aos meus colegas Lucas, Déia e Ana Paula, pelo suporte e parceria nos trabalhos de laboratórios, sem os quais, este trabalho não teria sido o mesmo.

Ao senhor Jorge e a empresa Ômega Micromecânica, pelo suporte e fabricação dos moldes de pastilhas de argamassa, essenciais desta pesquisa.

À empresa Raneri, pelo fornecimento do resíduo de vidro moído utilizados nesta pesquisa.

Aos técnicos de laboratório, em especial o Fabiano e ao Jonas, pela importante ajuda e contribuição na realização dos ensaios técnicos e experimentos.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

RESUMO

TORRES, R.G. (2022), Estudo da corrosão no compósito cimentício autoadensável com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro. 2022. 113p. Dissertação (Mestrado em Materiais Para Engenharia). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2022.

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e muitos tipos de resíduos podem ser usados em sua composição para diminuir a extração de matérias primas naturais, como por exemplo o vidro que é um material 100% reciclável podendo ser utilizado em várias granulometrias. Nas estruturas de concreto armado podem aparecer várias manifestações patológicas ao longo do tempo sendo uma delas a corrosão da armadura, que é uma das patologias e falhas que danifica significativamente as barras de aço e o concreto por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliado ou não a esforços mecânicos. Assim, este trabalho visa avaliar a produção de compósito cimentício autoadensável com os resíduos de vidro moído, nas proporções de 0% (sem resíduo de vidro) 5%, 10%, 15%, 20% e 30%. em substituição ao agregado miúdo e investigar a influência na corrosão da armadura. Para tanto foi utilizado para a caracterização do resíduo de vidro os ensaios de granulometria, absorção de água, massa específica, massa unitária e composição por MEV/EDS. No estado fresco foram empregados os métodos de “Mini-Cone Slump Flow” e “mini v-funnel test”. No estado endurecido foram feitos ensaios de resistência mecânica à compressão axial, resistência a tração indireta (compressão diametral), massa específica, porosidade, e avaliar o comportamento da corrosão através do método de resistividade elétrica volumétrica, ensaio difusão de íons de cloreto e ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica.

Os resultados se mostraram satisfatórios para o uso de RMV como substituição parcial do agregado miúdo do CAA. Nos ensaios de ensaio fresco os resultados ficaram dentro dos intervalos adotados pelos autores. Com o aumento da substituição de resíduo de vidro no lugar da areia resultou em uma diminuição na viscosidade plástica, aumento do tempo de escoamento e deformidade menor. As propriedades mecânicas foram melhoradas, podendo até utilizar para fins estruturais. Nos ensaios sobre a ocorrência da corrosão, os corpos de prova caracterizaram risco como desprezível, baixo e muito baixo de acontecer corrosão na argamassa autoadensável.

Palavras-chave: Concreto autoadensável, argamassa autoadensável, resíduo de vidro moído, corrosão no concreto

ABSTRACT

TORRES, R.G. (2022), Study of corrosion in self-compacting cementitious composite with replacement of fine aggregate by glass residue. 2022. 113p. (Master's Degree in Materials for Engineering). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2022.

Concrete is one of the most used materials in civil construction and many types of waste can be used in its composition to reduce the extraction of natural raw materials, such as glass, which is a 100% recyclable material and can be used in various granulometries. In concrete structures over time, manifestations such as pathological or interference of the reinforcement may appear, which is an action of pathologies and interference that significantly damages steel bars and concrete through the environment combined or not with mechanical exercises. Thus, this work aims to evaluate the production of self-compacting cementitious composite with ground glass waste, in the proportions of 0% (no glass waste) 5%, 10%, 15%, 20% and 30% in place of the fine aggregate and investigate the influence on reinforcement corrosion. Thus, this work aims to evaluate the production of self-compacting cementitious composite with ground glass waste, in the proportions of 0% (no glass waste) 5%, 10%, 15%, 20% and 30% in place of the fine aggregate and investigate the influence on reinforcement corrosion. For that, it was used for the characterization of the glass residue the tests of granulometry, water absorption, specific mass, unit mass and composition by SEM/EDS. In the fresh state, the “Mini-Cone Slump Flow” and “mini v-funnel test” methods were used. In the hardened state, tests of mechanical strength to axial compression, indirect tensile strength (diametral compression), specific mass, porosity, and to evaluate the corrosion behavior through the volumetric electrical resistivity method, chloride ion diffusion test and corrosion test were performed. electrochemical impedance spectroscopy.

The results were satisfactory for the use of RMV as a partial replacement of the fine aggregate of the CAA. In fresh assays, the results were within the ranges adopted by the authors. Increasing substitution of waste glass in place of sand resulted in a decrease in plastic viscosity, increased flow time and less deformity. The mechanical properties have been improved, and it can even be used for structural purposes. In the tests on the occurrence of corrosion, the specimens characterized the risk as negligible, low and very low of corrosion in the self-compacting mortar.

Keywords: Self-compacting concrete, self-compacting mortar, ground glass waste, corrosion on concrete

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1. Justificativa | 14 |
| 1.2. Objetivos | 15 |
| 1.2.1. Objetivo Geral | 15 |
| 1.2.2. Objetivo Específico | 15 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1. Compósito | 16 |
| 2.2. Compósito Cimentício com Resíduo de vidro | 17 |
| 2.3. Concreto Autoadensável (CAA) | 18 |
| 2.3.1. Vantagens do CAA | 19 |
| 2.3.2. Aplicações do CAA | 20 |
| 2.3.3. Materiais constituintes do CAA | 20 |
| 2.3.3.1. Cimento no CAA..... | 22 |
| 2.3.3.2. Agregados no CAA..... | 22 |
| 2.3.3.3. Aditivos | 23 |
| 2.3.3.4. Adições minerais | 24 |
| 2.3.3.5. Água..... | 25 |
| 2.4. Métodos de dosagem do CAA proposto por Tutikian | 25 |
| 2.5. Principais métodos de avaliação das propriedades da CAA em estado fresco | 26 |
| 2.6. Principais métodos de avaliação das propriedades da AAA em estado fresco | 28 |
| 2.6.1. Viscosidade Plástica – mini v-funnel test | 28 |
| 2.6.2. Índice de Diâmetro de Espalhamento - Mini-Cone Slump Flow Test | 29 |
| 2.7. Patologias | 30 |
| 2.8. Corrosão das armaduras de concreto | 32 |
| 2.9. Fator agressividade do ambiente | 35 |
| 2.10. Análise Bibliométrica | 37 |
| 2.12. Técnicas de análise do concreto quanto a possibilidade de corrosão | 45 |
| 2.12.1. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) | 46 |
| 2.12.2. Resistividade Elétrica Volumétrica | 48 |
| 2.12.3. Ensaio de difusão de íons de cloreto. | 51 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 54 |
| 3.1. Materiais | 54 |
| 3.1.1. Cimento | 54 |
| 3.1.2. Agregado miúdo | 55 |
| 3.1.3. Resíduo de vidro..... | 55 |
| 3.1.4. Adição mineral | 57 |
| 3.1.5. Aditivo superplastificante..... | 57 |
| 3.1.6. Água | 58 |
| 3.2. Métodos | 58 |
| 3.3. Ensaio no estado fresco | 60 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 3.3.1. | Viscosidade Plástica – Funil V | 60 |
| 3.3.2. | Índice de Diâmetro de Espalhamento | 61 |
| 3.4. | Ensaio no estado endurecido | 62 |
| 3.4.1. | Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica | 63 |
| 3.4.2. | Ensaio a resistência à compressão axial | 65 |
| 3.4.3. | Ensaio de resistência à tração por compressão diametral | 66 |
| 3.4.4. | Resistividade Elétrica Volumétrica (REV) | 67 |
| 3.4.5. | Difusão de Íons de Cloreto | 68 |
| 3.4.6. | Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS)..... | 69 |
| 3.4.7. | Espectroscopia de impedância..... | 70 |
| 4. | RESULTADOS | 74 |
| 4.1. | Caracterização da areia e do vidro moído | 74 |
| 4.2. | Propriedades no estado fresco | 77 |
| 4.2.1. | Viscosidade Plástica – Funil V e Índice de Diâmetro de Espalhamento | 78 |
| 4.2.2. | Ensaio de espalhamento (<i>slump flow test</i>) | 79 |
| 4.3. | Propriedade no estado seco | 80 |
| 4.3.1. | Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica. | 80 |
| 4.3.2. | Ensaio de Resistência a Compressão Axial | 82 |
| 4.3.3. | Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral | 84 |
| 4.3.4. | Resistividade Elétrica Volumétrica | 86 |
| 4.3.5. | Difusão de íons de cloreto | 87 |
| 4.3.6. | Espectroscopia de impedância..... | 89 |
| 4.3.7. | Ensaio de MEV e espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS)..... | 92 |
| 5. | CONCLUSÕES | 100 |
| 5.1. | Sugestões para trabalhos futuros | 101 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: | 102 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Tipos de aditivos para concreto | 23 |
| Tabela 2 - Classificação das adições minerais | 24 |
| Tabela 3 - Métodos de ensaios em função da propriedade no estado fresco a ser avaliada | 26 |
| Tabela 4 - Métodos de ensaio para CAA no estado fresco segundo a ABNT..... | 27 |
| Tabela 5- Principais patologias nas estruturas de concreto | 31 |
| Tabela 6 - Classes de agressividade ambiental..... | 36 |
| Tabela 7 - Correspondência entre classe de agressividade e relação a/c e qualidade do concreto | 36 |
| Tabela 8 - Correspondência entre classe de agressividade e cobrimento nominal para. | 37 |
| Tabela 9 - Quantidade de artigos encontrados na base de dados..... | 39 |
| Tabela 10 – Origem das publicações | 40 |
| Tabela 11 - Relação entre resistividade elétrica e probabilidade de corrosão..... | 51 |
| Tabela 12 - Classificação da penetrabilidade do íon cloreto | 53 |
| Tabela 13 – Característica física e química do cimento | 54 |
| Tabela 14 - Características físicas e químicas da Silica Ativa obtido na ficha técnica do fabricante | 57 |
| Tabela 15 - Características físicas e químicas do superplastificante obtido na ficha técnica do fabricante | 57 |
| Tabela 16 - Traço inicial da amostra | 59 |
| Tabela 17 - Traço referência e com resíduo de vidro | 59 |
| Tabela 18 – Dimensões e os ensaios de cada grupo de amostras produzido..... | 60 |
| Tabela 19 – Ensaios aplicados no AAA no estado endurecido. | 62 |
| Tabela 20 - Características do resíduo de vidro | 74 |
| Tabela 21 - Tabela de Granulometria da Areia | 74 |
| Tabela 22 – Dados da quantidade de resíduo de vidro por aberturas de peneira | 75 |
| Tabela 23 – Porcentagem de areia retida em cada peneira..... | 77 |
| Tabela 24 – Tabela com valores do Tempo e Rm | 78 |
| Tabela 25 – Dados do espalhamento Slump Flow Test..... | 79 |
| Tabela 26 - Ensaios de absorção de água, índice de vazios, massa específica da amostra seca e massa específica da amostra saturada | 81 |

| | |
|--|----|
| Tabela 27 - Ensaio de resistência à compressão axial dos traços do Grupo 1..... | 82 |
| Tabela 28 - Ensaio de resistência à compressão axial dos traços do Grupo 2..... | 83 |
| Tabela 29 - Ensaio de resistência a tração por compressão diametral | 84 |
| Tabela 30 – Resistência à Tração indireta | 85 |
| Tabela 31 – Corrente elétrica passante pelo ensaio de resistência elétrica volumétrica | 86 |
| Tabela 32 - Corrente elétrica passante pelo ensaio de difusão de íons de cloreto..... | 88 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Representação da combinação entre as matrizes e os reforços e a representação dos compósitos cimentícios | 16 |
| Figura 2 - Bloco de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo | 20 |
| Figura 3 - Comparação das proporções da mistura do CCV e CAA..... | 21 |
| Figura 4 – Ensaio do Mini Funil V para argamassa | 28 |
| Figura 5 - Ensaio do Mini-Cone Slump Flow para argamassa..... | 29 |
| Figura 6 - Esquema simplificado da célula de corrosão | 34 |
| Figura 7 - Passos para análise Bibliométrica..... | 38 |
| Figura 8 - Quantidade de documentos publicados por ano. | 41 |
| Figura 9 – Quantidade de documentos publicados por ano no Brasil. | 41 |
| Figura 10 - Diagrama de Nyquist para a amostra referência..... | 47 |
| Figura 11 - Esquema elétrico do ensaio da resistividade volumétrica | 49 |
| Figura 12 - Sistema do ensaio de resistividade elétrica com chapas de cobre | 49 |
| Figura 13 – Representação esquemática do ensaio de difusão de íons cloreto | 52 |
| Figura 14 - Processo de Trituração de Resíduo de Vidro na empresa RANERI..... | 55 |
| Figura 15 - Moinho com três peneiras na empresa RANERI..... | 56 |
| Figura 16 - Resíduo de vidro triturado no estado mais fino | 56 |
| Figura 17 - Aditivo Aditibras H25 | 58 |
| Figura 18 - Ensaio de viscosidade para obter o tempo de escoamento | 61 |
| Figura 19 - Execução do ensaio de fluidez para obter o diâmetro de espalhamento..... | 62 |
| Figura 20 – Corpos de prova submersos | 63 |
| Figura 21 – Balança analítica para medida de massa | 64 |
| Figura 22 – Ensaio de resistência a compressão axial..... | 65 |
| Figura 23 – Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral | 66 |
| Figura 24 - Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica..... | 67 |
| Figura 25 – Ensaio de difusão de íons de cloreto | 69 |
| Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado para análise das amostras - marca Zeiss, modelo EVO MA15, Lab. de Físico-química UNIFEI/Itajubá | 69 |
| Figura 27 - Amostras de Argamassa Autoadensável para ensaios do MEV/EDS..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 28 - Potenciostato/Galvanostato modular da marca Autolab (a) e Eletrodo de trabalho: na face inferior, os eletrodos de referência e contra eletrodo na outra face (b). | 71 |
| Figura 29 - Montagem do experimento para a realização das medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica | 71 |
| Figura 30 - Execução e desmoldagem da pastilha de argamassa | 72 |
| Figura 31 - Placa de PVC para o molde bipartido de latão | 73 |
| Figura 32 - Curva Granulométrica da Areia..... | 75 |
| Figura 33 - Curva granulométrica do resíduo de vidro | 76 |
| Figura 34 - Curva granulométrica do resíduo de vidro corrigida e da areia referencial. 77 | |
| Figura 35 – Comparação dos dados de viscosidade pelo ensaio Funil V | 79 |
| Figura 36 - Comparação dos dados do espalhamento Slump Flow Test Fonte: Própria do autor (2022) | 80 |
| Figura 37 - Absorção de água e índice de vazios | 81 |
| Figura 38 - Resistência à compressão axial..... | 83 |
| Figura 39 - Gráfico de resistência à Tração por Compressão Diametral, média e desvio padrão | 86 |
| Figura 40 - Gráfico da resistividade elétrica nas amostras..... | 87 |
| Figura 41 - Gráfico da corrente elétrica, em coulomb (C) | 88 |
| Figura 42 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 0% de resíduo de vidro..... | 89 |
| Figura 43 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 5% de resíduo de vidro..... | 90 |
| Figura 44 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 10% de resíduo de vidro..... | 90 |
| Figura 45 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 15% de resíduo de vidro..... | 91 |
| Figura 46 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 20% de resíduo de vidro..... | 91 |
| Figura 47 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 30% de resíduo de vidro..... | 92 |
| Figura 48 – Micrografia MEV e EDS da amostra referência. | 93 |
| Figura 49 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 5% de RMV | 94 |
| Figura 50 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 10% de RMV | 95 |
| Figura 51 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 15% de RMV | 96 |
| Figura 52 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 20% de RMV | 97 |
| Figura 53 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 30% de RMV | 98 |
| Figura 54 - Micrografia MEV e EDS do Resíduo Moído de Vidro | 98 |
| Figura 55 - Diagrama de Bode para a amostra referência a amostra..... | 99 |

LISTA DE ABREVIACOES

AAA – argamassa autoadensável

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

ARI – alta resistência inicial

CAA – concreto autoadensável

CCV – concreto convencional vibrado

CEB – comitê europeu do cimento

CPV – cimento Portland tipo V

EDS - Espectroscopia por energia dispersiva

EFNARC - European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building products

EIE – espectroscopia de impedância eletroquímica

NBR – norma brasileira

MEV – microscópio eletrônico de varredura

RMV – resíduo moído de vidro

RAA – reação álcali-agregado RVM – resíduo de vidro moído SPA - superplastificante

TR – traço referência

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

1. INTRODUÇÃO

A evolução constante da construção civil provoca a busca de tecnologias inovadoras para melhorar a qualidade e segurança das edificações e reduzir o impacto causado no meio ambiente, tendo a construção civil grande importância nas pesquisas nas áreas sustentáveis.

Na construção civil, o concreto é um dos produtos mais fabricados, sendo um grande consumidor de matérias primas naturais, composto basicamente de areia, brita, cimento, água e aditivos (METHA; MONTEIRO, 2008). Combinando o concreto com o aço cria-se a estrutura chamada concreto armado, possuindo boa resistência a compressão e a tração. (BOTELHO, 2002).

Tendo em vista que o concreto aceita muitos tipos de resíduos em sua composição, a sua produção pode ser vista como uma importante indústria de reuso de resíduos. A sílica, escória e cinzas são alguns exemplos de resíduos que são adicionados no concreto e até melhoram as suas propriedades (CORDEIRO E MONTEL, 2015).

Muitas das manifestações patológicas da construção civil acontecem devido ao erro de dimensionamento, má avaliação da resistência do solo, falta de compatibilização entre o projeto arquitetônico e complementares, cobrimento de concreto insuficiente e faltas de detalhamento do projeto e dos materiais. Algumas dessas manifestações são: trincas, rachaduras, deslocamentos, descolorações, eflorescências, manchas, carbonatação, flambagem e corrosão da armadura (SOUZA E RIPPER, 1998).

A corrosão da armadura é uma das patologias que causa a falha nas estruturas de concreto armado e que afeta a construção civil em todo o mundo. A corrosão danifica significativamente as barras de aço e o concreto, mesmo não estando em estágio avançado (MEIRA, 2017).

Apesar do grande número de pesquisas realizadas, ensaios de corrosão acelerada não possuem um padrão dentro da comunidade científica, pois são realizados de diferentes métodos, dificultando a correlação dos resultados encontrados (MONTEIRO E MEDEIROS, 2017).

Uma das preocupações da construção civil é com a durabilidade e recuperação das estruturas causada pela corrosão. Logo, para evitar a ocorrência de corrosão em edificações novas e para fazer um reparo e recuperação em edifícios que já possui, é necessário um conhecimento amplo e abrangente sobre a corrosão, sendo este um tema de grande importância para o desenvolvimento da engenharia civil.

Neste contexto, esta dissertação visa estudar dois aspectos atuais e importantes na obtenção do compósito cimentício com resíduo de vidro. De um lado a crescente demanda pela utilização de resíduos sólidos como substituição de agregados ou adição, neste caso, o vidro. De outro lado, qual a influência desta substituição ou adição na durabilidade do concreto, com relação a proteção da armadura.

1.1. Justificativa

A durabilidade do concreto e a sua interação com o meio ambiente em que está inserido é uma preocupação constante no meio técnico-científico. Neste contexto, a corrosão das armaduras nos concretos armados é um dos principais problemas relacionados a durabilidade nas obras civis em cenário mundial.

Estudos que contém soluções ambientais e ao mesmo tempo que dispõem do desenvolvimento das tecnologias são muito importantes pois dentro do cenário do desenvolvimento sustentável, o combate à corrosão mediante a utilização de resíduos com alto índice de poluição, dá a questão uma abordagem ecológica relevante.

O vidro apesar de poder ser 100% reciclado, em alguns casos não tem sido, portanto, existem pesquisas orientadas à área de reutilização do vidro moído como substituto do agregado miúdo na argamassa ou no concreto. Estudos como o de Vian (2018), Cordeiro e Montel (2015), Trentin et al. (2020), Righi et al (2012) e Srikanth e Lalitha, (2022) que estudaram o desempenho de concreto produzidos com a reutilização de vidro como agregados. Os referidos trabalhos não apresentam estudos avançados sobre corrosão em um concreto autoadensável.

O concreto autoadensável (CAA) é uma tecnologia relativamente nova em algumas regiões no Brasil e tem se mostrado um concreto que possui um aumento da

durabilidade e vida útil frente as manifestações patológicas, principalmente a corrosão estrutural, devido a uma maior resistência e baixa permeabilidade (LOPES et al., 2020).

Pelo estudo da dosagem da argamassa é possível determinar a trabalhabilidade fluidez, viscosidade, segregação e exsudação do CAA (SOUZA, 2022).

Desse modo, o estudo relacionado a influência da corrosão com a argamassa autoadensável com resíduo moído de vidro é justificável pois é uma maneira da indústria da construção civil contribuir na substituição de agregados naturais por resíduos, cooperando com o desenvolvimento sustentável e com o meio ambiente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar a produção de compósito cimentício autoadensável com os resíduos moído de vidro, em diferentes proporções, em substituição ao agregado miúdo e investigar a corrosão, resistência a compressão, tração por compressão diametral, absorção de água e índice de vazios.

1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

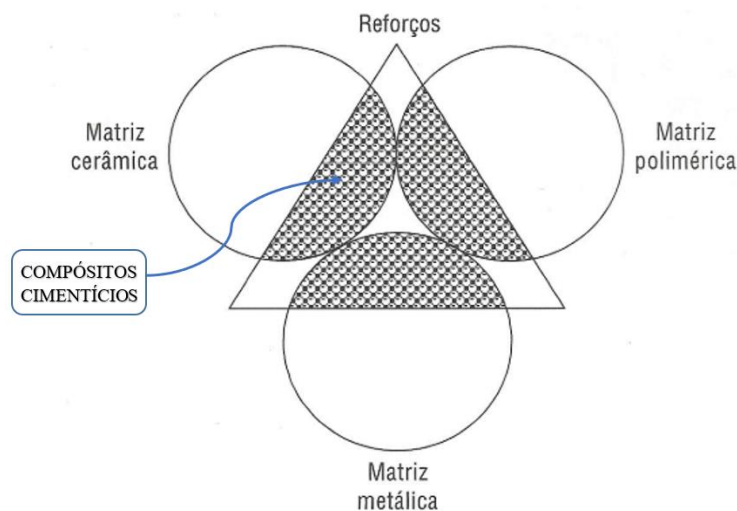
- Analisar as propriedades físicas, mecânicas e químicas do compósito cimentício autoadensável com substituição do agregado miúdo por vidro moído nas proporções de 0% (sem resíduo de vidro) 5%, 10%, 15%, 20% e 30%.
- Fazer a caracterização do compósito cimentício no estado fresco usando o método “*Mini-Cone Slump Flow*” e “*mini v-funnel test*”;
- Fazer a caracterização do compósito cimentício no estado endurecido usando os ensaios de resistência mecânica à compressão axial e diametral, massa específica, porosidade, e avaliar o comportamento da corrosão através do método de resistividade elétrica volumétrica, ensaio difusão de íons de cloreto e ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Compósito

Os materiais são comumente classificados em cerâmicos, poliméricos ou metálicos e possuem propriedades particulares. Com a união de um ou mais desses materiais que possuam propriedades sinérgicas entre si, resulta em características exclusivas e que nenhum de seus constituintes possui isoladamente. Os compósitos estão associados em áreas de alta tecnologia como aeroespacial, telescópios, satélites, bioengenharia, construção civil, porém, já são usados há muitos e muitos anos, pois os ossos, músculos, a madeira são exemplos de compósitos naturais eficientes que são usados (PARDINI E LEVY NETO, 2006). A Figura 1 representa a combinação entre as matrizes cerâmica, polimérica e metálica com os reforços e a representação de um compósito cimentício.

Figura 1 - Representação da combinação entre as matrizes e os reforços e a representação dos compósitos cimentícios



Fonte: Adaptado de PARDINI e LEVY NETO (2015)

Os compósitos cimentícios consistem na ligação de agregados de partículas com um meio de ligação, ou seja, o cimento. Assim sendo, compósitos cimentícios representam os materiais que possuem uma matriz cimentícia e é reforçada por outro material. O concreto faz parte da classe dos compósitos pois é constituído de cimento, agregado fino, agregado graúdo e água (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

Como o estudo deste presente trabalho será sobre a substituição do resíduo de vidro em uma argamassa autoadensável (AAA), adotou-se o termo compósito por ser um termo mais vasto e exprimir melhor o material.

2.2. Compósito Cimentício com Resíduo de vidro

O vidro é um dos materiais mais antigos feitos pelo homem. Ele é produzido em muitas formas, tipos e possui uma ampla aplicabilidade como embalagens, recipientes de vidro, lâmpada, vidro de ampola, vidro de tubo de raios catódicos e vidros planos. Mesmo o vidro sendo um material inerte, em todas essas aplicações e produtos o vidro possui uma vida útil (ZHENG, 2013).

Diferente de outros resíduos, o vidro é 100% reciclado, ou seja, após sua reciclagem, produz a mesma quantidade de um novo produto de vidro, o que acarreta numa economia de energia e redução de emissão de CO₂ na atmosfera (CORDEIRO E MONTEL, 2015). No entanto, estima-se que no Brasil 45% das embalagens de vidro fabricadas são recicladas (IBGE, 2015). O motivo de 55% do vidro não ser reciclado é resultado das dificuldades no transporte e nos processos de triagem, porque o vidro contém várias propriedades, composições e colorações (SOUSA; SANTO E ENCANTOS, 2018).

Apesar de ajudar na questão do impacto gerado pelo resíduo de vidro no meio ambiente, o seu uso sem as devidas precauções pode gerar várias manifestações patológicas no decorrer do tempo. Para ter mais conforto e segurança dos usuários das edificações, tem-se a necessidade de avaliar e prever a durabilidade e desempenho das edificações (VIAN, 2018).

A reciclagem desses resíduos como agregados na construção civil não só economiza espaço nos aterros como também reduz a extração de matérias primas naturais para construir. Porém ao utilizar o vidro como agregado na construção, requer estudos extensivos para analisar o seu efeito nos compósitos cimentícios (ADAWAY E WANG, 2015).

Segundo Zheng (2013), existem duas maneiras de reutilizar o vidro na construção civil, a primeira é como agregado no compósito cimentício e a segunda é utilizar o pó de vidro na fabricação do cimento.

2.3. Concreto Autoadensável (CAA)

A ABNT NBR 15823-1:2017 define o CAA como sendo o concreto capaz de autoadensar pelo seu peso próprio, fluir e preencher a forma, passando pelas armaduras, dutos e insertos, mantendo sua homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

O CAA foi introduzido pela primeira vez por Okamura em 1986 como sendo um concreto especial capaz de preencher a fôrma, se autoadensar sem qualquer vibração, somente sobre o efeito da gravidade (OKAMURA, 1996).

Segundo a EFNARC (2005), o concreto só é considerado autoadensável se atender as três características: a fluidez, resistência a segregação e habilidade passante.

- Fluidez: capacidade do CAA fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços;
- Resistência a segregação: capacidade do CAA permanecer fluido dentro das fôrmas, mantendo sua coesão; e
- Habilidade passante: capacidade do CAA escoar sem obstrução do fluxo ou segregação pelas fôrmas e armaduras.

O CAA possui basicamente a mesma composição que o concreto convencional vibrado (CCV), porém, dispõe de uma maior quantidade de argamassa e agregados com granulometrias mais finas na sua composição. (OKAMURA E OUCHI, 2003; DE LA CRUZ; RAMOS e HURTADO, 2017).

Como ressalta Miranda et al. (2017), a dosagem de aditivos modificadores de viscosidade e superplastificante são muito importantes pois podem comprometer o desempenho do CAA no seu estado endurecido, podendo atuar diretamente nas suas propriedades reológicas. O custo do concreto com aditivos pode não ser rentável devido ao valor dessas matérias, portanto, o custo do CAA pode ser reduzidos utilizando resíduos

industriais como alternativa na substituição parcial de cimento e agregados (ARUNCHAITANYA; ARUNAKANTHI, 2019).

2.3.1. Vantagens do CAA

O CAA é tido como um material recente e revolucionário na área do concreto. Devido aos benefícios e várias vantagens, o uso do CAA é crescente. Várias publicações como: EFNARC (2005), Tutikian e Dal Molin (2015), Verzeghassi (2015), Singh e Siddique (2016), destacam as vantagens do CAA como sendo:

- Redução da construção devido à alta produtividade;
- Redução de recursos humanos no canteiro;
- Melhor acabamento superficial e maior liberdade no projeto;
- Maior liberdade de formas e dimensões, pois o CAA preenche formas com seções reduzidas, esbeltas, curvas e com alta taxa de armadura;
- Aumento da durabilidade;
- Redução do ruído na obra, devido à ausência de vibração e adensamento do concreto;
- Redução do consumo de energia elétrica;
- Diminuição da necessidade de equipamentos (vibradores de adensamento de concreto);
- Aumento da segurança no local de trabalho, devido ao número de colaboradores reduzido;
- Redução de problemas ergonômicos nos trabalhadores;
- Ganho ambiental, pois permite aplicar em sua produção resíduos industriais como adições em sua composição;
- Possível redução do custo final do empreendimento, levando em conta todos os pontos supracitados.

Segundo estudo realizado por Costa et al. (2019), a comparação do uso do CAA em uma concretagem de um edifício em relação ao CCV, resultou em: uma redução de 10,6% no ruído na laje; redução da mão-de-obra em 42,5%; redução de 50% no uso de

equipamentos e ferramentas utilizados na concretagem; redução do custo da mão de obra em 60,9%; e a redução do tempo de concretagem em 84,5%.

2.3.2. Aplicações do CAA

Devido o CAA poder ser moldado *in loco* quanto em indústria de pré-moldados, possui uma larga escala de aplicações, como construções de edifícios, tuneis, pontes, barragens, estruturas pré-moldadas, paredes diafragma, como matéria de preenchimento de colunas de aço, dentre outras (OKAMURA E OUCHI, 2003).

O CAA foi utilizado em importantes construções como o Burj Khalifa (Dubai), A Ponte do Dragão (Espanha), O Museu Nacional das Artes do Século XXI (Itália), Ponte Suspensa Akashi-Kaikyo, conforme a Figura 2 que apresenta o seu bloco de ancoragem todo feito em CAA, possuindo vão livre de 1991 metros em concreto, dentre outras construções (OKAMURA E OUCHI, 2003; SADEK; EL-ATTAR E ALI, 2016).

Figura 2 - Bloco de ancoragem da ponte Akashi-Kaikyo



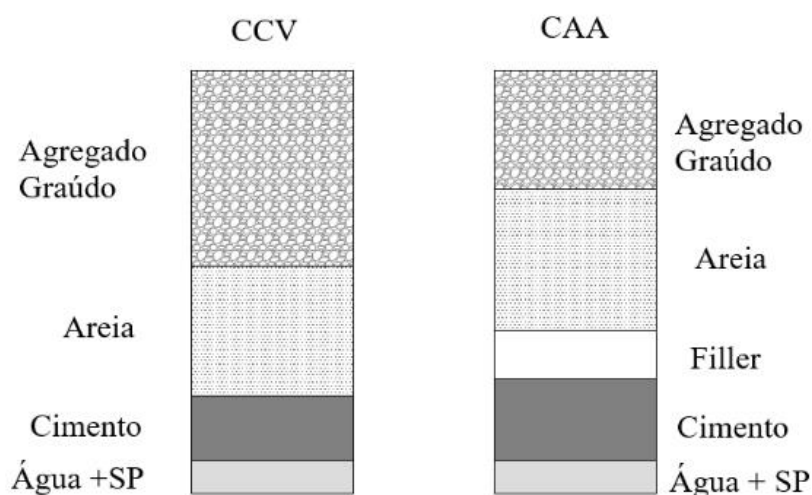
Fonte: Okamura e Ouchi (2003)

2.3.3. Materiais constituintes do CAA

Os materiais constituintes usados na execução do CAA são basicamente os mesmos utilizados no CCV (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água), porém

no CAA é necessário utilizar uma quantidade maior de materiais finos, que são as adições e também o uso de aditivos superplastificante e modificadores de viscosidade para garantir a sua alta fluidez (GOMES; BARROS, 2009). A Figura 3 demonstra uma comparação feita por Okamura e Ouchi (2003) entre o CCV e CAA.

Figura 3 - Comparação das proporções da mistura do CCV e CAA



Fonte: Okamura e Ouchi, 2003. Adaptado

Ainda segundo Gomes e Barros (2009), pode-se utilizar os resíduos no CAA, substituindo parcialmente o cimento ou os agregados, e também como na adição de resíduos finos, com objetivo de melhorar a viscosidade do concreto. Devido a possibilidade de utilizar resíduos ou subprodutos industriais que prejudicam o meio ambiente no CAA, pode-se diminuir a quantidade de consumo de recursos naturais e dessa forma dando característica sustentável ao CAA.

De acordo com EFNARC (2002), é necessário um estudo especial na dosagem da argamassa porque o CAA é composto basicamente pela argamassa e agregado graúdo, sendo a Argamassa Autoadensável (AAA) componente do Concreto Autoadensável (CAA). Dessa forma, é importante a realização dos testes e ajuste na fase de argamassa.

Segundo a ABNT NBR 15823-1:2017, os materiais utilizados na produção do CAA devem atender as normas e especificações da NBR 12655 (2015).

2.3.3.1. Cimento no CAA

No CAA pode ser usado todas as variações de cimento Portland. Os mais indicados são os de maior finura para a produção do CAA, pois a viscosidade e a tensão de escoamento dependem da pasta que forma o cimento (REPETTE, 2011).

No cimento, deve-se observar a sua granulometria e a quantidade de aluminato tricálcio (C_3A), pois altos teores de C_3A pode complicar o controle reológico e retardar o enrijecimento do concreto. Desse modo, é recomendado que o cimento possua até 10% de C_3A (EFNARC, 2002).

Conforme Repette (2011), o teor de cimento para a produção de CAA deve ficar entre 350 a 450 kg/m³, a quantidade. Consumo maior que 500 kg/m³ pode aumentar a retração e menor que 350 kg/m³ poderá ser usado quando houver adição de outro material, como cinza volante, pozolanas, etc.

2.3.3.2. Agregados no CAA

Os agregados para CAA devem atender os mesmos requisitos que os agregados para CCV. Os agregados apresentam propriedades e características importantes na produção do concreto como porosidade, granulometria, absorção de água, forma e textura, dentre outras. E essas características estão relacionadas com o concreto tanto no estado fresco como endurecido, por exemplo na trabalhabilidade, durabilidade, coesão, resistência mecânica, entre outras (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Os agregados usados no concretos são definidos pela ABNT NBR 7211:2019 e ela define os agregados miúdos como sendo aqueles que não são retidos na peneira com a malha 4,75mm e ficam retidos na peneira de malha 150 μ m (0,15mm). Os agregados graúdos são aqueles que ficam retidos na peneira com a malha 4,75mm.

De acordo com EFNARC (2005), os agregados que passam pela peneira 0,125mm são considerados pó e importantes para reologia do CAA pois podem aumentar a viscosidade e coesão da mistura, portanto, devem ser considerados no cálculo da relação água/finos.

Em se tratando dos agregados miúdos, estes podem ser tanto areias naturais como também areias provenientes de processos industriais. As areias naturais são mais indicadas porque possuem texturas lisas e forma arredondada, aumentando a fluidez (TUTIKIAN E DAL MOLIN, 2015).

A forma, a textura superficial e a granulometria das partículas são muito importantes, pois, afetam o índice de vazios e a compactação. O volume de agregado graúdo presente no CAA deve ficar entre 28% e 35% do concreto com proporções de 750 kg/m³ a 920 kg/m³ (GOMES E BARROS, 2009).

2.3.3.3. Aditivos

Segundo a ABNT NBR 11768-2:2019, os aditivos são produtos que quando misturados no concreto, modifica suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido, buscando melhoras as condições de uso do concreto. Na Tabela 1 estão listados alguns tipos de aditivos.

Tabela 1- Tipos de aditivos para concreto

| Siglas | Descrição |
|------------------------|---|
| RA1/RA1-R/RA1-A | Redutor de água tipo 1 |
| RA2/RA2-R/RA2-A | Redutor de água tipo 2 |
| CH | Controlador de hidratação |
| AP | Acelerador de pega |
| AR | Acelerador de resistência |
| APP | Acelerador de pega para concreto projetado |
| CR | Compensador de retração |
| RR | Redutor de retração |
| IA | Incorporador de ar |
| MV-RT | Modificador de viscosidade – Retentor de água |
| RP | Redutor de permeabilidade |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 11768-2 (2019).

Na produção de CAA, o uso de aditivos superplastificante são imprescindíveis, pois conferem ao concreto fluidez, uma das características expressivas do CAA (GOMES e BARROS, 2009).

Os superplastificante mais usados no CAA são a base de policarboxilato. Estes reduzem no mínimo 20% da água da mistura e promovem o espalhamento das partículas sem diminuir a viscosidade da pasta, desejável para a resistência à segregação. O fator que mais influência na segregação do CAA é a tensão de escoamento (REPETTE, 2011).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2015), o aditivo modificador de viscosidade é usado para suprir a ausência de finos na mistura, corrigir a composição granulométrica e a instabilidade de água no CAA evitando a segregação pois diminuem a exsudação e aumentam a viscosidade da pasta.

2.3.3.4. Adições minerais

As adições minerais são usadas para melhorar a resistência a coesão e segregação do CAA ainda no estado fresco. Esta adição interfere no teor de cimento, reduzindo a retração térmica e o calor de hidratação. Há duas classes de aditivos minerais conforme sua capacidade de reação com a água, estas classes estão descritas na Tabela 2 (EFNARC, 2005).

Tabela 2 - Classificação das adições minerais

| Tipos | Descrição | Materiais |
|----------------|-------------------------|---------------------------------|
| Tipo I | Inertes ou semi-inertes | Fíler Mineral Pigmentos |
| Tipo II | Pozolânicas | Cinza Volante Sílica Ativa M |
| | Hidráulicas | Escoria de alto-forno |

Fonte: EFNARC, 2005, adaptado

As adições Tipo I não reagem quimicamente, agindo no preenchimento de vazios, redução da porosidade e alteração da zona de transição. As adições Tipo II reagem

quimicamente com a pasta de cimento, tornando-a em um composto resistente (TUTIKIAN E DAL MOLIN, 2015).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), as adições minerais também favorecem na redução da expansão álcali-agregado, fissuração térmica e ataques a sulfatos.

2.3.3.5. Água

A água de amassamento para produção do CAA deve ter os mesmos requisitos que para produção do CCV e deve estar de acordo com a ABNT NBR 15900:2009. É recomendado que esteja livre de matéria orgânica, de resíduos sólidos, de sulfatos, cloretos, o pH entre 6 e 8 e o teor de água não pode exceder 200 kg/m³ (EFNARC, 2002).

2.4. Métodos de dosagem do CAA proposto por Tutikian

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), existem diferentes métodos ou recomendações nacionais e internacionais para dosagem do CAA, porém não existe um método padrão para produção do CAA, portanto, muitas empresas e instituições acadêmicas foram desenvolvendo seus próprios métodos para a elaboração do traço de concreto autoadensável.

O método de dosagem do CAA proposto por Tutikian é obtido a partir da dosagem do CCV, calculada pelo Instituto de Pesquisa Tecnologia/Universidade de São Paulo (IPT/USP), e devem seguir quatro princípios básicos:

- Produção da pasta: determinação da relação a/c e relação dos materiais cimentícios, inclusive as adições minerais.
- Otimização da quantidade da pasta: determinação do volume da pasta para que a pasta tenha o mais nível de fluidez possível;
- Proporcionalmente do agregado;
- Ajustes com incorporação de aditivos.

Como o CAA é formado basicamente por argamassa e agregado graúdo, os ajustes feitos na dosagem da argamassa é importante para determinar a proporção ideal do

concreto autoadensável. Por isso, é pertinente fazer ajustes e testes na fase da argamassa, que irá integrar o CAA em seguida.

Através dos estudos e testes, é possível determinar a fluidez, coesão, resistência a segregação e exsudação da argamassa. Desta forma, este estudo avalia a influência da corrosão no compósito cimentício autoadensável com a substituição do agregado miúdo por resíduo moído de vidro, onde foi empregado o método proposto por Tutikian (2004).

2.5. Principais métodos de avaliação do CAA em estado fresco

Para o concreto ter o atributo como auto adensável deve ter três características: Fluidez, habilidade passante e resistência a segregação. A Tabela 3 apresenta alguns métodos utilizados para classificar as propriedades do CAA (EFNARC, 2005).

Tabela 3 - Métodos de ensaios em função da propriedade no estado fresco a ser avaliada

| Propriedade | Ensaio | Valor |
|---|-------------------------|----------------------------|
| Fluidez, Viscosidade | T500 | Tempo de espalhamento |
| | V-funnel | Tempo de espalhamento |
| | O-funnel | Tempo de espalhamento |
| | Orimet | Tempo de espalhamento |
| Fluidez; Capacidade de preenchimento | Slump-flow | Espalhamento Total |
| | Kajima box | Enchimento Visual |
| Habilidade Passante | L-box | Taxa de Passagem |
| | U-box | Diferença de Altura |
| | J-ring | Espalhamento Total |
| | Kajima Box | Habilidade passante visual |
| Resistência à segregação | Penetração | Profundidade |
| | Segregação por peneiras | Porcentagem Retida |
| | Coluna de segregação | Taxa de Segregação |

Fonte: Adaptado de EFNARC (2005).

No Brasil, a norma ABNT NBR 15823-1:2017 estabelece os requisitos para controle, classificação, limites de adensabilidade, diretrizes para realização dos ensaios e recebimento do CAA no estado fresco.

Tabela 4 - Métodos de ensaio para CAA no estado fresco segundo a ABNT

| Espalhamento (slump-flow) | | |
|--|---|-------------------------|
| Classe | Espalhamento | Método de Ensaio |
| SF 1 | 550 a 650 | ABNT NBR 15823-2 |
| SF 2 | 660 a 750 | |
| SF 3 | 760 a 850 | |
| Viscosidade plástica aparente t500 (sob fluxo livre) | | |
| Classe | t500 | Método de Ensaio |
| VS 1 | ≤ 2 | ABNT NBR 15823-2 |
| VS 2 | > 2 | |
| Índice de estabilidade visual (sob fluxo livre) | | |
| Classe | IEV | Método de Ensaio |
| IEV 0 | Sem evidência de segregação ou exsudação | ABNT NBR 15823-2 |
| IEV 1 | Sem evidência de segregação e leve exsudação | |
| IEV 2 | Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto | |
| IEV 3 | Segregação claramente evidenciada pela concentração de IEV 3 agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (> 10mm) | |
| Habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre) | | |
| Classe | Anel J (mm) | Método de Ensaio |
| PJ 1 | 0 a 25 com 16 barras de aço | ABNT NBR 15823-3 |
| PJ 2 | 25 a 50 com 16 barras de aço | |
| Habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre) | | |
| Classe | Caixa L (H2/H1) | Método de Ensaio |
| PL 1 | ≥ 0,80, com duas barras de aço | ABNT NBR 15823-3 |
| PL 2 | ≥ 0,80, com três barras de aço | |
| Habilidade passante pela caixa U (sob fluxo confinado) – Ensaio facultativo | | |
| Classe | Caixa U (H2 - H1) | Método de Ensaio |
| PU | ≤ 30mm | ABNT NBR 15823-4 |
| Viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado) | | |
| Classe | Caixa V (s) | Método de Ensaio |
| VF 1 | < 9 | ABNT NBR 15823-5 |
| VF 2 | 9 a 25 | |
| Resistência à segregação pela coluna de segregação | | |
| Classe | Coluna de segregação (%) | Método de Ensaio |
| SR 1 | ≤ 20 | ABNT NBR 15823-6 |
| SR 2 | ≤ 15 | |
| Resistência à segregação pelo método da peneira – Ensaio facultativo | | |
| Classe | Material retido na peneira (%) | Método de Ensaio |
| TP 1 | ≤ 20 | ABNT NBR 15823-6 |
| TP 2 | ≤ 15 | |

Fonte: Adaptado de EFNARC (2005).

Para obter concreto com propriedade autoadensável é necessário que a pasta e a argamassa tenham moderada viscosidade e alta fluidez. Conforme Okamura e Ouchi (2003), métodos de ensaios com pastas e argamassas no estado fresco tem sido usado para obter as proporções adequadas de materiais para produção de concretos autoadensáveis.

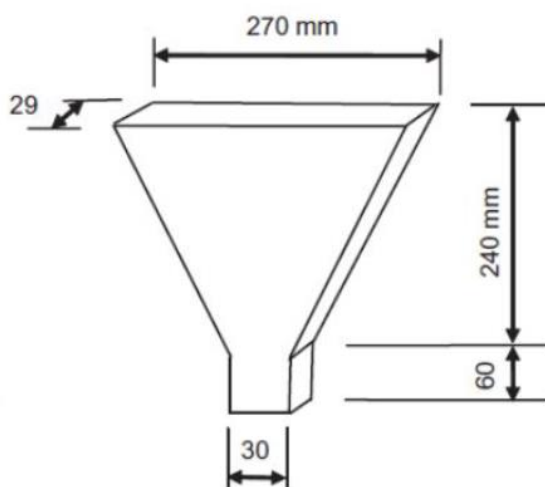
2.6. Principais métodos de avaliação das propriedades da AAA em estado fresco

De modo a garantir as características de argamassa autoadensável, os ensaios no estado fresco avaliam a fluidez e a viscosidade, características importantes para conseguir uma mistura com propriedade autoadensável.

2.6.1. Viscosidade Plástica – *mini v-funnel test*

O ensaio utilizados para caracterizar a viscosidade é o método proposto por Okamura e Ouchi (2003), no qual os autores sugerem utilizar o ensaio em argamassa para poder corrigir possíveis falhas de proporção de materiais. Baseando em três princípios: baixa relação a/c, baixo uso de plastificante e agregado graúdo limitado no concreto, esses princípios tem como objetivo proporcionar maior fluidez da pasta e evitar a segregação quando fluir nas armaduras. O ensaio de *mini v-funnel test* proposto por Okamura e Ouchi (2003) consiste em medir o tempo que a argamassa leva para escoar pelo funil.

Figura 4 – Ensaio do Mini Funil V para argamassa



Fonte: NEPOMUCENO et al (2012)

Após preencher todo o funil com a argamassa, com auxílio de um cronômetro, marca-se o tempo necessário para que toda a argamassa escoe pelo funil. Okamura e Ouchi (2003), Nepomuceno et al (2012) e Rao et al. (2015) definiram em seus trabalhos que o tempo para escoamento fique entre 7 e 11 segundos para que o tempo relativo de escoamento para argamassas fique próxima a 1, seguindo Equação 1.

$$Rm = \frac{10}{T (s)} \quad (1)$$

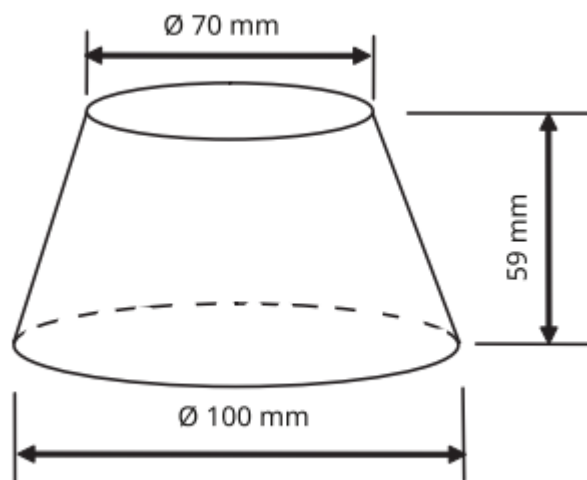
Sendo: Rm = Tempo relativo de escoamento

T = Tempo de escoamento da argamassa (segundos)

2.6.2. Índice de Diâmetro de Espalhamento - *Mini-Cone Slump Flow Test*

A determinação do diâmetro médio obtido através do método do *mini-cone slump flow test* permite obter o índice de consistência e também analisar a capacidade de escoamento da argamassa através do seu diâmetro de espalhamento. O método consiste em preencher o cone (Figura 5) sem adensamento e suspender verticalmente o cone deixando a argamassa fluir naturalmente.

Figura 5 - Ensaio do Mini-Cone Slump Flow para argamassa



Fonte: Nepomuceno et al (2012)

Após finalizada a movimentação, mede-se os diâmetros para obter o índice de espalhamento (Gm), conforme Equação 2.

$$Gm = \frac{(d_1 \times d_2 - d_o^2)}{d_o^2} \quad (2)$$

Sendo: Gm = Índice de Espalhamento

d1 e d2 = Diâmetros medidos após a argamassa esparramar

do = Diâmetro da base do mini cone para argamassa

Okamura e Ouchi (2003), Nepomuceno et al. (2012) e Rao et al. (2015) definiram em seus trabalhos que o diâmetro fique entre 240 mm e 260 mm.

2.7. Patologias

As edificações são projetadas com o objetivo de terem longa durabilidade, mantendo da melhor maneira possível suas condições de uso e segurança. No fim dos anos 70, a preocupação em relação à durabilidade inadequada das estruturas de concreto levou a um aumento dos estudos acerca das causas e natureza dos processos de degradação, e ao desenvolvimento de estratégias gerais para lidar com estas situações (ROCHA, 2015).

As manifestações patológicas acontecem devido ao erro de dimensionamento, falta de detalhamento, divergência entre projetos elétricos e hidráulicos, sobrecargas, cobrimento insuficiente, concreto deficiente, erro de execução, concreto mal curado e por causa de fenômenos químicos (MORAIS et al., 2020).

Segundo Verçoza (1991) patologia, de acordo com os dicionários, é a parte da Medicina que estuda as doenças. As edificações podem apresentar problemas que podem ser comparados as doenças tais como rachaduras, manchas, descolamentos, deformações, rupturas, etc. Por isso convencionou-se chamar de Patologia das Edificações ao estudo sistemático desses problemas.

Patologia das estruturas é uma área da engenharia que estuda as origens, as manifestações e a ocorrência das falhas nas estruturas e da sua degradação (SOUZA E RIPPER, 1998).

Nas estruturas de concreto armado podem aparecer manifestações patológicas ao longo do tempo. A corrosão é um processo de degradação agressiva e necessita de acompanhamento contínuo. É uma das patologias mais sérias e de maior repercussão técnico-econômica na área da engenharia civil. Segundo o mesmo autor os elementos de concreto armado podem ser danificados pela corrosão de diversas maneiras de acordo com a estrutura e agressividade ambiental (MONTEIRO E MEDEIROS, 2017).

As causas das manifestações patológicas podem ter origens diferentes, desde uma falha humana no projeto ou na sua execução, até dificuldades com a estrutura química de componentes de materiais específicos, ou mesmo pela ação de agentes agressores do concreto ou armaduras (JÚNIOR et al., 2021).

Segundo Miotto (2010) as principais manifestações patológicas que normalmente ocorrem nas edificações são: infiltração, manchas, bolor ou mofo, eflorescência, fissuras, trincas e corrosão da armadura.

O concreto armado, de acordo com Dardengo (2010), é o principal material usado na estrutura de edificações e suas principais manifestações patológicas estão apresentadas no Tabela 5- Principais patologias nas estruturas de concreto.

Tabela 5- Principais patologias nas estruturas de concreto

| Patologias | Fatores Contribuintes |
|----------------------|---|
| Corrosão da Armadura | Cobrimento deficiente, temperatura, umidade, tipo de cimento, aditivos, relação a/c, porosidade, processo executivo, falhas de projeto, etc. |
| Fissuras | Deficiência de armaduras, gradiente de temperatura, detalhes construtivos, sobrecargas não consideradas, consumo de cimento, processo de cura incorreto/retração. |
| Infiltração | Falta ou deficiência de impermeabilização, juntas de dilatação, retração, relação a/c, fissuras. |
| Manchas | Porosidade, umidade, materiais utilizados incorretamente, etc. |
| Trincas | Temperatura, dilatação térmica, sobrecargas, deformações da estrutura, recalques, cura, etc. |
| Eflorescência | Materiais, umidade, traço, porosidade, etc. |

Fonte: Neville (1989) apud Dardengo (2010)

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) divide a deterioração em três grandes grupos. Sendo o primeiro quando atinge o concreto material, o segundo quando atinge a armadura e o terceiro quando atinge a estrutura como um todo.

Fazem parte do primeiro grupo a lixiviação, a expansão por sulfato, a reação álcali agregado e reações oriundas de transformações de materiais ferruginosos presentes no concreto. O mecanismo preponderante que deteriora a armadura é a corrosão, ocasionada pela despassivação provocada pela carbonatação ou pelo elevado teor de íons de cloro. O que deteriora a estrutura como um todo são ações mecânicas, movimentações térmicas, impactos, fluência, retração e relaxação.

A lixiviação acontece quando águas puras, moles ou ácidas entra em contato com o cimento e carrega o hidróxido de cálcio, levando-o para a superfície. Na superfície reage com CO_2 formando o carbonato de cálcio CaCO_3 , visualmente aparece uma mancha branca (NBR 6118:2014).

A expansão por sulfato ocorre por ação da água e solos contaminados com sulfatos, iniciando uma reação expansiva com a pasta de cimento hidratado. (NBR 6118:2014).

A reação álcali-agregado advém da reação entre agregados reativos e os álcalis do cimento, sendo uma reação expansiva que ocorre no concreto e que se origina do sódio e do potássio presentes no cimento. O produto dessa reação é um gel higroscópico e que na presença de umidade é expansivo, produzindo tensões de tração, gerando fissuras e comprometendo a resistência da estrutura (NBR 6118:2014).

2.8. Corrosão das armaduras de concreto

Corrosão é a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliado ou não a esforços mecânicos (GENTIL,1996).

A corrosão da armadura é uma das causas mais graves de danos às estruturas de concreto, devido à sua prevalência e à rapidez do mecanismo de deterioração que depende das condições do concreto e do meio ambiente. Portanto, é vital que as estruturas

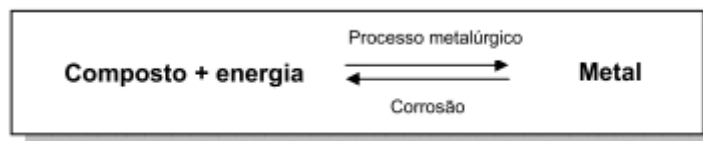
danificadas pela corrosão da armadura, seja pelo ataque de cloretos ou por ataque de dióxido de carbono (CO_2), sejam reparadas o mais rápido possível, a fim de evitar mais degradações e recuperar suas funções (RIBEIRO et al., 2022).

A descoberta precoce da corrosão reduz os custos de reparo, evita que a estrutura entre em colapso e evita danos pessoais e físicos. De acordo com Helene (1993), o processo de corrosão pode assumir duas formas, segundo a sua natureza: corrosão química ou corrosão eletroquímica. A corrosão química ou oxidação ocorre geralmente por causa de uma reação gás-metal, formando uma película uniforme de óxido de ferro (ferrugem) na armadura. A corrosão eletroquímica advém da presença de umidade, água ou solução aquosa na superfície da armadura, atuando como eletrólito, formando, assim, células de corrosão ou pilhas eletroquímicas onde ocorre a dissolução do aço nas regiões do ânodo.

O início da corrosão acontece após a quebra da película apassivadora da armadura causada pela carbonatação (acontece por causa da redução do pH do concreto causado pelo dióxido de carbono) ou por causa dos íons cloretos (concentração de cloreto na interface concreto e armadura) (MONTEIRO E MEDEIROS, 2017).

No entanto, um projeto ou construção inadequados, a falta de compreensão do ambiente de serviço ou a manutenção inadequada de estruturas de concreto podem permitir a entrada de cloretos no concreto, resultando na destruição do filme passivo que protege a armadura e no consequente início da corrosão do aço. A corrosão da armadura provoca fissuração e deslocamentos do concreto de cobrimento, diminui a área da seção transversal de uma barra de aço e afeta o desempenho mecânico da estrutura de concreto (RIBEIRO et al., 2022).

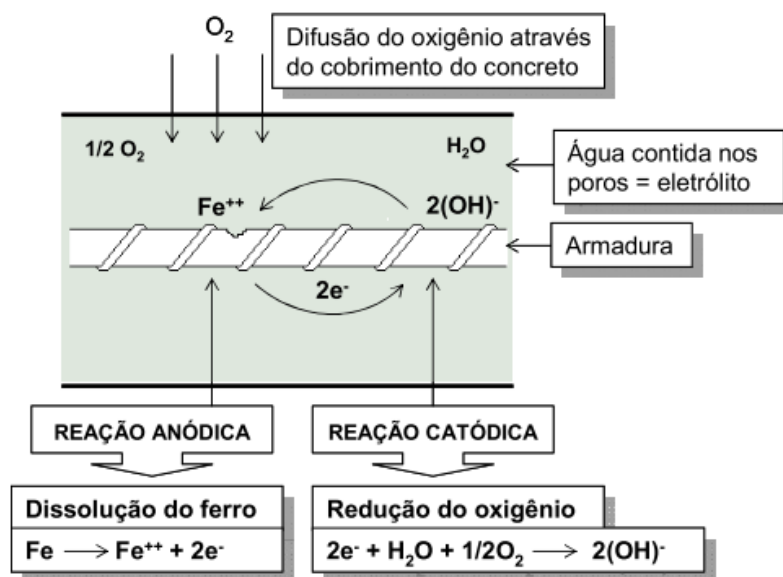
A maioria dos metais encontra-se na natureza sob formas de compostos óxidos e sulfetos metálicos e são considerados termodinamicamente estáveis por apresentarem energia inferior ao dos metais. Uma quantidade de energia é aplicada na extração do metal a partir de seus minérios, o que aumenta a energia do material final. Com essa energia superior, o metal tende a regressar ao seu estado original através de uma reação espontânea com líquidos e gases do meio ambiente, o que caracteriza o processo de corrosão. Dessa forma, a corrosão é o inverso do processo metalúrgico (Gentil, 1996).



Fonte: Gentil (1996).

Helene (1993) define que em se tratando da deterioração de aço, dois são os processos de corrosão que podem agir; corrosão eletroquímica e oxidação direta. Sendo a oxidação direta onde uma reação gás-metal forma uma película de oxido de ferro uniforme e contínua na armadura, popularmente denominada ferrugem. Esse processo é lento à temperatura ambiente e não provoca alteração significativa do metal, a menos que existam na atmosfera gases muito agressivos. Já a corrosão eletroquímica acontece como resultado da formação de pilha ou célula de corrosão, com reações de oxirredução e a circulação de íons através de um eletrólito, devido a presença de umidade, água ou uma solução aquosa na superfície das barras ou no concreto que a envolve e possam atuar como eletrólito, uma diferença de potencial e oxigênio formando sobre a superfície do metal zonas anódicas (reação de oxidação) e zonas catódicas (reação de redução).

Figura 6 - Esquema simplificado da célula de corrosão



Fonte: CEB 152 (1984)

O concreto fornece a armadura uma proteção física, que separa o aço do meio externo, e uma proteção química, em função do pH elevado, contribuindo para a estabilidade da capa que protege a armadura (MEIRA, 2017).

A argamassa autoadensável (AAA) é parte integrante do concreto autoadensável (CAA) e pode ser usada como reforço estrutural, reparo de estruturas, reboco e também na produção de concreto transmissor de luz. De acordo EFNARC (2002), concreto autoadensável (CAA) é “concreto que é capaz de fluir sob seu próprio peso e preencher completamente a cofragem, mesmo na presença de reforço denso, sem a necessidade de qualquer vibração, mantendo homogeneidade”(TUAUM; SHITOTE; OYAWA, 2018).

Várias investigações foram realizadas sobre a utilização de resíduos de vidro como agregados e também substituição parcial do cimento Portland em compósitos cimentícios. A implementação bem-sucedida de vidro reciclado em materiais de construção pode reduzir o descarte de vidro no fim da vida útil em aterros sanitários e reduzir os problemas ambientais das indústrias de construção e pedreiras. A pesquisa sobre agregado de vidro e seu impacto no desempenho do concreto mostra resultados promissores que oferecem alternativas aos agregados e ao cimento Portland. No entanto, uma grande desvantagem reside na possibilidade de expansão e fissuração pós-cura devido à reação álcali-sílica (ASR) dos agregados de vidro (Mahmood e Kashani, 2022). A utilização de resíduos de vidro em compósitos cimentícios também reduz o consumo de energia, matérias-primas naturais e emissão de CO₂ (ADESINA et al., 2022).

2.9. Fator agressividade do ambiente

Segundo a NBR 6118 (2014) a agressividade do meio ambiente tem relação com as ações físicas e químicas que atuam nas estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto.

De acordo com a mesma norma, projetos de estruturas devem classificar a agressividade ambiental de acordo com a Tabela 6 e pode ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes.

Tabela 6 - Classes de agressividade ambiental

| Classe de agressividade ambiental | Agressividade | Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto | Risco de deterioração da estrutura |
|-----------------------------------|---------------|--|------------------------------------|
| I | Fraca | Rural | Insignificante |
| | | Submersa | |
| II | Moderada | Urbana ^{1), 2)} | Pequeno |
| III | Forte | Marinha ¹⁾ | Grande |
| | | Industrial ^{1), 2)} | |
| IV | Muito forte | Industrial ^{1), 3)} | Elevado |
| | | Respingos de maré | |

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

Para atender os parâmetros de resistência a compressão e durabilidade do concreto, deve-se adotar os requisitos mínimos apresentados na Tabela 7 levando em consideração a relação de água/cimento.

Tabela 7 - Correspondência entre classe de agressividade e relação a/c e qualidade do concreto

| Concreto | Tipo | Classe de agressividade (tabela 6.1) | | | |
|------------------------------------|------|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| | | I | II | III | IV |
| Relação água/cimento em massa | CA | ≤ 0,65 | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,45 |
| | CP | ≤ 0,60 | ≤ 0,55 | ≤ 0,50 | ≤ 0,45 |
| Classe de concreto (ABNT NBR 8953) | CA | ≥ C20 | ≥ C25 | ≥ C30 | ≥ C40 |
| | CP | ≥ C25 | ≥ C30 | ≥ C35 | ≥ C40 |

NOTAS

1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

É importante ressaltar que os requisitos das Tabelas Tabela 6 e Tabela 7 são válidos para concretos que utilizam o cimento Portland e atenda as normas citadas na NBR 6118 (ABNT, 2014).

De acordo com a mesma legislação o cobrimento mínimo da armadura é o menor valor que deve ser respeitado ao longo de todo o elemento. Para garantir o cobrimento mínimo, o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal, que é o cobrimento mínimo com um acréscimo da tolerância de execução (Δc). Assim, as dimensões das armaduras e os espaçadores devem respeitar os cobrimentos nominais, estabelecidos na Tabela 8, para $\Delta c = 10$ mm.

Tabela 8 - Correspondência entre classe de agressividade e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

| Tipo de estrutura | Componente ou elemento | Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1) | | | |
|-----------------------------------|------------------------|--|----|-----|------------------|
| | | I | II | III | IV ³⁾ |
| | | Cobrimento nominal mm | | | |
| Concreto armado | Laje ²⁾ | 20 | 25 | 35 | 45 |
| | Viga/Pilar | 25 | 30 | 40 | 50 |
| Concreto protendido ¹⁾ | Todos | 30 | 35 | 45 | 55 |

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118

O cobrimento de concreto insuficiente facilita processos de deterioração como a corrosão das armaduras, pois proporciona acesso mais direto dos agentes agressivos externos (SOUZA E RIPPER, 1998).

2.10. Análise Bibliométrica

A análise bibliométrica foi desenvolvida para descrever por técnicas quantitativas e estatísticas os aspectos da literatura e de outros meios de comunicação, surgindo da

necessidade da avaliação da produção científica. Entre alguns métodos estão a lei de produtividade de Lotka (1926), a lei de dispersão científico de Bradford (1934) e o modelo de distribuição e frequência em um texto de Zipf (1949) (ARAÚJO, 2006).

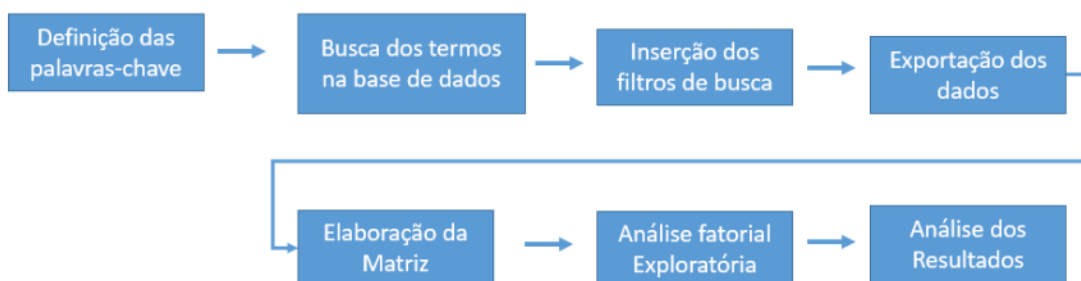
Outros métodos também utilizados são o método de Acoplamento Bibliográfico (AB) de autores de Kessler (1963), onde os artigos que possuam fontes semelhantes apresentam proximidade teórica e/ou metodológica entre si; e o método da Análise de Cocitação de Autores (ACA), que analisa a intensidade e frequência que os artigos são citados juntos nos mesmos artigos, desse modo a maior frequência de cocitação representa maior relação entre os citados (GRÁCIO, 2016).

As bases de dados Web of Science (Thomson Reuters) e Scopus (Elsevier) são as bases mais utilizadas para pesquisas bibliométricas pois possuem grande acervo de artigos e elas possuem informações como a citação de autores, países, publicação por ano, entre outros dados como citação, afiliações e tipo de documento.

A base de dado escolhida para fazer a análise bibliométrica do compósito cimentício com o vidro foi a Scopus, que embora seja mais recente que a *Web of Science*, a *Scopus* afirma possuir o maior banco de dados de resumo e citações com revisão por pares (ELSEVIER, 2021).

Após definir qual será a base de dados, será feito a busca dos artigos utilizando as palavras-chave do tema deste trabalho. A Tabela 7 representa as etapas da análise bibliométrica.

Figura 7 - Passos para análise Bibliométrica



Fonte: (QUEVEDO-SILVA et al., 2016)

As palavras-chave definidas para realizar a busca foi determinada como Concreto, Concreto Armado, Argamassa, Agregado Miúdo, Vidro e Corrosão, porém foram utilizadas em inglês: Concrete, Mortar, Paste, Aggregate, Glass, Corrosion.

Foram formadas quatro strings de busca com essas palavras com objetivo de obter maior quantidade de artigos encontrados. Para conectar os termos chave, foram utilizados operadores booleanos. A Tabela 9 mostra a quantidade de artigos encontradas nas bases de dados utilizando as strings de busca.

Tabela 9 - Quantidade de artigos encontrados na base de dados

| | STRINGS de Busca | Nº de Artigos | Nº de Artigos Brasil |
|-----------|---|----------------------|-----------------------------|
| 1º | ("self-compacting concrete" AND glass AND corrosion) | 26 | 0 |
| 2º | ((("self-compacting concrete" OR mortar) AND glass) | 2845 | 54 |
| 3º | ((("self-compacting concrete" or mortar) AND glass AND corrosion) | 180 | 3 |
| 4º | (Cement* OR Concret* OR Aggregate*) AND Glass AND Corrosion | 1661 | 14 |

Fonte: Próprio Autor (2022).

Vale salientar que na busca na base de dados SCOPUS foram feitas para pesquisar as strings nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos, sendo usado a ferramenta de filtro de "TITLE-ABS-KEY". Com a *String (Cement* OR Concret* or Aggregate) And Glass And Corrosion* foram encontrados 1661 documentos, sendo deles 14 artigos do Brasil.

Analisando os países de origem das publicações observa-se que a metade das pesquisas se concentra nos quatros primeiros países em número de publicações, sendo eles: Estados Unidos, China, Canadá e Índia.

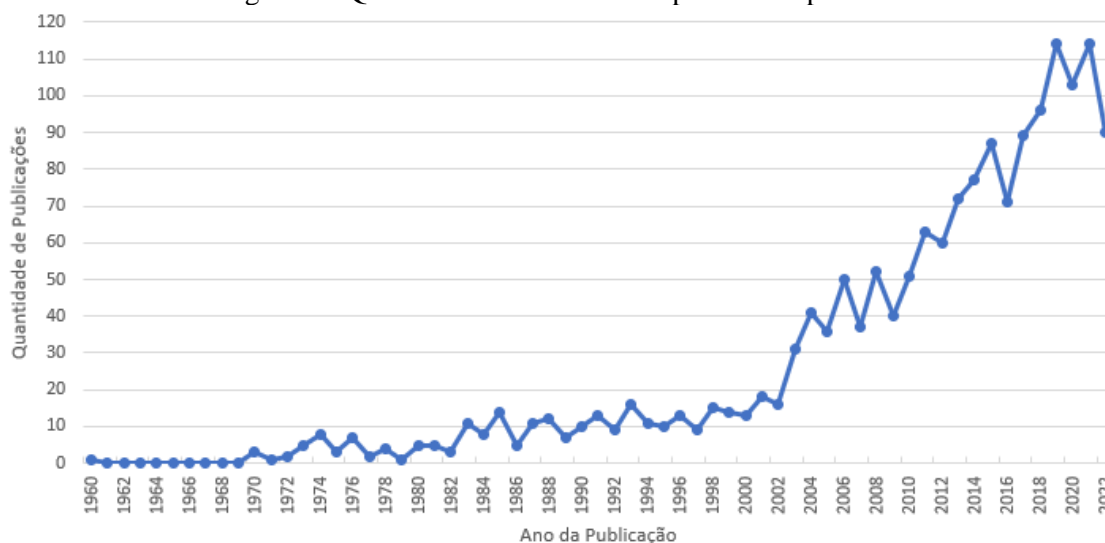
Tabela 10 – Origem das publicações

| Posição | País | Nº de Publicações | % |
|----------------|------------------------|--------------------------|----------|
| 1º | Estados unidos | 324 | 19,51 |
| 2º | China | 234 | 14,09 |
| 3º | Canadá | 216 | 13,00 |
| 4º | Índia | 106 | 6,38 |
| 5º | Alemanha | 95 | 5,72 |
| 6º | Austrália | 91 | 5,48 |
| 7º | Japão | 53 | 3,19 |
| 8º | Reino Unido | 52 | 3,13 |
| 9º | Egito | 40 | 2,41 |
| 10º | Itália | 39 | 2,35 |
| 11º | Coréia do Sul | 35 | 2,11 |
| 12º | França | 31 | 1,87 |
| 13º | Rússia | 31 | 1,87 |
| 14º | Irã | 28 | 1,69 |
| 15º | Hong Kong | 24 | 1,44 |
| 16º | Espanha | 24 | 1,44 |
| 17º | Portugal | 22 | 1,32 |
| 18º | Polónia | 19 | 1,14 |
| 19º | Arábia Saudita | 19 | 1,14 |
| 20º | Turquia | 17 | 1,02 |
| 21º | Emirados Árabes Unidos | 17 | 1,02 |
| 22º | Brasil | 14 | 0,84 |
| | Quantidade Total | 1661 | 92,17 |

Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 8 representa a quantidade de documentos publicados por ano e nota-se que a data da primeira publicação foi em 1960 e tendo um crescimento a partir do ano 2000.

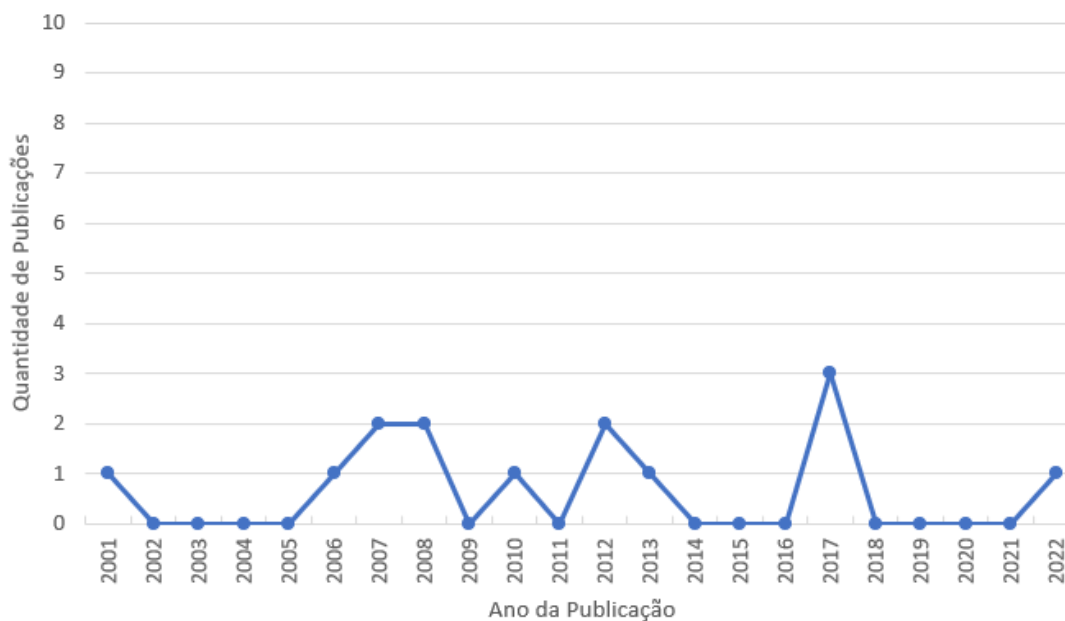
Figura 8 - Quantidade de documentos publicados por ano.



Fonte: adaptado pelo autor da pesquisa na base *Scopus*

O Brasil ocupa a 22ª posição com 14 documentos publicados, sendo o primeiro artigo publicado no ano 2001. Nos quatro anos seguintes não foram encontradas publicações que contêm as palavras vidro, corrosão e cimento ou concreto ou agregado na mesma *string*. Nos anos seguintes houve publicações e também teve novamente alguns anos não teve publicação. Em 2017 teve 3 de publicações, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Quantidade de documentos publicados por ano no Brasil.



Fonte: adaptado pelo autor da pesquisa na base *Scopus*

2.11. Utilização de resíduo de vidro na argamassa e concreto

Segundo Calister (2008), o concreto é um compósito derivado da mistura em proporções determinadas de cimento, água, agregado graúdo, agregado miúdo e em alguns casos aditivos.

De acordo com Bauer (2000), o cimento é o aglomerante hidráulico que garante a união do próprio cimento com os agregados, sendo que quando misturados com água e aditivos, forma-se uma mistura que endurece, podendo ser moldados em diferentes formatos ou onde lançados superficialmente.

No traço do concreto, o vidro tem a capacidade de ser usado para substituir parcialmente o cimento ou atuar como preenchimento do concreto como agregados graúdo ou miúdo (AFSHINNIA; RANGARAJU, 2015).

Em 2011, 47% dos materiais de vidro foram reciclados no Brasil, totalizando 470 mil toneladas. O vidro pode ser 100% reciclado, porém precisa ser separado por processos manuais pois nele não pode conter pedaços de espelhos, lâmpadas, vidros planos usados em automóveis e construção civil. Por esses tipos de vidro possuem composição química diferente, e quando usados em recipientes causam trincas e defeitos nas embalagens (CEMPRE, 2021).

Devido a similaridade na estrutura química do vidro com a areia e para dar um descarte mais apropriados para os tipos de vidro não passíveis de reciclagem, por causa de outros materiais, existem estudos na área de materiais para estudar a viabilidade de utilizar o vidro como um material alternativo em substituição do agregado miúdo na argamassa e no concreto (TINOCO E JÚNIOR, 2018).

Devido ao fator ambiental e planejamento de recursos, a construção civil tem utilizado diversos materiais através da substituição de algum dos componentes da argamassa ou do concreto. Essa substituição quando feita de modo seguro e seguindo normas técnicas, tem provocado economia nas obras. Para a utilização do vidro como material constituinte do concreto, este deve ser separado por tipo ou cor, e preparado com granulometria para substituição do agregado miúdo (BARELA; MOURA; BELLINASO, 2020).

Segundo o estudo feito por Mohajerani et al. (2017), o resíduo de vidro triturado (CWG) tem potencial para ser usado como agregado em misturas de concreto e asfalto, podendo substituir agregados finos no concreto em cerca de 20%. O mesmo estudo aponta que o pó de vidro fino (GLP) é classificado como um material pozolânica e a quantidade ideal de substituição de cimento por GLP é de 10%. A espuma de vidro residual pode substituir até 15% dos agregados finos e 40% dos agregados graúdos, concluindo que é necessário realizar mais pesquisas para esclarecer as contradições em relação às propriedades do concreto contendo CWG como agregado fino, uma investigação mais aprofundada das propriedades do concreto espumoso de vidro residual e concreto reforçado com fibra ultraleve contendo resíduos de vidro expandido e o uso de pó de vidro como um enchimento no asfalto.

Tinoco e Junior (2018) fizeram uma revisão literária da utilização do vidro moído como um substituto parcial do agregado miúdo na composição do concreto. A partir do acréscimo de vidro ao traço do concreto ou da argamassa, foram observados o aumento da resistência à compressão na faixa de 10% à 35% de resíduo de vidro em relação à massa total do agregado miúdo. Com a diminuição dos vazios causada pela adição do pó de vidro, a densidade do concreto aumenta dificultando a presença de umidade e diminuindo a chance de patologias como salitre e corrosão da armadura tornando totalmente viável essa substituição.

A utilização de garrafas long neck moídas para substituição parcial de areia na produção de argamassa como aponta Trentin et al., (2020) é viável considerando a melhora significativa da resistência mecânica das argamassas em relação ao traço de referência. A maior resistência foi obtida com a substituição de 50% de resíduo de vidro moído. Nos ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade os melhores resultados foram obtidos com o tempo de cura de 63 dias. Concluindo que a substituição de agregado miúdo em argamassas por resíduo de vidro moído das garrafas long neck é viável considerando as propriedades mecânicas, pois, aumenta a resistência mecânica das argamassas em relação ao traço de referência.

O mesmo acontece se o agregado miúdo na argamassa de cimento for substituído por resíduos de vidro de monitores de computador e de televisões conforme o estudo de Ling e Pou (2011) que obtiveram como resultado a semelhança das propriedades entre a

argamassa com areia e argamassa com esse tipo de vidro e ainda foi verificado que a argamassa com vidro impediu a lixiviação de chumbo, concluindo que essa substituição é viável em argamassas de cimento.

Na busca por substituir parcialmente o cimento por resíduo de vidro moído de indústrias de reciclagem de vidro e verificar a aplicabilidade em concreto, Matos (2010) estudou a substituição de cimento por vidro em pó (VP) em doses de 10% e 20%. Como resultado concluiu que as argamassas contendo VP apresentaram melhor desempenho com as dosagens de substituição com relação à penetração de íons cloreto e expansão devido à reação álcali-sílica. A absorção de água por capilaridade foi similar nas argamassas de controle e com substituição de VP. Aos 7 e 28 dias a resistência mecânica foi diminuindo com a dosagem de substituição de VP, ficando menor do que a argamassa de controle, mas aos 90 e 180 dias a argamassa com VP atingiu os níveis da argamassa de controle. A carbonatação foi maior nas argamassas VP, o que é comum quando se utiliza materiais pozzolânicos. Concluindo assim que o VP pode ser utilizado em concreto.

Também é possível substituir o agregado miúdo por resíduo de vidro reciclado no CAA de acordo com o estudo de Sharifi, Houshiar e Aghebati (2013) que utilizou o vidro em seis proporções variando de 0% a 50% que obteve como resultado o aumento da fluidez, diminuição das resistências à compressão, flexão e cisalhamento do concreto com o aumento da porcentagem de vidro. Porém não foi notável a redução da resistência do concreto com as proporções variantes do resíduo de vidro concluindo-se que pode-se usar o vidro como agregado miúdo na produção de CAA de forma padronizada.

Ainda se falando da substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro no CAA, Barbosa, Ribeiro e Coutinho (2021) verificaram o impacto dessa substituição com rejeitos de vidro laminado utilizando o método de Tutikian e Dal Molin (2015) com teores de 10%, 20% e 40% resultando na melhora das propriedades do concreto auto adensável sendo o teor ótimo de substituição de 20% que manteve resistência do traço referência e melhora na coesão sem perda na trabalhabilidade.

Uma revisão de Saman, Moghaddam e Moghaddam (2021) sobre os efeitos da substituição parcial de agregados graúdos e miúdos por partículas de vidro e borracha nas propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade do CAA resultou na melhora da trabalhabilidade, redução da resistência a compressão e flexão e da velocidade do pulso

ultrassônico e em questão da durabilidade tanto o vidro quanto a borracha podem melhorar significativamente a resistência contra o ataque do ácido sulfúrico.

Kou e Poon (2009) também estudaram os efeitos do caco de vidro de garrafas com três cores diferentes nas propriedades fresca e endurecida do CAA na qual substituiu a areia e o granito de 10mm apresentando como resultado aumento no fluxo de queda, na taxa de bloqueio, no teor de ar e na resistência a penetração de íons cloreto e diminuição da resistência a compressão, da resistência à tração, do módulo de elasticidade estático e da retração da secagem das misturas com o acréscimo dos teores de vidro reciclado avaliando que é viável produzir CAA com cacos de vidro reciclado.

Há estudos que revelam que quando o vidro é moído a uma certa finura ele apresenta propriedades cimentícias devido à reação pozolânica conforme diz Kalakada, Doh e Chowdhury (2022) que fez sua pesquisa utilizando concreto feito com cimento substituído por pó de vidro grosso (<150mm) que apresentou resultados satisfatórios com 30% de nível de substituição obtendo melhor trabalhabilidade e maior resistência a penetração de íons cloreto se comparado ao traço de controle.

2.12. Técnicas de análise do concreto quanto a possibilidade de corrosão

Alguns ensaios para análise de ocorrer a corrosão no concreto são:

1. Ensaio de migração ou difusão de íons de cloreto
2. Profundidade de carbonatação
3. Resistividade elétrica
4. Potenciais de corrosão
5. Resistência de polarização
6. Ultrassom
7. Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS)

Dentre essas técnicas, são estudadas apenas as técnicas: Espectroscopia de impedância eletroquímica, Resistividade Elétrica e Ensaio de difusão de íons de cloreto.

2.12.1. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

Para analisar o comportamento de corrosão das amostras examinadas, em primeiro lugar, é intrinsecamente exigido determinar os números de constantes de tempo para correlacionar com cada reação que está ocorrendo. Para entender o mecanismo de corrosão, é importante os números das constantes de tempo predominantes em cada sistema examinado. Em primeiro lugar, isso ajuda a determinar as reações que ocorrem em um sistema eletroquímico e selecionar um circuito elétrico equivalente e avaliar seus parâmetros. Estes contribuem para uma análise quantitativa e permitem a participação de cada elemento no mecanismo de corrosão (MEYER et al., 2022).

Considerando as parcelas da Espectroscopia de impedância Eletroquímica (EIE), existem três regiões distintas que definem o comportamento eletroquímico no concreto (Diab, Aliabdo, Mohamed, 2015; Meyer et al., 2021).

A primeira região é entre 10^5 Hz e $\sim 10^3$ Hz, descreve a resistência do eletrólito do concreto e a segunda entre as frequências $\sim 10^3$ Hz e $\sim 10^0$ Hz (GHORBANI et al., 2018).

A terceira região é caracterizada em baixa frequência, comumente inferior a 10^0 Hz (até a 10^{-2} Hz), que descreve as reações de interface entre a superfície da barra de aço com o eletrólito penetrado no concreto (pasta) com suas características (íons porosos, agregados e intermediários) (HU et al., 2022; Osório et al. 2010).

No formato Nyquist, os dados de impedância são gráficos no plano complexo, constituído de uma componente real (Z' - resistiva) e uma componente imaginária (Z'' - capacitiva). O diagrama de Nyquist, também conhecido como representação de Argand ou Colo-Cole, consiste em uma série de pontos, cada um representando a grandeza e a direção do vetor de impedância para uma frequência em particular. O diagrama é um plano complexo (real imaginário) de coordenadas cartesianas, em que se tem na abscissa a parte real (termos resistivos) e na ordenada a parte imaginária (termos capacitivos ou indutivos) (RIBEIRO; SOUZA E ABRANTES, 2015).

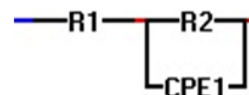
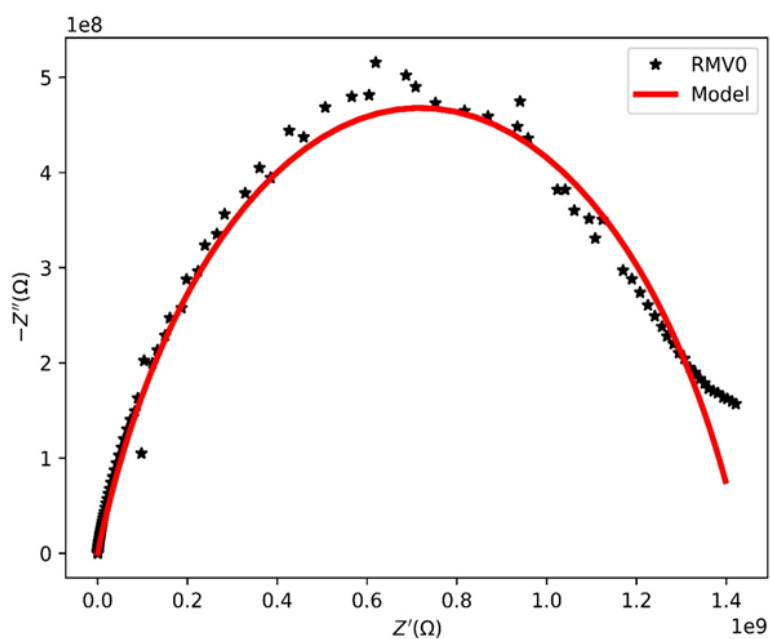
A Figura 10 mostra o diagrama de Nyquist típico, acompanhado do seu circuito equivalente de Randles para a amostra referência. A presença de semicírculos deslocados sugere um comportamento não ideal do capacitor, conduzindo à introdução do elemento

de fase constante (CPE) nos circuitos equivalentes. Sagues, Kranck e Moreno (1995) introduziram esse elemento em sistemas que exibem processos de polarização simples. Eles concluíram que alguma melhoria é obtida se o CPE é usado em vez de um capacitor ideal. Em outro trabalho, Feliu et al. (1998), propuseram um sistema mais complexo e introduziram um CPE e parâmetros difusionais no circuito equivalente. Isso conduziu a um aumento na precisão da determinação da resistência de polarização quando isso era possível (HOPE; PAGE; IP, 1986).

Com o diagrama de Nyquist, faz-se a extrapolação da parte direita do semicírculo até encontrar o eixo horizontal. O diâmetro do semicírculo é a resistência à transferência de carga (R_t), equivalente à resistência de polarização (R_p). Assim, quanto maior o diâmetro deste semicírculo, maior a resistência R_p e, conseqüentemente, menor a taxa de corrosão (HOPE; PAGE; IP, 1986).

O circuito equivalente típico da Figura 10 proposto por Randles mostra a correlação entre o fenômeno de corrosão e o circuito equivalente e que é bastante aceita em diversas pesquisas. O diagrama equivalente, apresentado na Figura 10, está associado a uma resistência “offset aparente” (R_1) em série com a rede da argamassa (R_2Q_2) (RIBEIRO; SOUZA E ABRANTES, 2015).

Figura 10 - Diagrama de Nyquist para a amostra referência



Fonte: Próprio Autor (2022).

2.12.2. Resistividade Elétrica Volumétrica

Segundo SILVA (2013), a resistividade elétrica caracteriza a dificuldade dos íons se moverem no interior do concreto, controlando o fluxo iônico em solução aquosa nos poros do concreto.

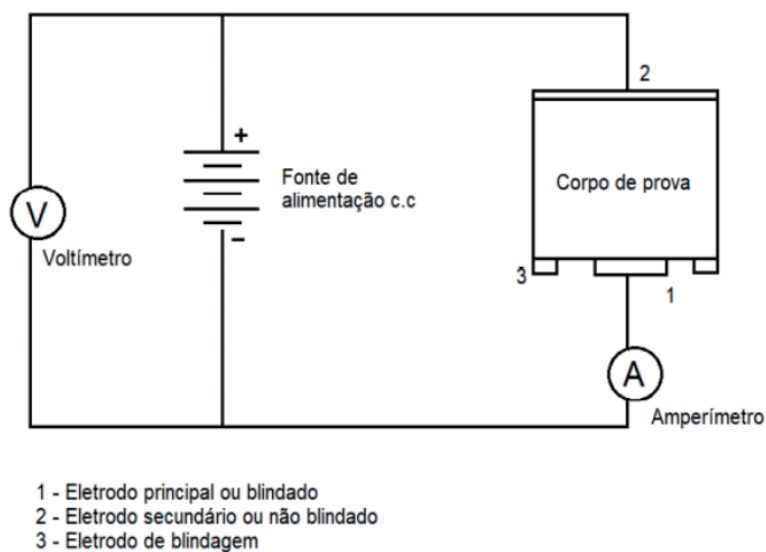
A resistividade elétrica do concreto consiste então na oposição do concreto na passagem de corrente elétrica e o seu conhecimento permite prever o início da corrosão na estrutura, mas este ensaio não consegue informar se está havendo corrosão, apenas mostra que a estrutura está suscetível a ocorrer esta patologia (SILVA, 2019).

Segundo Costa e Azzi (2017), a resistividade elétrica permite avaliar a vida útil da estrutura, identificando os pontos mais porosos do concreto e a previsão do início da corrosão nas estruturas expostas à cargas de íons cloreto. Quanto mais poroso for o concreto, maior é a penetração de íons cloreto, ou seja, maiores chances de corrosão. Com seu estudo para determinar a resistividade do concreto utilizou-se a resistividade volumétrica e superficial na qual concluiu-se que os valores obtidos no superficial são maiores que os valores do volumétrico sendo que em ambos a resistividade elétrica aumenta proporcionalmente com a idade do concreto.

A porosidade do material é um fator que influencia a resistividade. A porosidade tem relação ao fator a/c , adição de minerais e idade. Segundo Meira (2006), pelo teor de umidade nos poros e a composição química da solução nos poros sabe-se que pode variar a resistividade elétrica. Assim sendo, a resistividade é proporcional a resistência da passagem da corrente elétrica, isto é, quanto maior a resistividade elétrica, maior será a resistência por ele a um determinado fluxo elétrico (SANTOS; SILVA E LEITE, 2021).

Atualmente, o método para determinar a resistividade elétrica volumétrica do material no Brasil é normatizado pela ABNT NBR 9204:2012 (Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-volumétrica - Método de Ensaio). No item 3.2 desta norma, a resistividade elétrica volumétrica é definida como: “relação entre o gradiente de potencial paralelo à direção da corrente nesse material e a densidade da corrente”. A Figura 11 demonstra o esquema elétrico do ensaio da resistividade elétrica desta referida norma.

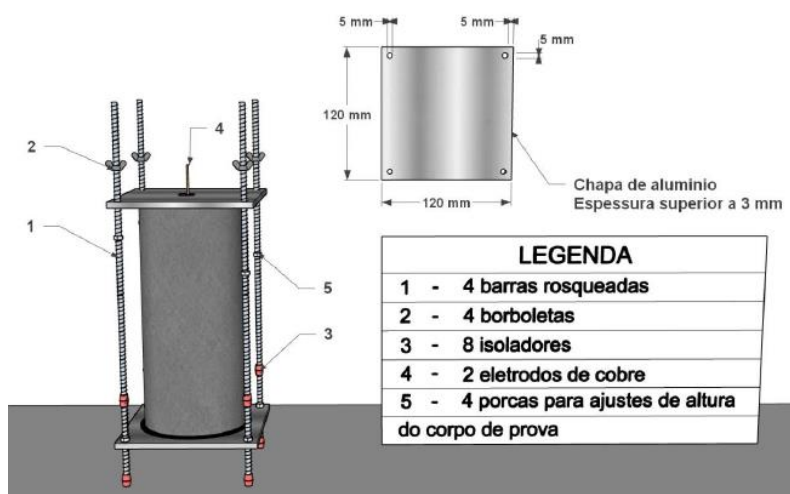
Figura 11 - Esquema elétrico do ensaio da resistividade volumétrica



Fonte: ABNT NBR 9402 (2012)

Martins et al. (2021) avaliou a influência da variação das dimensões dos corpos de prova na resistência elétrica. Nos ensaios foram utilizadas amostras com dimensões \emptyset 50x100mm, \emptyset 100x100mm, \emptyset 100x200mm e \emptyset 150x150mm, porém a diferença nos resultados de resistência não fora expressiva. Para realização do ensaio, foi utilizado o equipamento proposto por Lamounier et al. (2014), sendo uma adaptação do equipamento determinado pela norma ABNT NBR 9204:2012, conforme a Figura 12, onde utilizaram chapas de cobre como eletrodo em substituição do mercúrio líquido. Além disso, a resistividade foi avaliada na amostra saturada em água.

Figura 12 - Sistema do ensaio de resistividade elétrica com chapas de cobre



Fonte: Martins (2021).

O cálculo de resistência elétrica e resistividade elétrica volumétrica calculada pela Equações 3 e 4, conforme demonstra a norma ABNT NBR 9204:2012.

Equação de resistência elétrica volumétrica:

$$R_V = \frac{U}{i} \times 1000 \quad (\Omega) \quad (3)$$

Onde: R_V = resistência elétrica volumétrica do corpo de prova, em Ohms (Ω);

U = Tensão aplicada ao corpo de prova, em volts (V);

i = Corrente elétrica que passa pelo corpo de prova, em miliamperes (mA);

Equação de resistividade elétrica volumétrica:

$$\rho_V = R_V \times \frac{A}{h} \quad (\Omega\text{cm}) \quad (4)$$

Onde: ρ = resistividade elétrica (Ωm);

R_V = Resistência elétrica volumétrica

A = Área da seção onde é aplicada a tensão (m^2);

h = Altura do corpo de prova, em centímetros (m)

Relação entre a equação 3 e 4, temos a Equação 3:

$$\rho_V = \frac{U}{i} \times \frac{A}{h} \times 1000 \quad (\Omega\text{m}) \quad (5)$$

Segundo Martins et al. (2021), a relação entre a resistividade elétrica e a probabilidade de corrosão está de acordo com o CEB 192 (1989) (Tabela 11).

Tabela 11 - Relação entre resistividade elétrica e probabilidade de corrosão

| Resistividade do Concreto | Probabilidade de Corrosão |
|----------------------------------|----------------------------------|
| > 200 Ohm | Desprezível |
| 100 a 200 | Baixa |
| 50 a 100 | Alta |
| < 50 | Muito alta |

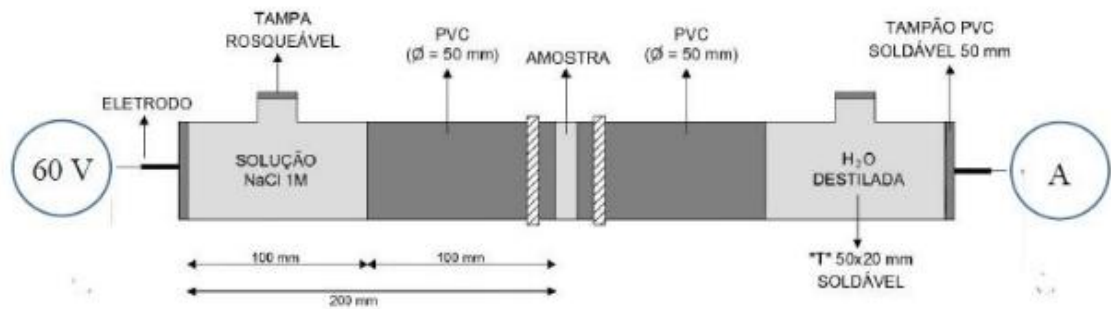
Fonte: Martins et al. (2021)

2.12.3. Ensaio de difusão de íons de cloreto.

O ensaio de difusão de íons de cloreto é um ensaio importante para avaliar a durabilidade e capacidade do concreto em se proteger de agentes agressivos, pois neste ensaio estão envolvidos os quatro mecanismos de transporte desses agentes: difusão, absorção capilar, permeabilidade e migração iônica (RIBEIRO et al., 2012).

O ensaio para avaliar a penetrabilidade dos íons cloreto por meio da avaliação da carga total passante é normatizada pela Norma americana ASTM C-1202/19 (*Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*). Este ensaio tem como objetivo a execução de uma diferença de potencial entre duas células: uma catódica contendo solução de cloretos, e a outra célula anódica sem cloretos, entre elas é colocada o corpo de prova a ser analisada. Através da diferença de potencial, os íons cloreto é forçado a migrar da primeira célula catódica para a anódica, atravessando o corpo de prova de concreto. A célula catódica é preenchida por cloreto de sódico (NaCl) a uma concentração de 1 M e a célula anódica é preenchida com água destilada (RIBEIRO et al. 2012). A Figura 13 mostra uma representação do ensaio proposto por Ribeiro e Cunha (2014) e utilizado por Martins (2021).

Figura 13 – Representação esquemática do ensaio de difusão de íons cloreto



Fonte: Martins et al. (2021) apud

A norma ASTM C-1202/19 sugere a utilização do processo de saturação a vácuo dos corpos de prova antes da realização do ensaio, porém caso não seja possível, uma alternativa é manter a amostra imersa em água por 24 horas antes do ensaio, de modo que o corpo de prova esteja saturado (Ribeiro et al., 2012).

Segundo a norma ASTM C-1202/19, o cálculo da carga elétrica passada é calculado pela corrente elétrica medida a cada intervalo de 30 minutos, ao longo de 6 horas, conforme Equação 6.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{120} + 2I_{150} + 2I_{180} + 2I_{210} + 2I_{240} + 2I_{270} + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (6)$$

Onde: Q = Carga passada, em Coulombs (C);

I_0 = Corrente elétrica imediatamente após aplicação da tensão, em Amperes (A);

I_t = Corrente elétrica no tempo t indicados em minutos, em Amperes (A);

Para corpos de prova com diâmetros diferentes de 95mm, o valor da carga total passada obtida pela Equação 6 deve ser ajustado pela Equação 7.

$$Q_S = Q_X \times \left(\frac{95}{X}\right)^2 \quad (7)$$

Onde: Q_S = Carga passada através de um diâmetro de 95mm, em Coulombs (C);

Q_X = Carga passada através do diâmetro da amostra, em Coulombs (C);

X = Diâmetro da amostra, em Milímetros (mm);

De acordo a Tabela 12 com da norma ASTM C-1202 (2019), a taxa de permeabilidade de íons de cloreto é

Tabela 12 - Classificação da penetrabilidade do íon cloreto

| Carga Passante (Coulombs) | Penetração do íon cloreto |
|----------------------------------|----------------------------------|
| > 4000 | Alto |
| 2000 – 4000 | Moderado |
| 1000 – 2000 | Baixo |
| 100 - 1000 | Muito Baixo |
| < 100 | Insignificante |

Fonte: Próprio Autor (2022).

Um estudo realizado por Lopes et al (2020) compara o desempenho dos concretos autoadensável e convencional, referente à corrosão estrutural, chegando-se a conclusão que falhas na concretagem e na dosagem de aditivos do CAA, causaram manifestações patológicas no concreto, provocando o aumento da porosidade e a presença de vazios estruturais nos quais facilitam a penetração de agentes agressivos as armaduras, como cloretos, causadores da corrosão estrutural.

Com intuito de aumentar a qualidade do concreto e a durabilidade das estruturas, Vieira (2003) fez um estudo com base na adição de sílica, um mineral que pode trazer benefícios as propriedade dos concreto, e o efeito de sua adição em relação a corrosão da armadura por íons de cloreto e por carbonatação, utilizando um concreto com relação água\aglomerante de 0,40 a 0,70 e teores de sílica ativa entre 0% a 20%, chegando a conclusão de que a sílica ajuda na resistência a corrosão causada por íons cloreto, independente da dosagem acrescentada, já no caso da corrosão causada por carbonatação, o efeito da sílica depende do teor utilizado, até 10% não altera a resistência a corrosão, já teores acima de 10% aumentam o risco de corrosão por carbonatação.

A corrosão nas armaduras é causada pela despassivação da mesma sendo provocada pela passagem de íons de cloreto pela amostra de concreto. Martins et al. (2021) fez um estudo com corpos de prova de concreto auto adensável, avaliando a resistividade elétrica aos 28 e 90 dias chegando-se a conclusão de que houve um aumento de resistividade com o tempo de cura em todas as amostras, não havendo diferença significativa na dispersão nos diferentes diâmetros dos corpos de prova.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado para pesquisa é o Experimental, pois envolve qualquer tipo de experimento que auxilie no desenvolvimento da pesquisa. E o estudo se configura numa abordagem quantitativa, pois após a aplicação da pesquisa e de posse dos dados coletados, chega-se à última etapa do trabalho, que é a apresentação dos resultados obtidos. Eles são compostos por números, dados, quadros e gráficos, que vão mostrar os resultados de forma quantitativa (NOVAES et al., 2019).

3.1. Materiais

Os materiais utilizados na dosagem do compósito cimentício com resíduo de vidro foram o cimento Portland, areia lavada comum, resíduo de vidro moído, sílica ativa, superplastificante e água. Será apresentado com detalhes as propriedades de cada um dos constituintes.

3.1.1. Cimento

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPV ARI de alta resistência inicial segundo classificação da ABNT NBR 5733/91 e de acordo com a ASTM C150/150M-18 é classificado como tipo III para quando se deseja alta resistência inicial. A Tabela 13 apresenta as características físicas e químicas do aglomerante.

Tabela 13 – Característica física e química do cimento

| Norma ABNT NBR | | Valor | Unidade |
|-------------------------------------|--------|-------|--------------------|
| Massa específica (ABNT NBR 23:2001) | | 3,07 | Kg/dm ³ |
| Tempo de Pega (ABNT NBR 65:2003) | Início | 137 | min |
| | Fim | 169 | min |

Fonte: Adaptado de Empresa de Cimentos Liz S.A., 2021.

3.1.2. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia média. Possui granulometria abaixo de 4,8mm e tem origem no município de Itajubá, estado de Minas Gerais.

3.1.3. Resíduo de vidro

O resíduo de vidro triturado foi adquirido na empresa RANERI situada no município de Varginha-MG na qual realiza serviço de trituração de resíduos de vidro dos tipos laminado, temperado, espelho e para brisa de carros e revende para empresas de piso cerâmico, Jateamento etc.

Para chegar no estado final, os resíduos de vidro passam pelo processo de trituração na qual se inicia com o picotador, onde é colocado os resíduos de vidro que chegam na empresa, em seguida passam pelo triturador e através de uma esteira vão para o moinho na qual possui três peneiras, separando o vidro em três granulometrias diferentes para comercialização conforme a Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 - Processo de Trituração de Resíduo de Vidro na empresa RANERI



Fonte: Próprio autor

Figura 15 - Moinho com três peneiras na empresa RANERI



Fonte: Próprio autor

Cada um desses sacos da figura 5 armazena vidro com granulometrias diferentes de acordo com que passam pelas peneiras. A primeira peneira possui abertura de 5 a 10mm, a segunda peneira possui abertura de 1 a 5 mm e a terceira é de 0 a 1 mm. O saco da esquerda armazena o resíduo que não passou pelas peneiras no qual é colocado no triturador passando novamente pelo processo até conseguir passar pelas peneiras.

Para este trabalho será utilizado o resíduo de vidro triturado da peneira 3 com a menor granulometria, na qual possui um aspecto de areia conforme a Figura 16.

O resíduo de vidro foi caracterizado a sua composição granulométrica utilizando a NBR 248:2003; a massa específica utilizando a NBR 52:2009; e a massa unitária empregando a NBR 45:2006.

Figura 16 - Resíduo de vidro triturado no estado mais fino



Fonte: Próprio autor

3.1.4. Adição mineral

A Sílica Ativa é um produto de origem metalúrgica, sendo um pó fino obtido através do processo de fabricação do ferro silício ou silício metálico. Por causa do alto teor de SiO₂ (no formato amorfo não cristalino) e da elevada finura (partículas esferas menores que 1µm), a sílica ativa apresenta altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento, fazendo com que os concretos e argamassas possuam melhor desempenho. A sílica ativa foi utilizada como agregado nesta pesquisa foi fornecida pela empresa Tecnosil.

Tabela 14 - Características físicas e químicas da Sílica Ativa obtido na ficha técnica do fabricante

| Propriedades | Resultado | Unidade |
|----------------------------------|------------------|--------------------|
| Teor de SiO ₂ | > 90 | % |
| Massa Específica | 2.220 | Kg/m ³ |
| Superfície Específica | 19.000 | m ² /Kg |
| Formato da Partícula | Esférico | - |
| Massa Unitária – Nao Densificado | < 350 | Kg/m ³ |
| Massa Unitária – Densificado | > 350 | Kg/m ³ |

Fonte: Adaptado do Grupo Tecnisil (2021)

3.1.5. Aditivo superplastificante

Foi utilizado aditivo com efeito superplastificante de alta tecnologia ADITIBRAS ADI-SUPER H25. São formulados a base de polímeros de éteres carboxílicos modificados. Uma das especialidades do ADI-SUPER H25 é para concreto autoadensáveis.

Tabela 15 - Características do superplastificante obtido na ficha técnica do fabricante

| Propriedades | Metodologia | Resultado | Unidade |
|---------------------|---------------------|------------------------|-------------------|
| Aparência | ABNT NBR 11768:2019 | Líquido Castanho Claro | - |
| Massa Específica | ABNT NBR 11768:2019 | 1,055 ± 0,020 | g/cm ³ |
| Ph | ABNT NBR 11768:2019 | 5,50 ± 1,0 | - |

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica ADI-SUPER25, 2021

Figura 17 - Aditivo Aditibras H25



Fonte: Própria do Autor (2022)

3.1.6. Água

Para o preparo da argamassa foi utilizada a água potável fornecida pela COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais – proveniente da rede pública de abastecimento e coletada no Laboratório de Materiais de Construção Civil IRN.

3.2. Métodos

Para obter o traço referência (TR) de AAA com a substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro, foi adotado como base o traço desenvolvido por Silva (2019), onde foi utilizado o método proposto por Tutikian (2004).

A partir do traço desenvolvido por Silva (2019), o traço referência foi acertado fazendo as devidas adequações, começando com uma relação a/c de 0,30 e 1,00% de superplastificante em relação ao peso do cimento, até obter a consistência apropriada.

Na execução dos TR, primeiramente foram adicionados e misturados os materiais secos (cimento, sílica ativa, areia fina), em seguida foi adicionado a água de amassamento e por último o superplastificante.

Após definido o TR, a areia foi substituída os resíduos moídos de vidro (RMV) em porcentagem sobre o peso do agregado miúdo, sendo o primeiro traço começando

com proporção de 5% e os traços seguintes com 10%, 15%, 20% e 30% de substituição da areia por RMV.

Na execução dos traços, foram misturados primeiramente e de forma manual os materiais secos como o cimento, areia, sílica ativa e o resíduo moído de vidro. Em sequência, na metade desse material seco foi adicionado aproximadamente 80% de água e misturados na argamassadeira. Na argamassadeira, foi adicionado o restante da água junto com o SPA, ficando o traço inicial conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Traço inicial da amostra

| Traços | Cimento | Sílica | Vidro | Areia | a/c | SP |
|---------------|----------------|---------------|--------------|--------------|------------|-----------|
| Inicial | 1,00 | 0,10 | 0,00 | 2,00 | 0,35 | 1,00 |

Fonte: Própria do autor (2022)

Logo após a execução do traço inicial, foram feitos os ensaios no estado seco, para garantir a argamassa como autoadensável. O traço inicial teve que ser ajustado com o aumento da relação a/c e de superplastificante para que a argamassa tenha característica autoadensável. A Tabela 17 apresenta os traços realizados.

Tabela 17 - Traço referência e com resíduo de vidro

| Traços | % Vidro | Cimento | Sílica | Vidro | % Areia | a/c | SP |
|---------------|----------------|----------------|---------------|--------------|----------------|------------|-----------|
| Referência TR | 0 | 1 | 0,10 | 0,0 | 1,0 | 0,45 | 1,51 |
| RMV 5% | 5 | 1 | 0,10 | 0,05 | 0,95 | 0,45 | 1,51 |
| RMV 10% | 10 | 1 | 0,10 | 0,10 | 0,90 | 0,45 | 1,51 |
| RMV 15% | 15 | 1 | 0,10 | 0,15 | 0,85 | 0,45 | 1,51 |
| RMV 20% | 20 | 1 | 0,10 | 0,20 | 0,85 | 0,45 | 1,51 |
| RMV 30% | 30 | 1 | 0,10 | 0,30 | 0,70 | 0,45 | 1,51 |

Fonte: Própria do autor (2022)

Esses traços foram produzidos em dois grupos, sendo o primeiro para produzir os corpos de prova para realização dos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral, absorção, índice de vazios e massa específica. O segundo grupo foi produzido

para repedir os ensaios de compressão axial, além de produzir as amostras para ensaio de impedância eletroquímica, ensaio de resistividade elétrica e de difusão de íons de cloreto.

A Tabela 18 apresenta a quantidade, os ensaios e dimensões produzidas para cada ensaio para cada grupo de corpo de prova produzido.

Tabela 18 – Dimensões e os ensaios de cada grupo de amostras produzido

| Ensaio | Grupo 1 | Grupo 2 | Dimensões do Corpo de Prova |
|---|---------|---------|----------------------------------|
| Resistencia à compressão axial | 3 | 3 | cilindro Ø5x10cm |
| Resistência à tração por compressão axial | 3 | - | cilindro Ø5x10cm |
| Absorção de água, índice de vazios e massa específica | 3 | - | cilindro Ø5x10cm |
| Ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica | - | 3 | Pastilha com cilindro Ø1,5x0,2cm |
| Ensaio de Resistividade Elétrica | - | 2 | cilindro Ø5x5cm |
| Ensaio de difusão de íons de cloreto | - | 2 | cilindro Ø5x5cm |

Fonte: Própria do autor (2022)

3.3. Ensaio no estado fresco

De modo a avaliar as propriedades de argamassa autoadensável, os ensaios no estado fresco são os primeiros a serem feitos nos corpos de prova para verificar a sua característica autoadensável.

3.3.1. Viscosidade Plástica – Funil V

O ensaio de *mini v-funnel test* é utilizado para caracterizar a viscosidade é o método proposto por Okamura e Ouchi (2003) em que consiste em medir o tempo que a argamassa leva para passar pelo funil..

Inicialmente o funil é umedecido com água e preenchido até a sua borda superior com a argamassa, sem adensar. Após preenchido, a portinhola na parte inferior é aberta e inicia-se a marcação do tempo necessário para que toda a argamassa escoe pelo funil.

Okamura e Ouchi (2003), Nepomuceno et al. (2012) e Rao et al. (2015) definiram em seus trabalhos que o tempo para escoamento fique entre 7 e 11 segundos para que o tempo relativo de escoamento para argamassas fique próxima a 1. Gomes e Barros (2009) sugerem tempo de 5 a 10 segundos, resultando em R_m entre 1 e 2.

Figura 18 - Ensaio de viscosidade para obter o tempo de escoamento



Fonte: Própria do autor (2022).

3.3.2. Índice de Diâmetro de Espalhamento

Para determinar a fluidez da argamassa, o ensaio de *mini-cone slump flow test* é utilizado para analisar a capacidade de escoamento da argamassa pela ação do seu peso próprio, obtendo o diâmetro de espalhamento.

Okamura e Ouchi (2003), Nepomuceno et al. (2012) e Rao et al. (2015) definiram em seus trabalhos que o diâmetro fique entre 240 mm e 260 mm e para Gomes e Barros (2009), o valor do parâmetro de fluidez (G_m) deve ficar entre 3 e 8.

Figura 19 - Execução do ensaio de fluidez para obter o diâmetro de espalhamento



Fonte: Própria do autor (2022).

3.4. Ensaio no estado endurecido

Nos corpos de prova no estado endurecido foram utilizados os ensaios de absorção de água, índice de vazios, massa específica, ensaios de resistência a compressão axial e de tração por compressão diametral, ensaios de resistividade elétrica volumétrica, ensaios de permeabilidade de íons de cloreto, ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica e imagens no MEV.

Tabela 19 – Ensaios aplicados no AAA no estado endurecido.

| Ensaio | Norma ABNT ou ASTM | Dimensões do Corpo de Prova |
|---|--------------------|-----------------------------|
| Resistência à compressão axial | NBR 5739:2018 | cilindro Ø5x10cm |
| Resistência à tração por compressão axial | NBR 7222:2011 | cilindro Ø5x10cm |
| Absorção de água, índice de vazios e massa específica | NBR 9778:2005 | cilindro Ø5x10cm |
| Ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica | - | pastilha Ø1,5x0,2cm |

| | | |
|--|----------------|-----------------|
| Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica | NBR 9204:2012 | cilindro Ø5x5cm |
| Ensaio de difusão de íons de cloreto | ASTM 1202:2019 | cilindro Ø5x5cm |

Fonte: Própria do autor (2022).

A desmoldagem dos corpos de provas aconteceu após 24h da moldagem e submersas em água com 5% de cal até a data de realização dos ensaios.

Figura 20 – Corpos de prova submersos



Fonte: Própria do autor (2022).

3.4.1. Ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para executar esses ensaios, utilizou-se a norma NBR 9778:2005, onde 3 corpos de prova é colocado na estufa a 105°C por 72 horas. Após este período, os corpos de prova foram pesados e são anotadas suas massas em estado seco.

Para conseguir a massa submersa, os corpos de prova devem estar submersos em água por 72 horas e pesadas de forma hidrostáticas. E por final, as amostras são retiradas da água, enxugadas e pesadas numa balança analítica da marca Shimadzu, modelo

UX6200H com precisão de 0,01 g para obter a massa saturada da mesma, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Balança analítica para medida de massa



Fonte: Própria do autor (2022).

Com os dados da massa do corpo de prova seco e saturado, obtém-se a absorção de água (Ab), índice de vazios (i) e massa específica real (ρ_R) pelas seguintes Equações 8 a 10, respectivamente:

$$Ab = \frac{(M_{SAT} - M_{SECO})}{M_{SECO}} \times 100 \quad (8)$$

Sendo: M_{SAT} = Massa do corpo de prova saturado

M_{SECO} = Massa do corpo de prova seco a 105°C na estufa

$$i = \frac{M_{SAT} - M_{SECO}}{M_{SAT} - M_{IMERSO}} \times 100 \quad (9)$$

Sendo: M_{SAT} = Massa do corpo de prova saturado

M_{SECO} = Massa do corpo de prova seco a 105°C na estufa

M_{IMERSO} = Massa do corpo de prova imerso em água, saturado

$$\rho_R = \frac{M_{SECO}}{M_{SECO} - M_{IMERSO}} \quad (10)$$

3.4.2. Ensaio a resistência à compressão axial

Os ensaios para determinação da resistência a compressão axial para argamassas foram realizados utilizando a máquina INSTRON 8801. Os corpos de provas eram de formatos cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Foram mantidos em cura úmida até a ideia do ensaio. As bases dos corpos de provas foram preparadas por uma retificadora. Uma carga de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s foi aplicado até a ruptura do corpo de prova NBR 5738 (2018).

Os corpos de prova foram rompidos após 28 dias da moldagem e imersos nesse período em água.

Figura 22 – Ensaio de resistência a compressão axial



Fonte: Própria do autor (2022).

3.4.3. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral ou tração indireta, são obtidos de forma indireta por compressão diametral. Nesse ensaio, os corpos de provas cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura são posicionados horizontalmente na máquina INSTRON 8801 e colocar duas chapas de madeira sobre o prato desta máquina. A carga é aplicada, com crescimento constante da tensão de tração a uma velocidade de 0,05 MPa/s até a ruptura (ABNT NBR 7222, 2011).

Figura 23 – Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Própria do autor (2022).

Conforme a ABNT NBR 7222:2011, a resistência a tração calculada pela compressão diametral ou tração indireta é obtida utilizando a Equação 11, o qual utiliza a força de rompimento diametral, comprimento e diâmetro do corpo de prova.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (11)$$

Sendo: $f_{ct,sp}$ = Resistência à tração indireta, em megapascals (MPa);

F = Força máxima obtida no ensaio, em newtons (N);

L = Comprimento da amostra, em milímetros (mm);

d = Diâmetro da amostra, em milímetros (mm);

3.4.4. Resistividade Elétrica Volumétrica (REV)

Este ensaio foi baseado na norma ABNT NBR 9204:2012 e a adaptação do equipamento foi proposto por Lamounier et al. (2014).

Martins et al. (2021) desenvolveu o equipamento de resistividade elétrica volumétrica, o qual será utilizado neste trabalho. Foram moldados 2 corpos de prova para cada grupo de traços com 5 cm de altura, que foram conservados em câmara úmida por vinte e oito dias e no vigésimo oitavo dia realizado o ensaio. Para realizar a medição, os corpos de provas foram secos superficialmente e colocados entre as duas chapas de cobre ligadas por uma barra roscada de 1/4". Na barra roscada, entre as duas chapas, possui um isolador em cada barra para não passar corrente pelas barras (Figura 24).

Figura 24 - Ensaio de Resistividade Elétrica Volumétrica



Fonte: Própria do autor (2022).

Uma tensão de 50 V é aplicada no voltímetro, dele sai um cabo até a chapa de cobre superior, a corrente passa pelo corpo de prova, e a chapa de cobre inferior é ligada até um amperímetro, que é ligada em um voltímetro para confirmar a tensão de 50 V e retorna o no voltímetro. O tempo entre a remoção do corpo de prova da câmara até a medição não passou de 15 minutos.

3.4.5. Difusão de Íons de Cloreto

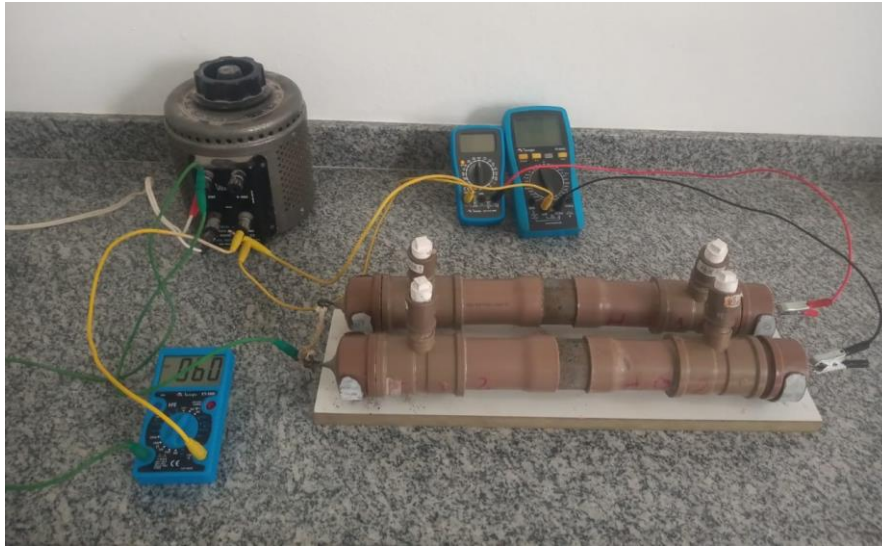
Para a execução de ensaio, foram utilizados tubos de 50 mm e conexões de PVC constituídas por um “Tê” soldável de redução de 50 mm x 25 mm, um cap soldável de 50 mm e plug tampão de $\frac{3}{4}$ ”. As amostras foram colocadas entre o tubo de PVC 50 mm, separando as duas células, anódica e catódica. Foram utilizadas fitas veda rosca e alto fusão para impedir o vazamento dos líquidos. Nas extremidades do equipamento, foi conectados um fio de cobre rígido em cada cap soldável.

Em um lado do tubo foi preenchida por cloreto de sódico (NaCl) a uma concentração de 1 M, célula catódica, e na outra preenchida com água destilada, formando a célula anódica.

Após colocado os líquidos e selado para que não haja vazamento, o ensaio consiste em aplicar uma tensão de 60 Volts, regulada a partir de um regulador de voltagem Varivolt, aplicada ao sistema por meio de fios de cobre posicionados nas extremidades do sistema e medido através de multímetros a corrente elétrica a cada 30 minutos, por um período de 6 horas.

No ensaio foram utilizados 2 corpos de prova de diâmetro 50 mm e com 50 mm de espessura conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Ensaio de difusão de íons de cloreto



Fonte: Própria do autor (2022).

3.4.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS).

As micrografias foram obtidas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) Modelo EVO MA15 da marca Carl Zeiss em 10 KV e ampliação de 1000 KX. A espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS) foi realizada com um espectrômetro da marca Oxford INCA Energy.

Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado para análise das amostras - marca Zeiss, modelo EVO MA15, Lab. de Físico-química UNIFEI/Itajubá

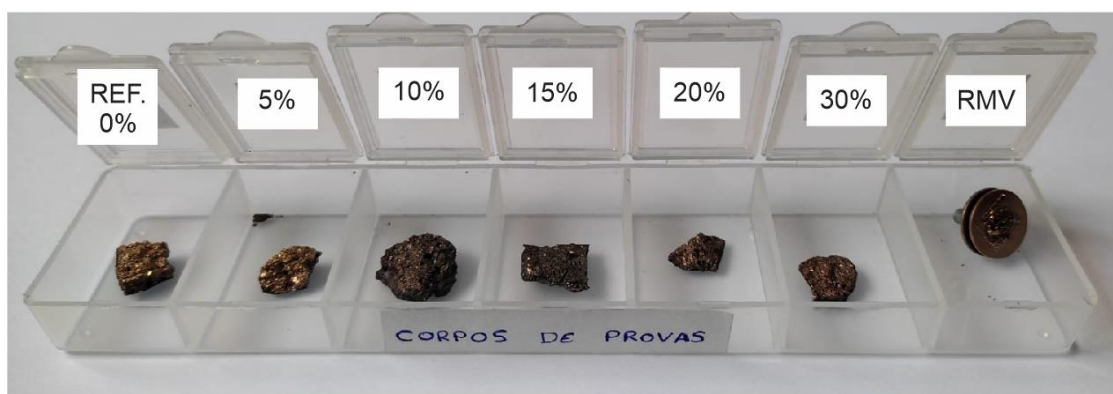


- 1-Detector EDS
- 2-Câmara à vácuo
- 3-Porta amostras
(Mesa giratória)

Fonte: Silva (2019)

As amostras de cada traço de AAA foram coletadas manualmente, sem fazer corte ou lixamento. Elas medem aproximadamente 1,00 cm² para caber no microscópio. Por se tratar de um material isolante elétrico, as amostras foram metalizadas com ouro, fazendo uma fina camada desse material excelente condutor de energia.

Figura 27 - Amostras de Argamassa Autoadensável para ensaios do MEV/EDS



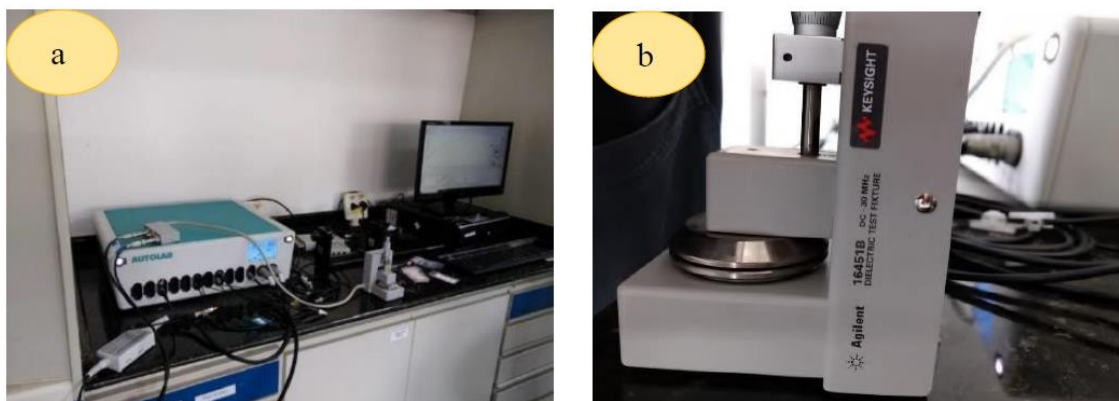
Fonte: Própria do autor (2022).

3.4.7. Espectroscopia de impedância

As medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) foram realizadas para verificar o comportamento das amostras com relação a corrosão. Para isso, foi utilizado o Potenciostato/Galvanostato modular da marca Autolab, juntamente com o software de aquisição de dados NOVA 2.1 e seus acessórios, que permitiu medir as impedâncias real e complexa entre as frequências de 1×10^{-1} a 5×10^5 Hz.

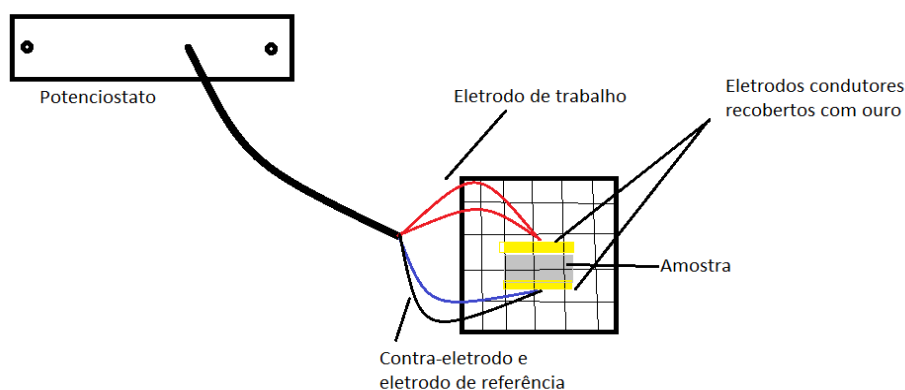
As amostras foram preparadas no formato de disco e com isso foi possível colocá-las entre dois eletrodos condutores recobertos com uma camada de ouro. Para esta medida foram utilizados o eletrodo de trabalho em uma face e os eletrodos de referência e contra eletrodo na outra face da amostra. Na Figura 28 (a) é possível observar o Potenciostato que é conectado a dois eletrodos condutores recobertos com um filme de ouro e a amostra ao centro. Todo o conjunto foi colocado no interior de uma gaiola de Faraday para evitar ruídos eletromagnéticos externos, como mostrado na Figura 28 (b)

Figura 28 - Potenciostato/Galvanostato modular da marca Autolab (a) e Eletrodo de trabalho: na face inferior, os eletrodos de referência e contra eletrodo na outra face (b).



Fonte: Própria do autor (2022).

Figura 29 - Montagem do experimento para a realização das medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica



Fonte: Própria do autor (2022).

A escolha do circuito equivalente foi realizada levando em conta o número de componentes misturados além da amostra referência. Com isso, para amostra referência foi utilizado um circuito resistivo em série com um segundo circuito em paralelo composto por uma resistência R e um elemento de fase CPE . Para as demais amostras foi acrescentado mais um circuito paralelo R/CPE para cada elemento acrescentado, como resíduo de vidro.

As micrografias foram obtidas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) Modelo EVO MA15 da marca Carl Zeiss em 10 KV e ampliação de 1000 KX. A

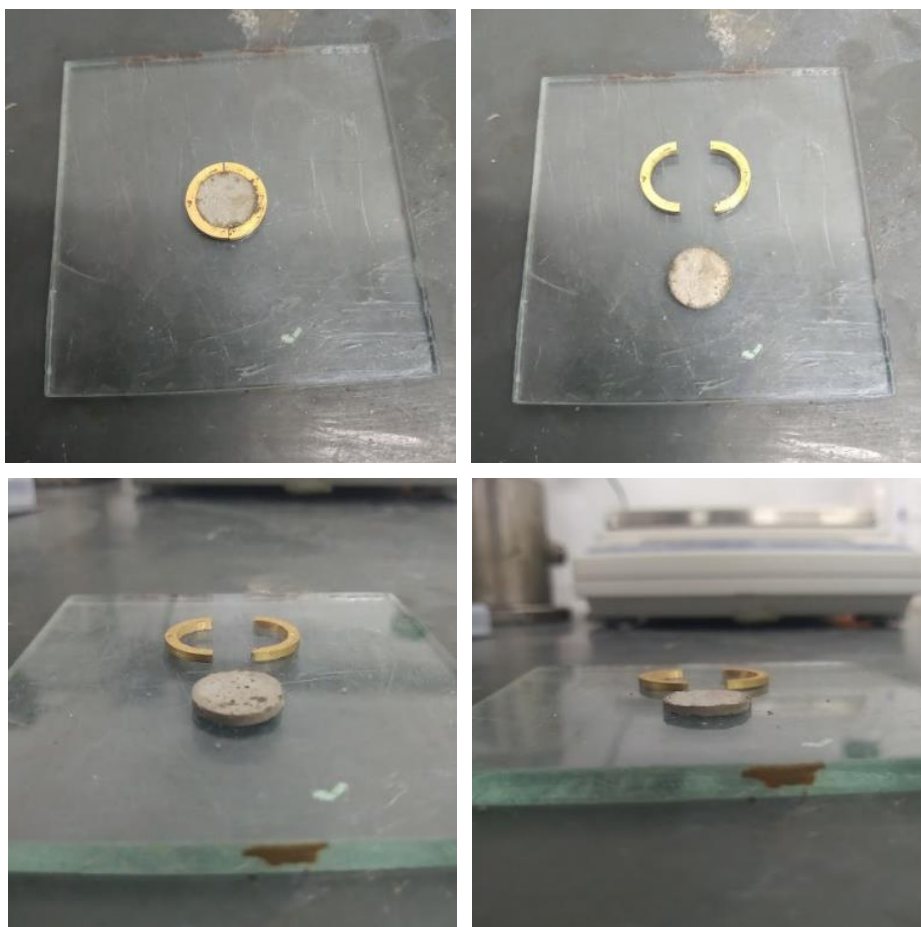
espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS) foi realizada com um espectrômetro da marca Oxford INCA Energy.

Para obter a partilha de argamassa, o molde bipartido foi usinado pela empresa Ômega em latão para receber argamassa e facilitar a desmoldagem. Para fazer o molde, foi preso em uma morsa uma barra de latão e nela feito um furo de 16 mm. Para conseguir a espessura de 2 mm foi utilizado um torno mecânico. Próxima etapa foi identificar os pares de moldes bipartidos para não misturar.

Para que os moldes bipartidos não abrem e se afastem um do outro, foi feito um furo do tamanho do diâmetro externo do molde bipartido de latão em uma placa de Policloreto de Vinila (PVC), de modo que o molde entre justo na placa de PVC.

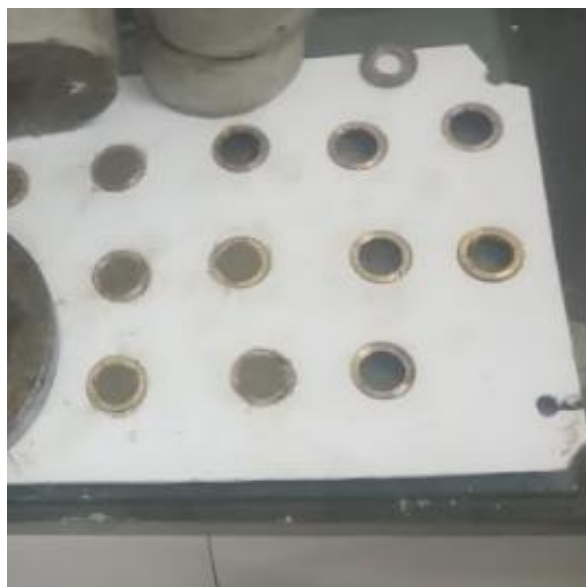
O molde bipartido foi colocado sob uma base de material acrílico para facilitar a desmoldagem (Figura 30).

Figura 30 - Execução e desmoldagem da pastilha de argamassa



Fonte: Própria do autor (2022).

Figura 31 - Placa de PVC para o molde bipartido de latão



Fonte: Própria do autor (2022).

4. RESULTADOS

As análises dos resultados são do tipo quantitativa, para poder compreender eventuais tendências e comportamentos. O primeiro subcapítulo mostra os resultados da caracterização do resíduo moído de vidro. O segundo e terceiro subcapítulo mostram, respectivamente, os resultados em estado fresco e endurecido da argamassa.

4.1. Caracterização da areia e do vidro moído

Os resultados obtidos nestes ensaios encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Características do resíduo de areia

| Ensaio | Metodologia | Resultado | Unidade |
|------------------|-------------------|-----------|--------------------|
| Massa Unitária | ABNT NBR 45:2006 | 1,24 | Kg/dm ³ |
| Massa Específica | ABNT NBR 52:2009 | 2,55 | g/cm ³ |
| Granulometria | ABNT NBR 248:2003 | Tabela 21 | - |

Fonte: Própria do autor

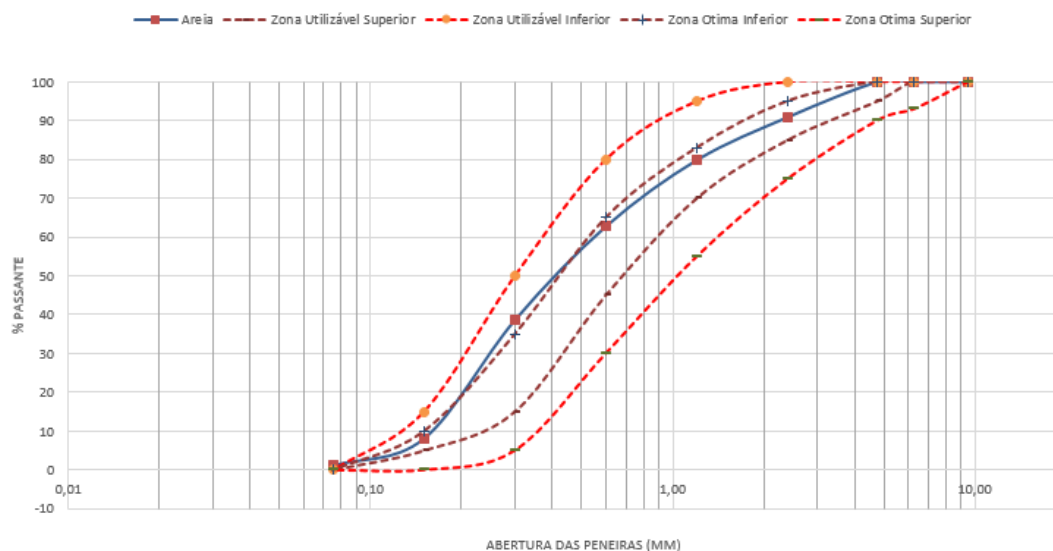
Segundo Trentin et al (2020), a massa específica e modulo de finura para vidro moído foram, respectivamente, 2,41 g/cm³ e 2,28. Valores próximos da areia. Com o ensaio granulométrico pode-se observar que o resíduo de vidro possui frações granulométricas bem pequena, na sua maior quantidade apresenta diâmetro menor que 0,6 mm, conforme pode observar na Tabela 21.

Tabela 21 - Tabela de Granulometria da Areia

| Abertura da peneira (mm) | % retida | % retida e acumulada | % passante e acumulada |
|--------------------------|----------|----------------------|------------------------|
| 4,75 | 0 | 0 | 100 |
| 2,40 | 9,1 | 9,1 | 90,9 |
| 1,20 | 11,1 | 20,1 | 79,9 |
| 0,60 | 17,1 | 37,2 | 62,8 |
| 0,30 | 24,1 | 61,4 | 38,6 |
| 0,15 | 30,5 | 91,9 | 8,1 |
| < 0,15 | 8,1 | 100,00 | 0 |

Fonte: Própria do autor

Figura 32 - Curva Granulométrica da Areia



Fonte: Própria do autor

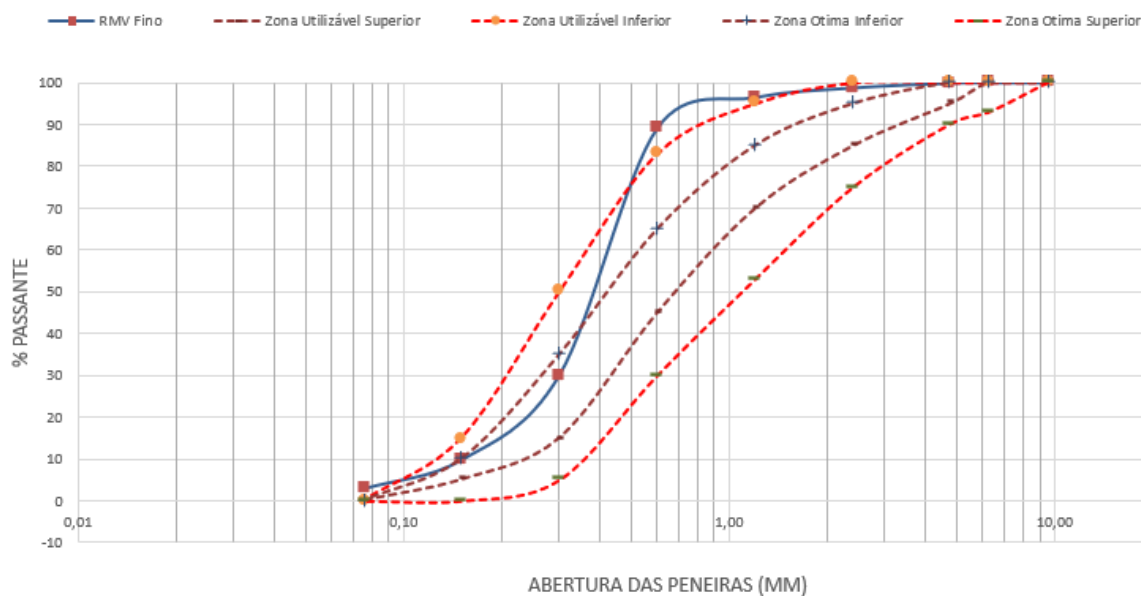
A curva da areia (Figura 32) a ser utilizada no experimento ficou dentro da curva granulométrica utilizável como agregado miúdo. Como a proposta é utilizar o RMV em substituição ao agregado miúdo, o RMV seguiu as mesmas porcentagens de massa retida que a areia.

Tabela 22 – Dados da quantidade de resíduo de vidro por aberturas de peneira

| Abertura da peneira (mm) | % retida | % retida e acumulada | % passante e acumulada |
|--------------------------|----------|----------------------|------------------------|
| 4,75 | 0,08 | 0,08 | 99,92 |
| 2,40 | 1,12 | 1,20 | 98,80 |
| 1,20 | 2,28 | 3,48 | 96,52 |
| 0,60 | 7,35 | 10,84 | 89,16 |
| 0,30 | 59,17 | 70,00 | 30,00 |
| 0,15 | 20,35 | 90,35 | 9,65 |
| 0,075 | 6,93 | 97,28 | 2,72 |
| < 0,15 | 2,72 | 100 | 0 |

Fonte: Própria do autor

Figura 33 - Curva granulométrica do resíduo de vidro



Fonte: Própria do autor

Pelo ensaio de granulometria do RMV, pôde-se observar que a curva do resíduo moído de vidro ficou fora do limite ótimo inferior. Pela Tabela 22, nota-se que a quantidade de RMV retido na peneira 0,30mm é mais que duas vezes a quantidade retido de areia.

Para utilizar o RMV em substituição a areia, foi realizado um método de correção da granulometria do resíduo de vidro de forma que ficasse próximo a granulometria da areia utilizada, que é o agregado miúdo que será substituído nesta pesquisa.

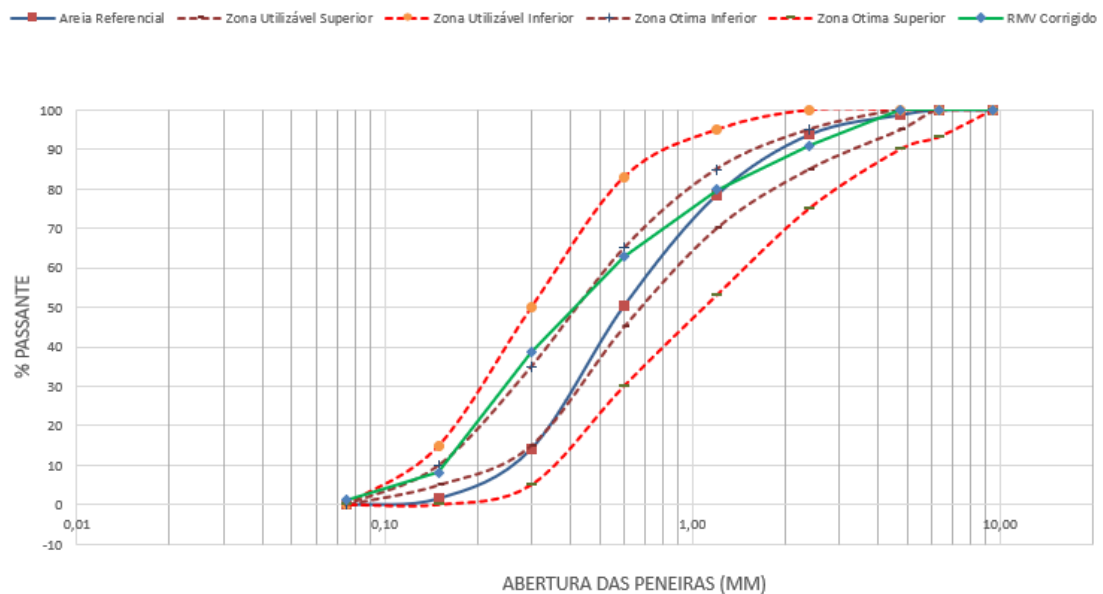
O processo iniciou com a separação da amostra de RMV através do uso de peneiras. Foi usado peneiras 4,75mm, 2,4mm, 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm, 0,15mm e 0,075mm e em sequência feito o cálculo, em porcentagem, necessário de material RMV retido em cada peneira, com base na porcentagem de areia retida em cada peneira.

Tabela 23 – Porcentagem de areia retida em cada peneira

| Abertura da peneira (mm) | % retida de areia |
|--------------------------|-------------------|
| 4,75 | 0 |
| 2,40 | 9,1 |
| 1,20 | 11,1 |
| 0,60 | 17,1 |
| 0,30 | 24,1 |
| 0,15 | 30,5 |
| 0,075 | 8,1 |
| < 0,15 | 100 |

Fonte: próprio autor

Figura 34 - Curva granulométrica do resíduo de vidro corrigida e da areia referencial



Fonte: Própria do autor

4.2. Propriedades no estado fresco

Os resultados dos ensaios no estado fresco da argamassa autoadensável (AAA) será apresentado nessa etapa.

4.2.1. Viscosidade Plástica – Funil V e Índice de Diâmetro de Espalhamento

Os resultados do ensaio de viscosidade plástica aparente “Funil V” (R_m) das argamassas são mostrados na Tabela 24, e foram realizados conforme método de Okamura e Ouchi (2003). Foi adotado um valor mínimo para R_m de 1 e máximo de 2, portanto, sendo o escoamento menor que 10 segundos.

Tabela 24 – Tabela com valores do Tempo e R_m

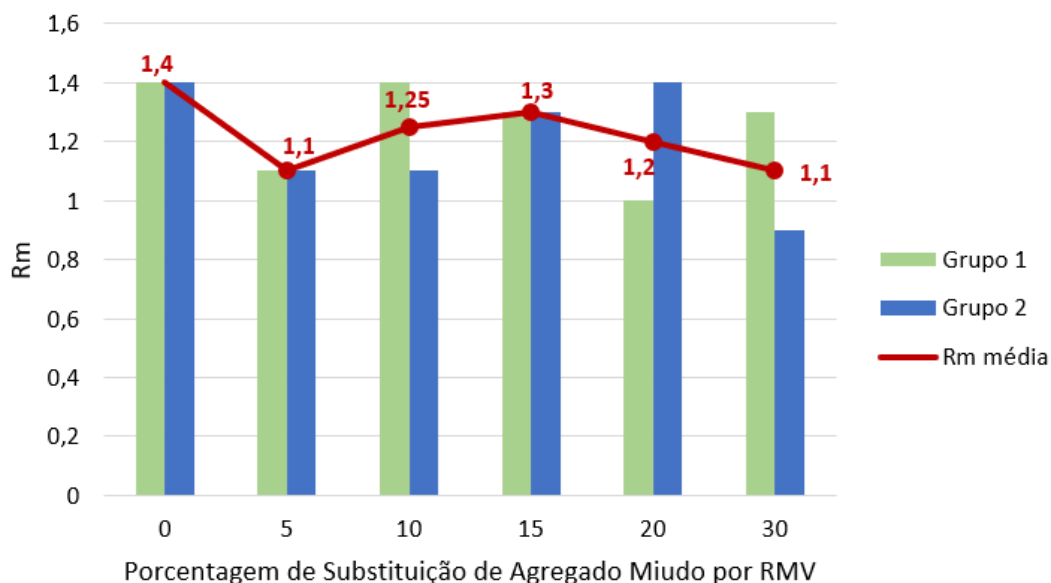
| Mistura | Grupo 1 | | Grupo 2 | |
|---------|-----------|----------------------------|-----------|----------------------------|
| | Tempo (s) | R_m ($1 < R_m < 2$) | Tempo (s) | R_m ($1 < R_m < 2$) |
| TR | 7 | 1,4 | 7 | 1,4 |
| RMV 5% | 9 | 1,1 | 9 | 1,1 |
| RMV 10% | 7 | 1,4 | 9 | 1,1 |
| RMV 15% | 8 | 1,3 | 8 | 1,3 |
| RMV 20% | 10 | 1,0 | 7 | 1,4 |
| RMV 30% | 8 | 1,3 | 11 | 0,9 |

Fonte: Própria do autor

Os valores de tempo de escoamento das amostras do Grupo 1 ficaram entre 7 e 10 segundos, e o R_m com valores entre 1,0 e 1,4. Para as amostras do Grupo 2, o tempo ficou entre 7 e 11 segundos, e os valores de R_m entre 0,9 e 1,4. Exceto a amostra com 30% do Grupo 2, todos os outros valores ficaram entre os intervalos adotados por Okamura e Ouchi (2003), Nepomuceno et al. (2012) e Rao et al. (2015).

Os resultados do teste de espalhamento e o tempo de escoamento do AAA são mostrados na Tabela 24 – Tabela com valores do Tempo e R_m , no qual é possível observar que com o resíduo de vidro houve uma diminuição do diâmetro de espalhamento e aumento do tempo de escoamento (Figura 35).

Figura 35 – Comparação dos dados de viscosidade pelo ensaio Funil V



Fonte: Própria do autor

4.2.2. Ensaio de espalhamento (*slump flow test*)

Os resultados do ensaio de espalhamento da argamassa autoadensável pelo “*Slump flow test*” são mostrados na Tabela 25, foram realizados conforme metodologia citados pelo autor no Capítulo anterior e realizado de acordo com o Método proposto por Okamura e Ouchi (2003). Foram realizados 2 traços de concretos para moldar os corpos de provas, estes separados em Grupo 1 e Grupo 2.

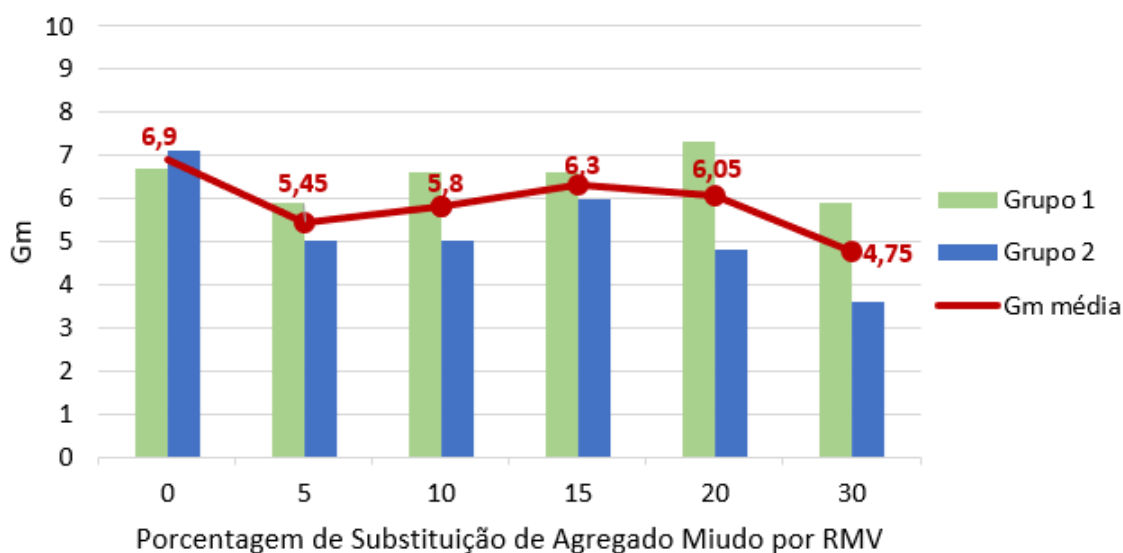
Tabela 25 – Dados do espalhamento *Slump Flow Test*

| Mistura | Grupo 1 | | | | Grupo 2 | | |
|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|-------------|
| | d1 (mm) | d2 (mm) | d0 (mm) | Gm (3<Gm<8) | d1 (mm) | d2 (mm) | Gm (3<Gm<8) |
| TR | 288 | 275 | 100 | 6,7 | 285 | 285 | 7,1 |
| RMV 5% | 265 | 260 | 100 | 5,9 | 245 | 245 | 5 |
| RMV 10% | 275 | 275 | 100 | 6,6 | 245 | 245 | 5 |
| RMV 15% | 275 | 275 | 100 | 6,6 | 265 | 265 | 6 |
| RMV 20% | 285 | 290 | 100 | 7,3 | 235 | 245 | 4,8 |
| RMV 30% | 260 | 265 | 100 | 5,9 | 215 | 215 | 3,6 |

Fonte: Própria do autor (2022)

O valor de Gm foi calculado pela Equação 2, tendo os valores de Gm no intervalo de 5,9 a 7,3 para o Grupo 1, o que corresponde a diâmetros de espalhamento entre 26,3 e 28,8 cm. Para o Grupo 2 os valores do diâmetro ficaram entre 21,5 e 28,5 cm e consequentemente os valores de Gm ficaram entre 3,6 a 7,1.

Figura 36 - Comparação dos dados do espalhamento Slump Flow Test



Fonte: Própria do autor (2022)

Os resultados mostram que os valores de Gm está entre os valores sugeridos por Gomes e Barros (2009) de $3 < Gm < 8$. Pela Figura 36 observa-se que à exceção do traço com 20% de RMV do Grupo 1, os demais traços resultaram em valores de Gm inferior ao traço com 0% (traço referencial). A média dos valores de Gm dos traços com 5%, 10%, 15%, 20% e 30% foram inferiores à média de Gm do traço referencial.

4.3. Propriedade no estado seco

Os resultados dos ensaios no estado endurecido da argamassa autoadensável (AAA) é realizada nessa etapa.

4.3.1. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Na Tabela 26 são mostrados os resultados do ensaio de absorção de água, índice de vazios, massa específica da amostra seca e massa específica da amostra saturada.

Todas as amostras com resíduos de vidro apresentaram a porcentagem de absorção e índice de vazios maiores que a amostra referencial.

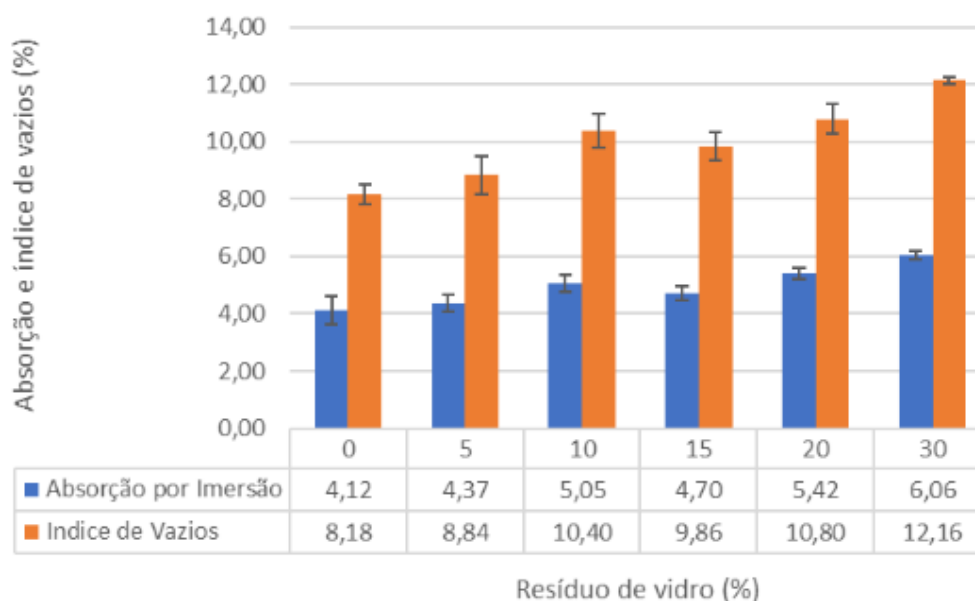
Tabela 26 - Ensaio de absorção de água, índice de vazios, massa específica da amostra seca e massa específica da amostra saturada

| Mistura | Absorção de água | Índice de Vazios | Massa Específica da Amostra Seca | Massa Específica da Amostra Saturada |
|---------|------------------|------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| TR | 4,07 % | 8,55 % | 2,10 | 2,19 |
| RMV 5% | 4,36 % | 8,82 % | 2,02 | 2,11 |
| RMV 10% | 5,00 % | 10,42 % | 2,08 | 2,19 |
| RMV 15% | 4,70 % | 9,86 % | 2,09 | 2,19 |
| RMV 20% | 5,39 % | 10,84 % | 2,01 | 2,12 |
| RMV 30% | 6,06 % | 12,16 % | 2,01 | 2,13 |

Fonte: Própria do autor (2022)

Com o aumento da porcentagem de substituição de areia por resíduo de vidro, aumentou a porcentagem de absorção de água e índice de vazios, exceto com teor de 15% de RMV que ficou abaixo do teor de 10% de RMV (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 37 - Absorção de água e índice de vazios



Fonte: Própria do autor (2022)

A diminuição da absorção de água do concreto com a substituição do vidro residual é devido à reação pozolânica do vidro residual, que melhora as qualidades de ligação da pasta de cimento (Dong et al., 2021). Além disso, o micro preenchimento de resíduos de vidro resulta em concreto mais denso preenchendo os vazios entre os ingredientes do concreto, resultando em menor absorção de água. No entanto, um aumento na absorção de água foi observado em uma dose maior de resíduos de vidro (30%) devido à falta de trabalhabilidade, o que aumentou os esforços de compactação, resultando em mais vazios no concreto endurecido e em maior absorção de água. Como resultado, uma dose mais alta de superplastificante é necessária para uma dose mais alta de resíduos de vidro (Dong et al., 2021).

4.3.2. Ensaio de Resistência a Compressão Axial

Os resultados do ensaio a compressão axial dos corpos de prova foram realizados após 28 dias da moldagem e os resultados estão mostrados na Tabela 27 e Tabela 28. Foram produzidos três corpos de prova para o Grupo 1 e duas do Grupo 2, e identificados os valores nas tabelas como Amostra 1, 2, 3 e média.

Os traços foram produzidos em dois grupos, pois o primeiro para realização dos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral, absorção, índice de vazios e massa específica. O segundo grupo para repetir os ensaios de compressão axial e produzir as amostras para ensaio de impedância eletroquímica, ensaio de resistividade elétrica e de difusão de íons de cloreto.

Tabela 27 - Ensaio de resistência à compressão axial dos traços do Grupo 1

| Traços | Resistência a Compressão (MPa) | | | | |
|---------|--------------------------------|-----------|-----------|-------|---------------|
| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Média | Desvio Padrão |
| TR | 46,19 | 36,84 | 54,27 | 45,27 | 8,01 |
| RMV 5% | 50,86 | 56,83 | 46,54 | 54,41 | 5,17 |
| RMV 10% | 41,76 | 47,94 | 28,10 | 39,27 | 10,15 |
| RMV 15% | 42,51 | 49,95 | 46,08 | 46,18 | 3,72 |
| RMV 20% | 47,28 | 48,98 | 45,69 | 47,32 | 1,65 |

| | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|------|
| RMV 30% | 49,68 | 43,12 | 53,27 | 48,69 | 5,15 |
|---------|-------|-------|-------|-------|------|

Fonte: Própria do autor (2022)

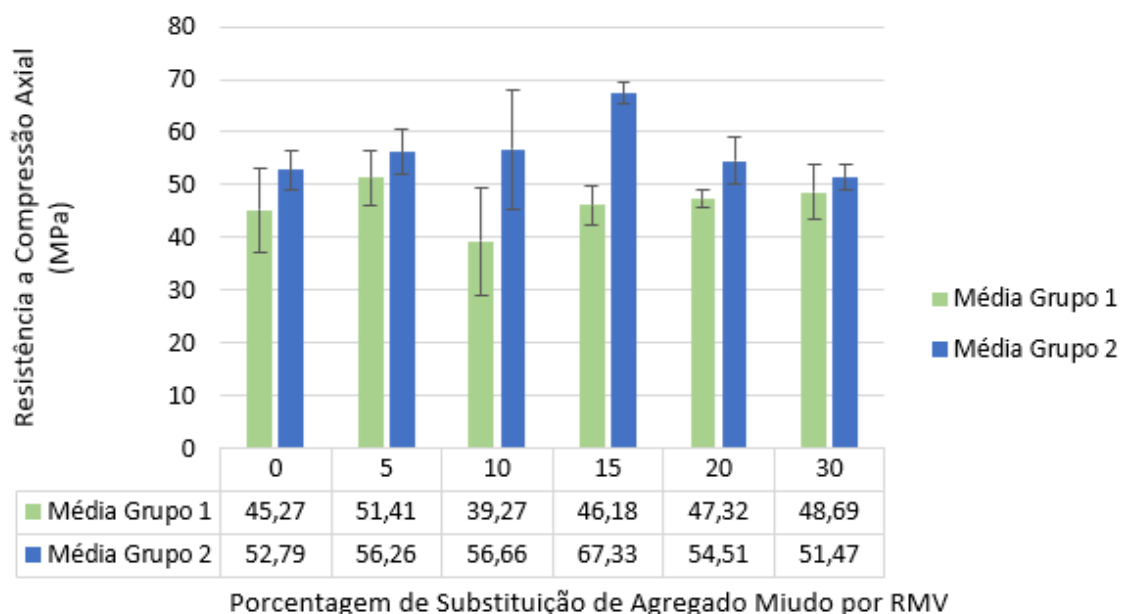
Tabela 28 - Ensaio de resistência à compressão axial dos traços do Grupo 2

| Traços | Resistência a Compressão (MPa) | | | |
|---------|--------------------------------|-----------|-------|---------------|
| | Amostra 1 | Amostra 2 | Média | Desvio Padrão |
| TR | 55,37 | 50,21 | 52,79 | 3,66 |
| RMV 5% | 53,27 | 59,30 | 56,29 | 4,26 |
| RMV 10% | 51,78 | 57,52 | 54,65 | 11,14 |
| RMV 15% | 65,90 | 58,76 | 62,33 | 2,02 |
| RMV 20% | 51,35 | 57,68 | 54,52 | 4,48 |
| RMV 30% | 49,64 | 53,30 | 51,48 | 2,58 |

Fonte: Própria do autor (2022)

O valor da resistência a compressão das amostras de referência e das amostras com resíduos de vidro em substituição da areia apresentaram valores superiores ao indicado pela norma ASTM C270 (ASTM, 2019) de 17,2 MPa.

Figura 38 - Resistência à compressão axial



Fonte: Própria do autor (2022)

Pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, nas amostras do Grupo 1 houve um aumento na resistência à compressão axial das amostras com resíduo de vidro, exceto a amostra com 10% de RMV que houve uma diminuição de 15,27% em relação ao valor da resistência a compressão média da amostra referencial. Ainda considerando a média, a amostra com maior resistência à compressão foi a amostra com 5% de RMV, que caracterizou um aumento de 13,56% em relação a traço referencial (TR) com 0% de RMV. Nas amostras com 15%, 20% e 30%, o valor da resistência a compressão manteve-se próxima ao TR.

O valor da média da amostra com 10% de RMV foi inferior ao traço referência pois na amostra número 3 do Grupo 1 foi muito abaixo em relação as demais, que pode ter sido ocasionado por falhas internas na amostra ou na retificação da amostra, contribuindo para abaixar o valor da média da resistência a compressão.

Os resultados das amostras do Grupo 2 foram todas superiores em comparação ao do Grupo 1, o que pode ser atribuído a um melhor domínio na realização do traço e do ensaio. As maiores diferenças em relação a resistência a compressão do TR foram das amostras com 10% e 15% de RMV, cujo aumento foi de 44,28% e 45,58% em relação as amostras de 10% e 15% de RMV do Grupo 1, respectivamente.

A variação da resistência a compressão das demais amostras do Grupo 2 em relação ao TR, variou de 5,7% a 15,19%.

4.3.3. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na Tabela 29 são mostrados os valores da força de rompimento dos corpos de prova por compressão diametral. Foram produzidos três corpos de prova para cada traço e identificados os valores na tabela como Amostras 1 a 3.

Tabela 29 – Valores das forças de rompimento dos corpos de prova por compressão diametral

| Traços | Valor da Força de Rompimento (MPa) | | |
|--------|------------------------------------|-----------|-----------|
| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 |
| | | | |

| | | | |
|---------|-------|-------|-------|
| TR | 36,13 | 33,45 | 46,40 |
| RMV 5% | 48,25 | 48,10 | 46,40 |
| RMV 10% | 33,07 | 37,49 | 35,60 |
| RMV 15% | 43,37 | 40,04 | 38,17 |
| RMV 20% | 44,84 | 35,91 | 37,68 |
| RMV 30% | 42,72 | 45,74 | 48,25 |

Fonte: Própria do autor (2022)

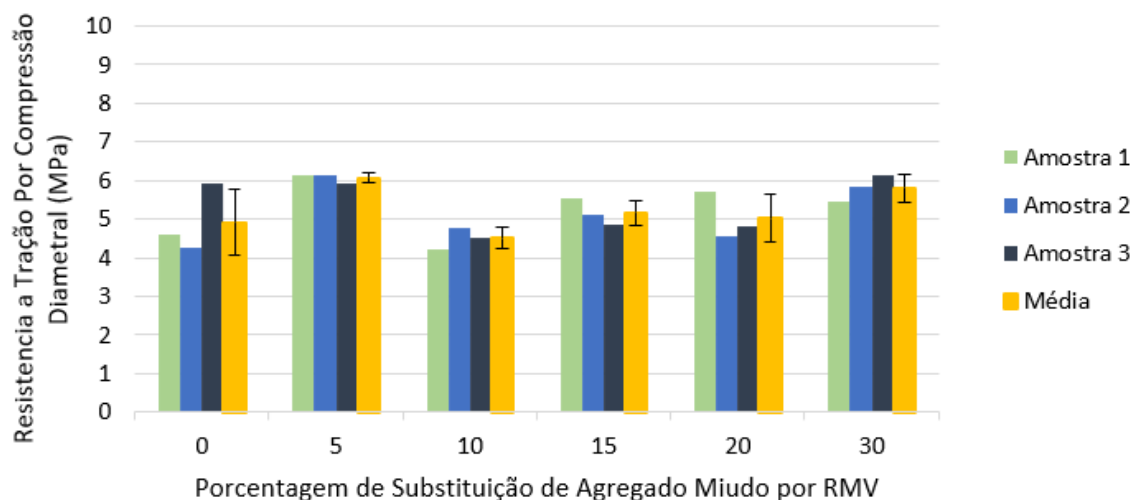
A Tabela 30 é preenchida utilizando a Equação 11, conforme a ABNT NBR 7222:2011 e calculado a média. Observa-se que apenas o RMV 10% a média ficou 8,3% inferior do que a amostra TR. A resistência a tração indireta das demais amostras ficaram superior do que o corpo de prova referencial, sendo o maior valor a amostra de RMV 5%, que teve um aumento de 23,17%.

Tabela 30 – Resistência à Tração indireta

| Traços | Resistência à Tração Indireta (MPa) | | | | |
|---------|-------------------------------------|-----------|-----------|-------|---------------|
| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Média | Desvio Padrão |
| TR | 4,60 | 4,26 | 5,91 | 4,92 | 0,87 |
| RMV 5% | 6,14 | 6,12 | 5,91 | 6,06 | 0,13 |
| RMV 10% | 4,21 | 4,77 | 4,53 | 4,51 | 0,28 |
| RMV 15% | 5,52 | 5,10 | 4,86 | 5,16 | 0,34 |
| RMV 20% | 5,71 | 4,57 | 4,80 | 5,03 | 0,60 |
| RMV 30% | 5,44 | 5,82 | 6,14 | 5,80 | 0,35 |

Fonte: Própria do autor (2022).

Figura 39 - Gráfico de resistência à Tração por Compressão Diametral, média e desvio padrão



Fonte: Própria do autor (2022).

Pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, observa-se que apenas a média o RMV 10% ficou inferior em comparação a amostra referência, sem resíduo de vidro.

4.3.4. Resistividade Elétrica Volumétrica

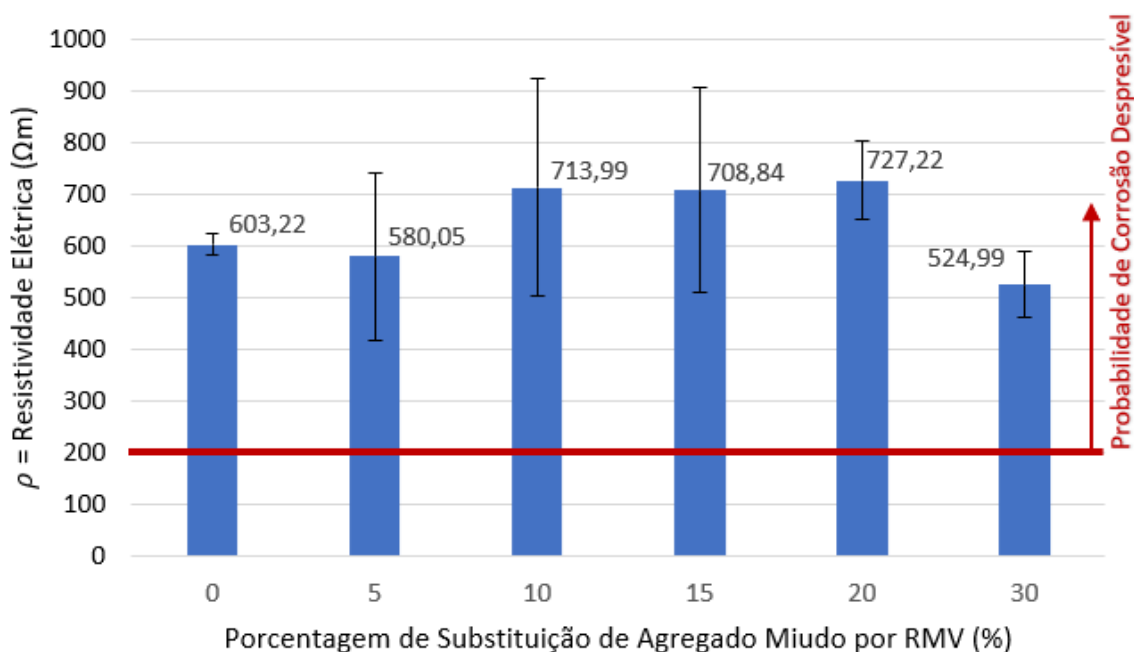
A resistividade elétrica volumétrica foi avaliada nas amostras mantidas na câmara úmida e em ambiente do laboratório aos 28 dias conforme a Tabela 31 e os resultados estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 31 – Corrente elétrica passante pelo ensaio de resistência elétrica volumétrica

| Traços | Corrente elétrica que passa pelo corpo de prova, em miliamperes | | | |
|---------|---|-----------------------|------------|---------------|
| | Corpo de Prova 1 (mA) | Corpo de Prova 2 (mA) | Média (mA) | Desvio Padrão |
| TR | 3,33 | 3,18 | 3,25 | 0,11 |
| RMV 5% | 2,74 | 4,03 | 3,38 | 0,91 |
| RMV 10% | 2,20 | 3,30 | 2,75 | 0,78 |
| RMV 15% | 2,24 | 3,30 | 2,77 | 0,75 |
| RMV 20% | 2,50 | 2,90 | 2,7 | 0,28 |
| RMV 30% | 3,42 | 4,06 | 3,74 | 0,45 |

Fonte: Própria do autor (2022).

Figura 40 - Gráfico da resistividade elétrica nas amostras



Fonte: Própria do autor (2022).

Observa-se que no traço com RMV 5% e 30% em substituição de areia por resíduo de vidro a resistividade elétrica diminuiu em relação ao traço referência 3,99% e 14,90%, respectivamente, enquanto as amostras com RMV 10%, 15% e 20% de substituição de areia por resíduo de vidro a resistividade elétrica aumentou em 18,36%, 17,50% e 20,5%, respectivamente, em relação ao traço referência.

Constata-se que o maior resultado de resistividade foi no traço com RMV 20% com 727,22 Ωm.

Assim como os resultados obtidos por Martins et al. (2021), todas as amostras apresentaram resistividade elétrica maiores que 200 Ωm, demonstrando probabilidade de corrosão depressível, ou seja, baixa tendência a corrosão (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

4.3.5. Difusão de íons de cloreto

A difusão de íons de cloreto foi verificada pelo ensaio de permeabilidade por aceleração da passagem de íons de cloreto através de uma tensão aplicada. Os resultados estão demonstrados na Tabela 32.

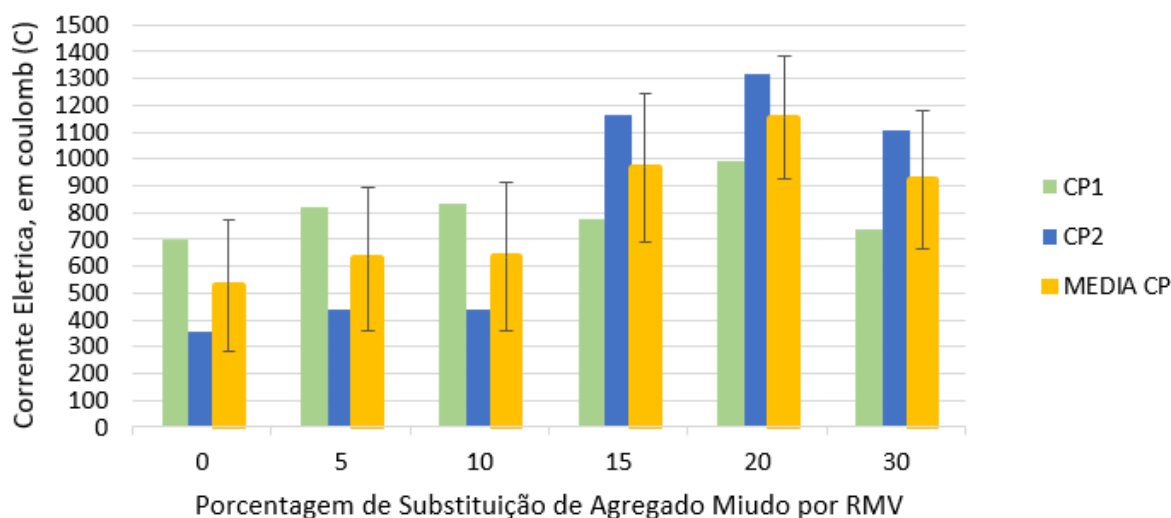
Tabela 32 - Corrente elétrica passante pelo ensaio de difusão de íons de cloreto

| Traços | Corrente elétrica (Coulomb) | | | |
|---------|-----------------------------|-----------------------|------------|---------------|
| | Corpo de Prova 1 (mA) | Corpo de Prova 2 (mA) | Média (mA) | Desvio Padrão |
| TR | 702,60 | 357,03 | 529,81 | 244,35 |
| RMV 5% | 818,41 | 440,40 | 629,41 | 267,29 |
| RMV 10% | 832,07 | 438,59 | 635,33 | 278,24 |
| RMV 15% | 773,06 | 1161,99 | 967,53 | 275,01 |
| RMV 20% | 991,34 | 1317,47 | 1154,41 | 230,61 |
| RMV 30% | 740,51 | 1105,53 | 923,02 | 258,11 |

Fonte: Própria do autor (2022).

Conforme a Tabela 32, a carga elétrica dos CP 1 com traço TR, RMV 5%, RMV 10% ficaram superiores em relação ao CP 2. Nas amostras com RMV 15%, RMV 20% e RMV 30% os valores de carga do CP 2 foram maiores que as amostras CP 1.

Figura 41 - Gráfico da corrente elétrica, em coulomb (C)



Fonte: Própria do autor (2022).

Pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** nota-se que a média da corrente elétrica (C) de todas as amostras com RMV ficaram acima da amostra referência, tendo uma característica crescente no gráfico, em exceto a amostra RMV 30% que houve um declínio de 25,06% em relação a amostra RMV 20%. A mesma característica de declínio na carga elétrica passante aconteceu na resistência elétrica volumétrica, a qual a amostra

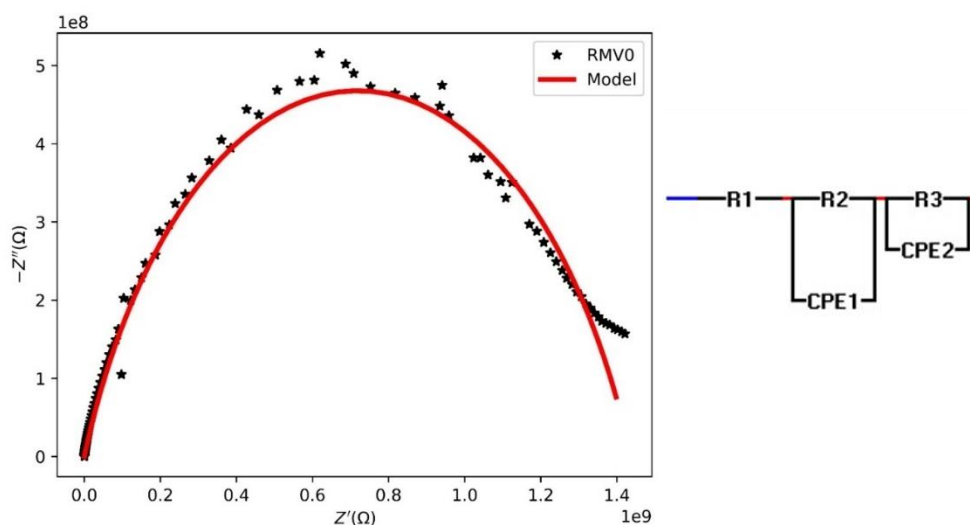
de RMV 30% ficou menor (38,78%) que a amostra RMV 20%, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Observando a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a média da corrente elétrica passante pela amostra com RMV 20% ficou acima de 1000 Coulombs, ficando 117,89% acima da amostra referência, caracterizando a amostra com a permeabilidade baixa. A média das correntes elétricas passante dos demais corpos de prova ficaram abaixo de 1000 Coulombs, a qual caracteriza a chance de ocorrer a corrosão como muito baixo.

4.3.6. Espectroscopia de impedância

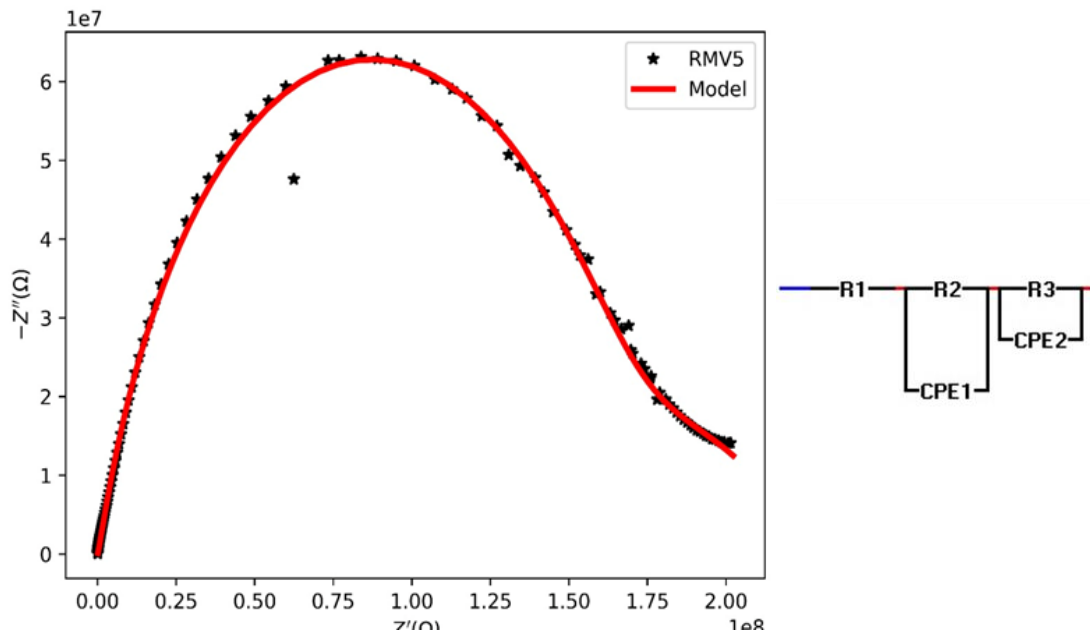
As Figura 42 a 47 mostram um diagrama de Nyquist típico, acompanhado do seu circuito equivalente de Christensen para a amostra com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 30% de resíduo de vidro. Com base nas características do material (concreto) e as possibilidades sugeridas na literatura com o circuito equivalente típico proposto por Christensen, o circuito equivalente é apresentado nas Figuras, onde R_1 , R_2 e R_3 representam, respectivamente, a um resistor de contato (R_1) conectada em série com a rede da argamassa (R_2Q_2) e conectada, também em série, com a rede do resíduo de vidro (R_3Q_3).

Figura 42 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 0% de resíduo de vidro



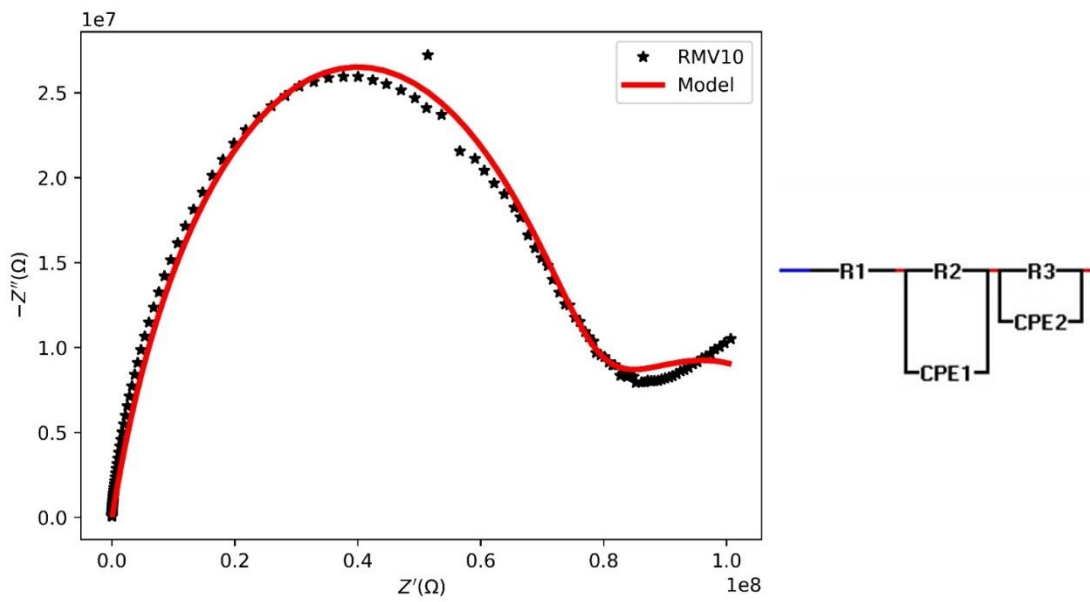
Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 43 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 5% de resíduo de vidro.



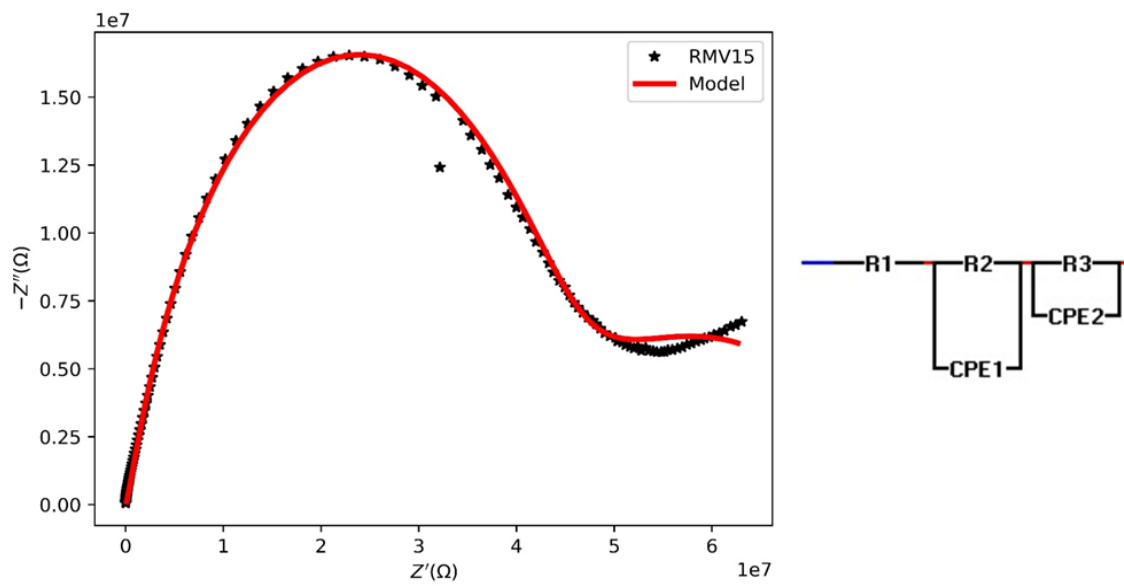
Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 44 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 10% de resíduo de vidro.



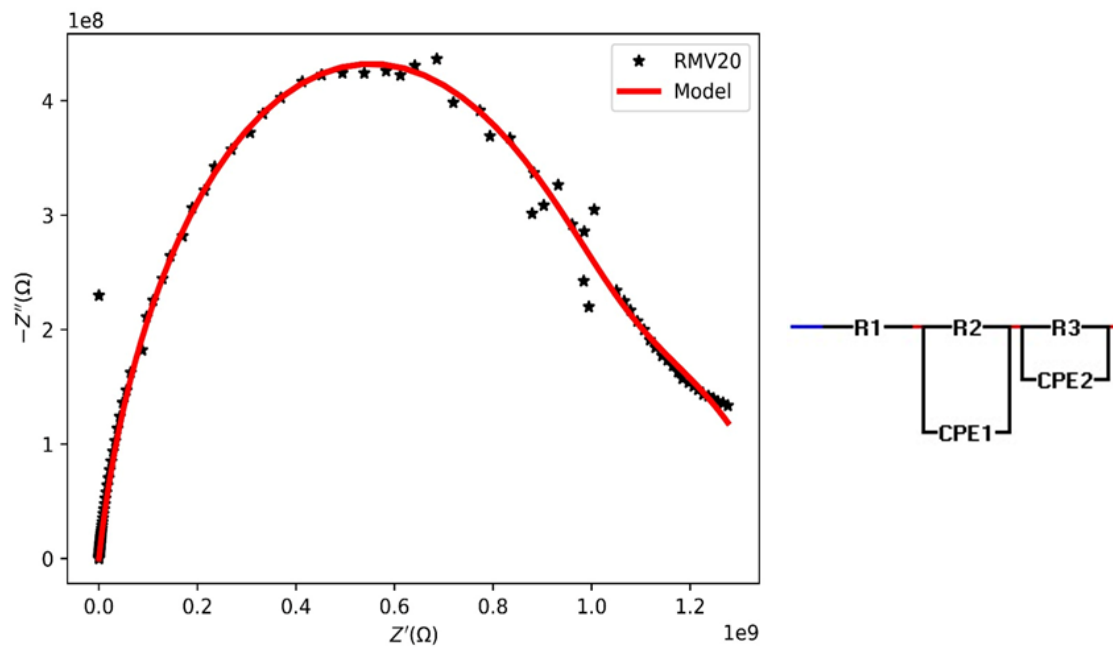
Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 45 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 15% de resíduo de vidro.



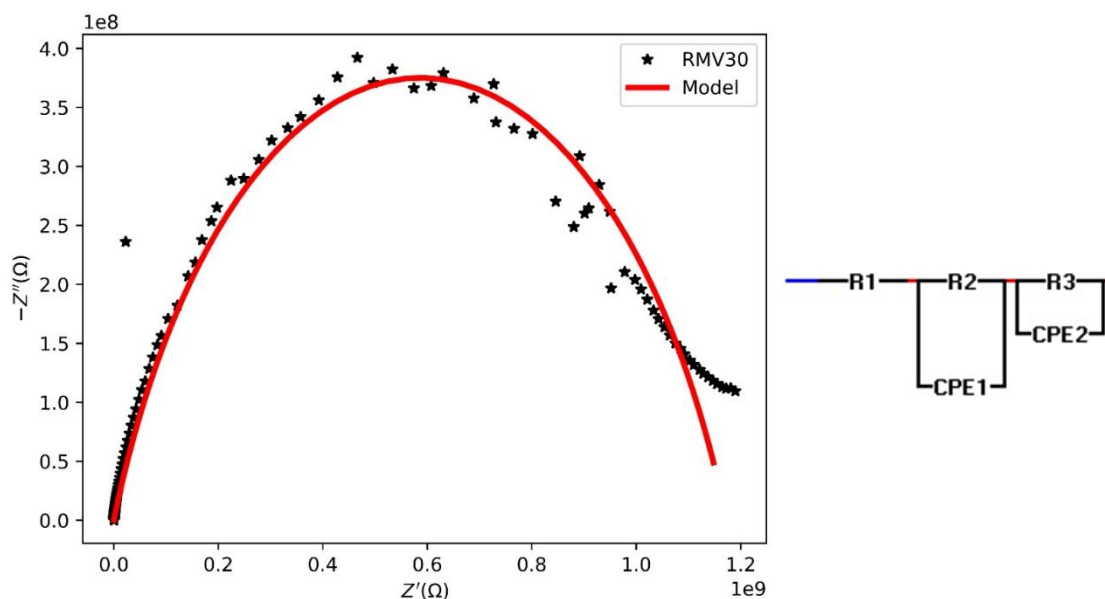
Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 46 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 20% de resíduo de vidro.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 47 - Diagrama de Nyquist para a amostra com 30% de resíduo de vidro.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Para a amostra referência mostra o circuito equivalente típico proposto por Randles sendo que mostra a correlação entre o fenômeno de corrosão e o circuito equivalente está associado a uma resistência “offset aparente” ($R1$) em série com a rede da argamassa ($R2Q2$).

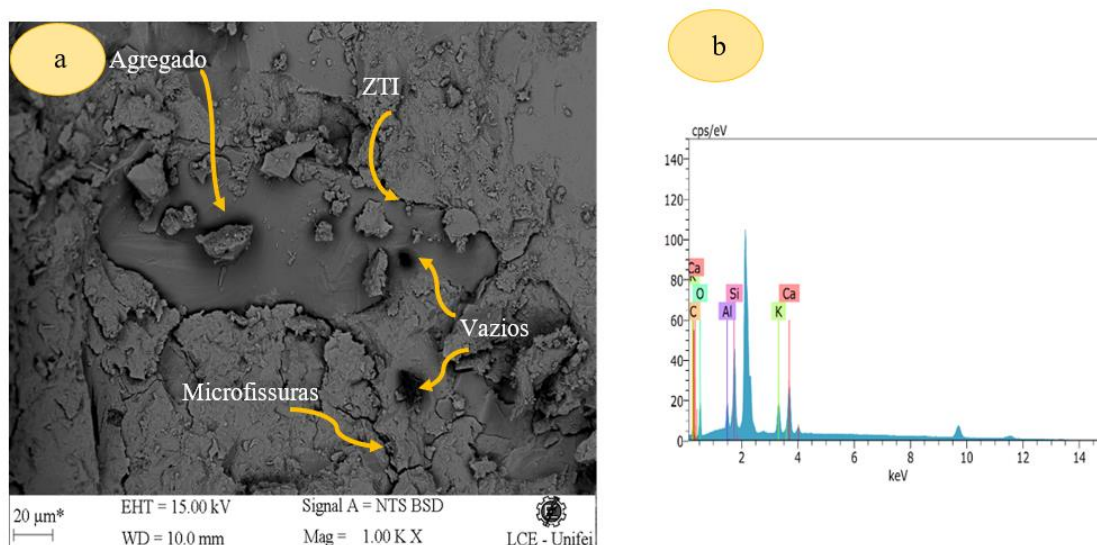
Para as amostras com 5% a 30% de resíduo de vidro mostram um diagrama de Nyquist típico, acompanhado do seu circuito equivalente de Christensen. Com base nas características do material (concreto) e as possibilidades sugeridas na literatura com o circuito equivalente típico proposto por Christensen, o circuito equivalente representa um resistor de contato ($R1$) conectada em série com a rede da argamassa ($R2Q2$) e conectada, também em série, com a rede do resíduo de vidro ($R3Q3$).

4.3.7. Ensaio de MEV e espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS).

Na Figura 48 (a) e (b) mostram a microestrutura e o EDS do concreto referência. O concreto consiste em três partes: agregado, zona de transição interfacial (ITZ) e pasta de cimento. A ITZ é uma casca fina que envolve a superfície do agregado, é a parte de

menor resistência do concreto, cuja microestrutura determina o desempenho concreto. Na zona de transição interfacial indica uma maior porosidade no entorno dos grãos dos agregados graúdos. A zona de transição é também é considerada o elo fraco do conjunto, estando sujeita à micro fissuração muito facilmente, com pequenos acréscimos de carregamento, variações de volume e umidade.

Figura 48 – Micrografia MEV e EDS da amostra referência.

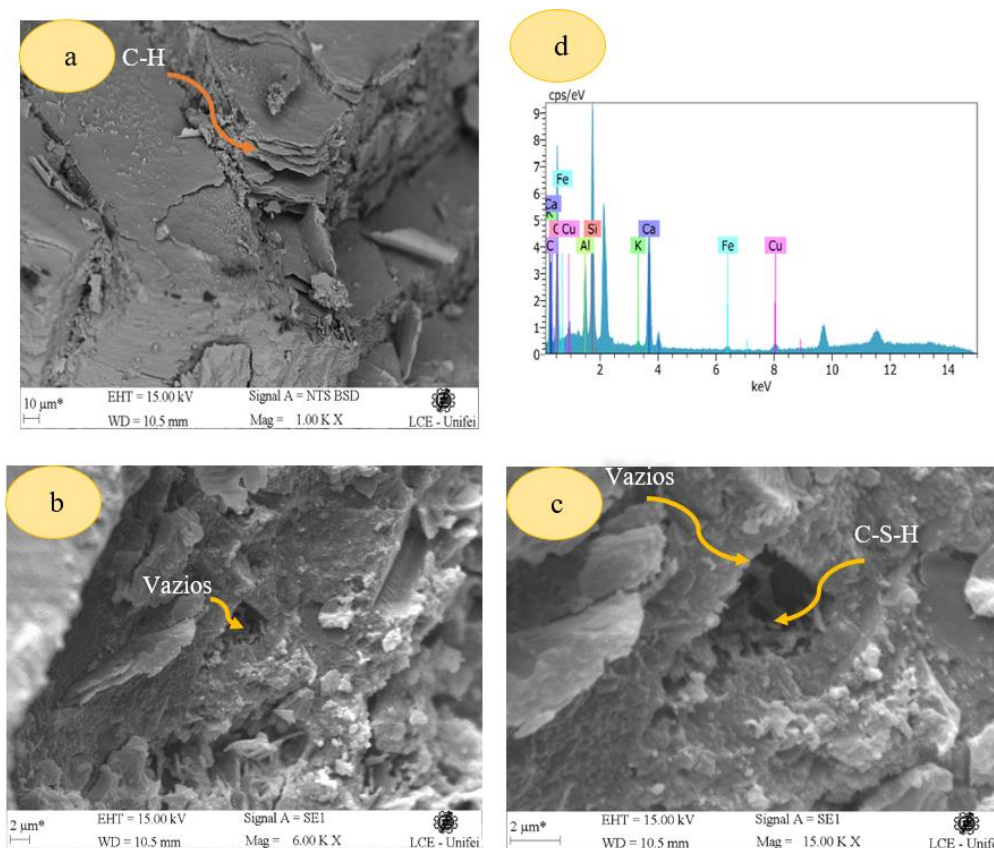


Fonte: Próprio Autor (2022).

Na Figura 48 (a) observa-se microfissuras no concreto referência. Na maioria dos casos em que há combinação entre o concreto e o resíduo da borracha, encontra-se como problema principal a fraca aderência entre a matriz do concreto e o material inerte, afetando na formação do concreto e favorecendo o aparecimento de microfissuras (Albuquerque, 2009). Mehta e Monteiro (2008) explicam que o concreto sujeito às cargas de trabalho sofre microfissuras e que estas podem alterar a permeabilidade do concreto, facilitando dessa maneira a corrosão das armaduras. A corrosão ocupa um volume maior que o original resultando em tensões internas maiores trazendo assim a fissuração do concreto. Observa-se também vazios capilares ou pequenos poros de ar incorporado em uma seção de concreto provocados pela água que “sobra” da relação a/c. Na Figura 48(b) mostra a análise do EDS e observa-se elementos como Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, O e C que são os constituintes regulares da matriz de cimento.

A Figura 49 (a) (b) (c) e (d) mostram a microestrutura e o EDS do concreto com 5% de RMV

Figura 49 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 5% de RMV



Legenda: CSH=Silicato de cálcio Hidratado, CH= Hidróxido de Cálcio

Fonte: Próprio Autor (2022).

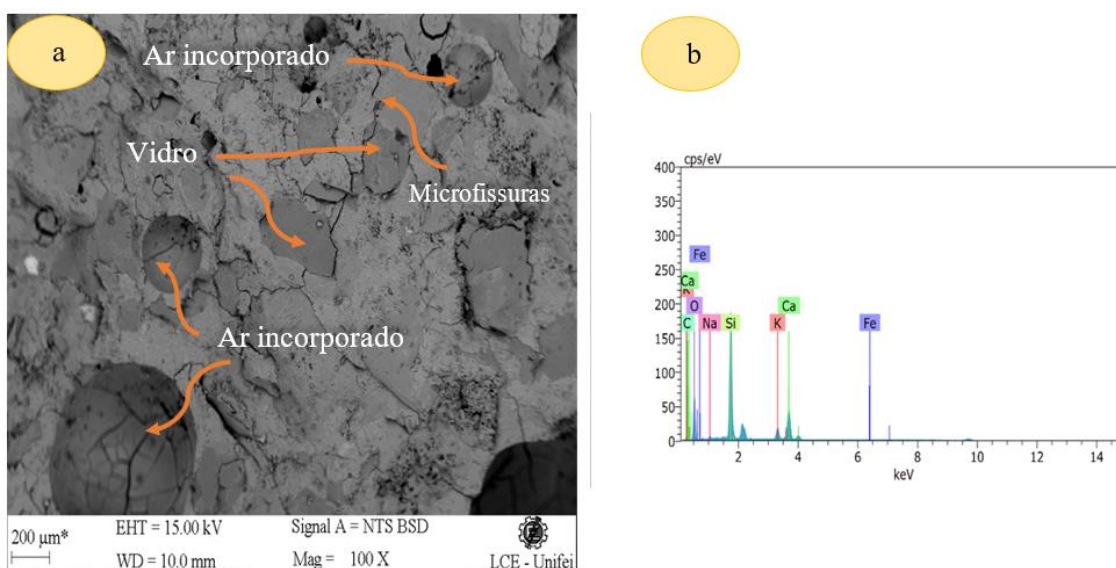
A Figura 49 (a) mostra cristais de CH que estão organizados em forma de camadas podendo ser responsável por controlar a alcalinidade. A sua morfologia é bem definida, formando cristais prismáticos, sendo que o tamanho dos cristais aumenta conforme também aumenta o espaço livre (aumento da relação água/cimento). O hidróxido de cálcio contribui pouco para a resistência da pasta de cimento endurecida e em virtude de sua baixa superfície específica, que lhe confere um baixo poder de adesão, é facilmente carregado pela água. Aparentemente, o único aspecto positivo da presença do hidróxido de cálcio é a alcalinidade conferida ao meio, responsável pela passivação das armaduras. A Figura 35 (b) também mostra vazios capilares em uma seção de concreto provocados pela água que “sobra” da relação a/c. Os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada e apresentam formato bastante irregular. Em pastas de cimento bem hidratadas e com baixa relação água/cimento (a/c), os vazios capilares podem variar de 10 a 50 nm, enquanto em pastas de elevada relação

a/c, os vazios capilares podem ser tão grandes quanto a 5 μm (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

A Figura 49 (c) mostra um vazio capilar e no seu interior cristas de CSH. Na microestrutura pode ocorrer quatro tipos diferentes de vazios. Do menor ao maior, há o espaço intercamada CSH, poros capilares e ar aprisionado. O poro intercamada de CSH é o espaço entre as partículas de CSH. Este espaço realmente não pode ser evitado, pois são formados durante a criação do CSH e não afetam tanto o concreto. Esses vazios são muito pequenos, cerca de 0,5-2,5 nm e realmente não afetam a permeabilidade ou resistência do concreto. Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), a pasta de cimento hidratada contém muitos tipos de vazios que têm influência nas suas propriedades. O espaço interlamelar no CSH corresponde a 28% da porosidade no CSH sólido. Devido ao tamanho de poro pequeno, acaba não tendo efeito adverso sobre a resistência e permeabilidade da pasta de cimento hidratado.

As pontes de hidrogênio podem reter água nesses pequenos vazios e sua remoção pode contribuir para a retração por secagem e fluência. Os vazios capilares são os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada e são irregulares na forma. Em pastas bem hidratadas, de baixa relação a/c, os espaços vazios capilares podem variar de 10 a 50 nm.

Figura 50 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 10% de RMV

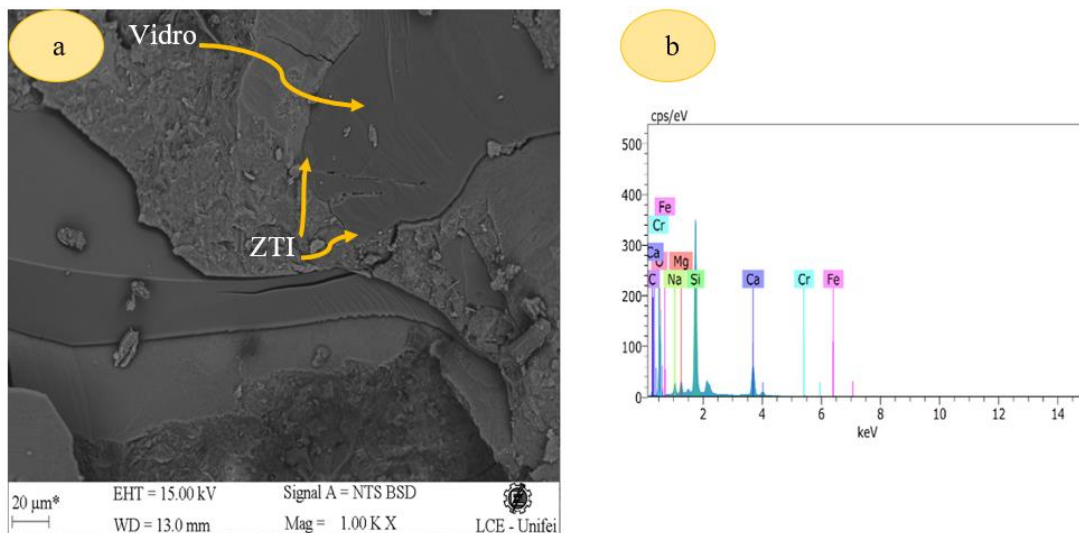


Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 50 (a) mostra poros de ar incorporado. Os poros de ar incorporado possuem forma esférica, com dimensões superiores aos vazios capilares. Podem ser decorrentes de uma má vibração do concreto ou terem sido intencionalmente incorporados. Devido a suas grandes dimensões reduzem bastante a resistência do concreto e aumentam a permeabilidade. Na Figura 50 (a) observa-se também microfissuras na microestrutura. Quando o concreto é carregado nas primeiras idades, as microfissuras tendem a se propagar na zona de transição bastante porosa, conforme também mostrado na Figura 50 (a).

Entretanto, com o tempo, a zona de transição é preenchida com produtos da hidratação e as fissuras passam a se propagar pelo filme de hidróxido de cálcio depositado sobre o agregado (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Através da análise do EDS na Figura 50 (b) observa-se elemento como o Fe que é um dos elementos constituintes regulares da matriz de cimento e também o Ca, C, Al, Si que são os elementos constituintes do vidro.

Figura 51 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 15% de RMV

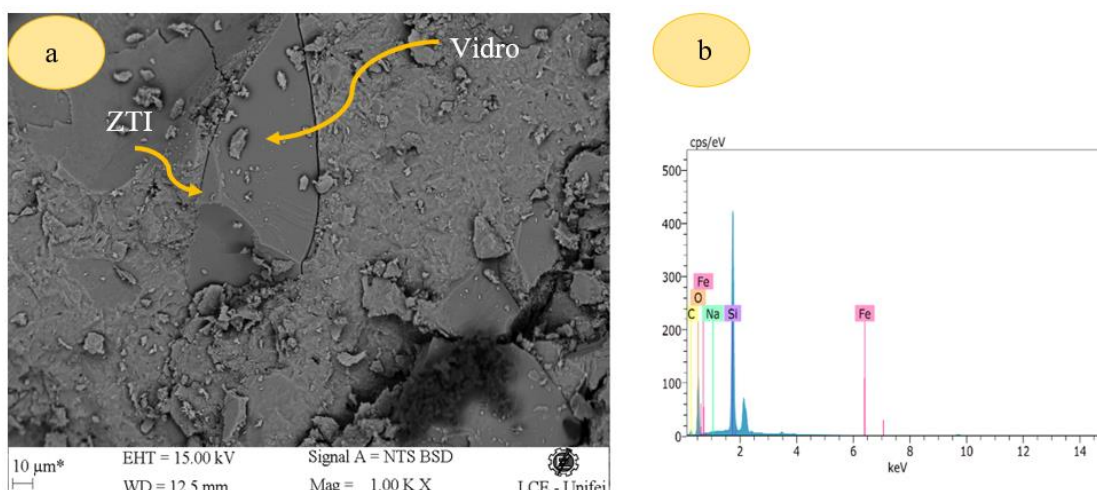


Fonte: Próprio Autor (2022).

As

Figura 51 (a) e Figura 52 (a) mostram a microestrutura do compósito cimentício com 15% e 20% de resíduo de vidro que possui partículas com uma forma alongada e plana. Isso diferencia o resíduo de vidro da areia, que normalmente tem partículas mais regulares. Isso sugere que as partículas do vidro possuem uma área de superfície específica maior do que as partículas da areia. Isso, juntamente com a diferença entre a densidade do vidro e da areia, é outra razão que explicaria a menor liquidez da argamassa com o vidro porque uma área de superfície específica causa uma maior demanda de água (LUO et al., 2022). Os vazios de ar também podem se formar mais facilmente entre as partículas de agregados irregulares, conseqüentemente necessita de mais pasta de cimento para preenchê-los, o que pode resultar em menores parâmetros de resistência da argamassa (CZAPIK E KUZA, 2021).

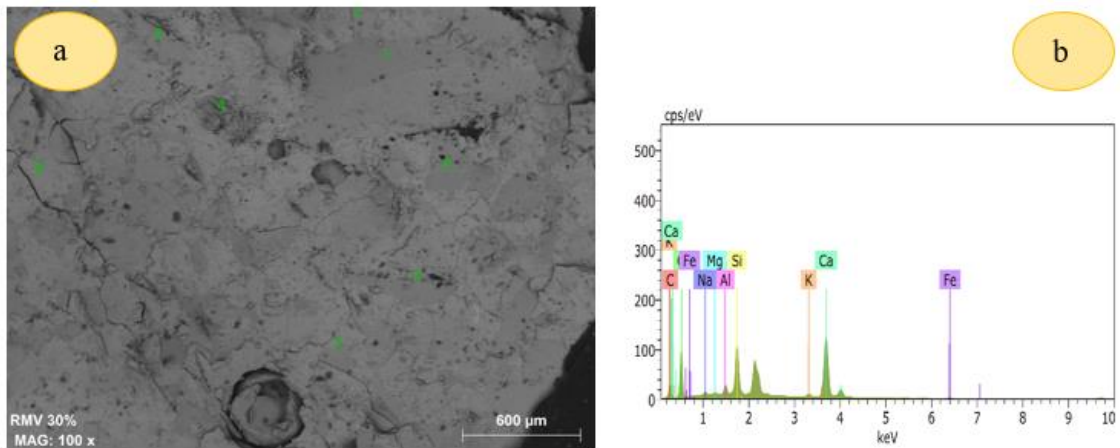
Figura 52 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 20% de RMV



Fonte: Próprio Autor (2022).

Nas Figura 52 (a) e (b) observa-se na microestrutura da argamassa com resíduo de vidro, partículas finas de vidro que são visíveis e podem ser incorporadas na fase CSH. A fase CSH resultante obteve uma forma fibrosa ou “favo de mel”, o que é característico do processo de fixação de cimento sem aditivos minerais. Um análise da composição elementar da fase de CSH revelou indícios significativos de silício, o que pode ser atribuído à presença de partículas de vidro dispersas na matriz da pasta de cimento (CZAPIK E KUZA, 2021).

Figura 53 - Micrografia MEV e EDS da amostra com 30% de RMV

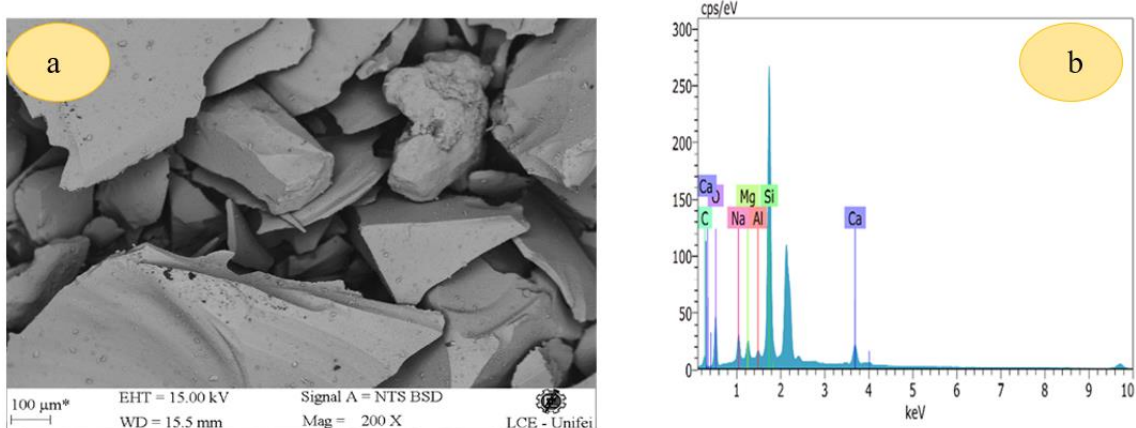


Fonte: Próprio Autor (2022).

Através da análise do EDS nas

Figura 51 (a), Figura 52 (a) e Figura 53 (a) observa-se elemento como o Fe que é um dos elementos constituintes regulares da matriz de cimento e também o Ca, C, Mg, Na, Al, Si que são os elementos constituintes do vidro conforme mostrado na Figura 54 (a) e (b).

Figura 54 - Micrografia MEV e EDS do Resíduo Moído de Vidro

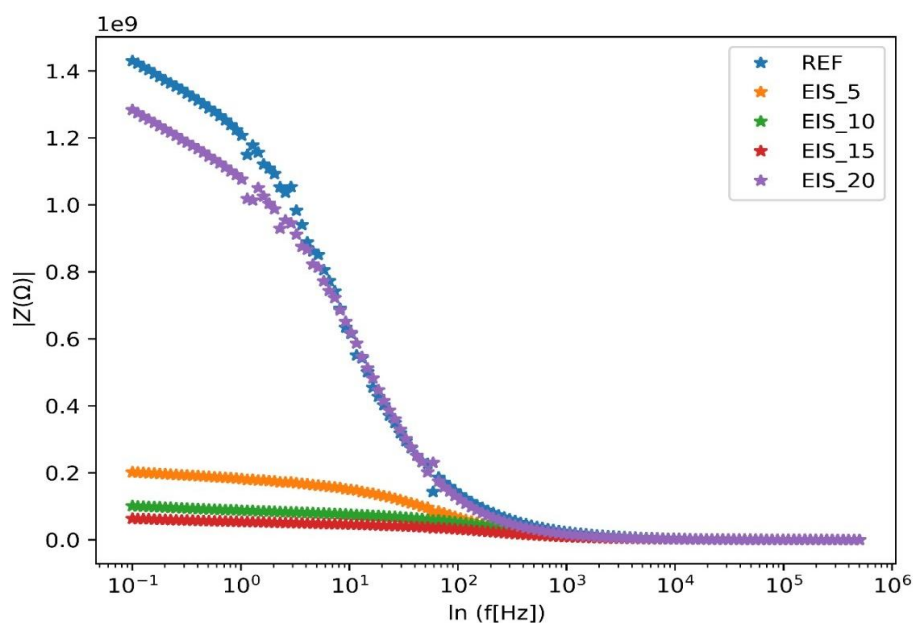


Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 55 mostra os diagramas de Bode, afirma-se brevemente que esses diagramas são um gráfico de coordenadas semi-logarítmicas da função de transferência de um sistema linear invariante no tempo versus frequência.

No diagrama de Bode (Figura 55) distingue-se claramente a três regiões: região de alta frequência caracterizada pela presença de películas de passivação e outros tipos de revestimento sobre a armadura, a região de frequência média, que reflete a mudança de condutividade elétrica do revestimento durante exposição em meio corrosivo, conforme mostrado na Figura 55 e, finalmente, a região de baixa frequência (10^0 Hz e 10^{-2} Hz), onde a reação de corrosão na interface metal/revestimento pode ser estudada.

Figura 55 - Diagrama de Bode para a amostra referência a amostra com 20% de resíduo de vidro



Fonte: Próprio Autor (2022).

A partir do diagrama de bode, observa-se que a resistividade elétrica diminui com o aumento em frequência. Isso indica que as amostras estão agindo como um capacitor de cargas dentro dele (V. A. DOS S, 2022).

5. CONCLUSÕES

Quanto aos objetivos propostos inicialmente, pode se afirmar que foi possível obter a característica autoadensável nos traços de argamassa para todas as amostras, desde a amostra referencial sem resíduo moído de vidro até as amostras com resíduo de vidro, nos teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 30%, em substituição ao agregado fino.

Com o aumento da substituição de resíduo de vidro no lugar da areia, as características no estado fresco da argamassa com resíduo de vidro e índice de espalhamento resultaram em uma diminuição na viscosidade plástica, aumento do tempo de escoamento e deformidade menor.

De modo geral, a argamassa autoadensável obteve-se boa resistência a compressão axial com o uso de resíduo de vidro, resultando em uma ordem de elemento estrutural. A resistência a tração por compressão diametral, apenas o RMV 10% a média ficou inferior do que a amostra referência, sem resíduo de vidro.

Pelo ensaio de espectroscopia de impedância, a amostra referência apresentou um circuito equivalente típico proposto por Randles, e as demais amostras apresentaram um diagrama de Nyquist típico, acompanhado do seu circuito equivalente de Christensen.

Para a amostra referência mostra uma zona de transição interfacial entre o agregado e o concreto. Esta zona de transição interfacial indica uma maior porosidade no entorno dos grãos dos agregados graúdos. Também se observa as microfissuras e vazios capilares ou pequenos poros de ar incorporado em uma seção de concreto provocados pela água que “sobra” da relação a/c.

Para a amostra com 5% de resíduo de vidro mostram vazios capilares em uma seção de concreto provocados pela água que “sobra” da relação a/c e no seu interior cristais de CSH. Para a amostra com 10% de resíduo de vidro observa-se poros de ar incorporado com forma esférica, com dimensões superiores aos vazios capilares e também microfissuras na microestrutura. Para as amostras com 15%, 20% e 30% mostram na microestrutura do compósito cimentício resíduo de vidro que possui partículas com uma forma alongada e plana.

No ensaio de resistividade elétrica volumétrica, todas as amostras apresentaram resistividade elétrica maiores que 200 Ωm , demonstrando probabilidade de corrosão depressível ou baixa tendência a corrosão. Pelo ensaio de difusão de íons de cloreto, exceto a amostra RMV 20% que se pode caracterizar com risco baixo, a corrente elétrica passante das demais amostras ficaram abaixo de 1000 Coulombs, a qual caracteriza a chance de ocorrer a corrosão como muito baixa.

Portanto, diante dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que é possível produzir argamassa autoadensável substituindo parcialmente o agregado fino por resíduo moído de vidro, mantendo as características para a produção de um concreto autoadensável e possuindo alta resistência a compressão e maior durabilidade, além de trazer benefícios para o meio ambiente.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliação da viabilidade econômica do concreto autoadensável produzido com RMV;
- Investigar a microestrutura e relacioná-las com as propriedades físicas e mecânicas do concreto convencional;
- Desenvolver estudo, utilizando os mesmos teores de resíduo de vidro, com monitoramento do concreto para várias idades;
- Correlacionando a carbonatação com outros parâmetros de durabilidade assim como resistividade elétrica do concreto;
- Avaliar a microestrutura da AAA e as alterações promovidas na pasta e na composição da película apassivadora do aço;
- Avançar os estudos no campo de previsão de vida útil, tanto para o ataque por cloretos quanto para o ataque por carbonatação;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ABNT NBR 11768:2019 - Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2019. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 15823-1:2017 - Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 15823-2:2010 - Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 15823-3:2010 - Concreto autoadensável. Parte 3 – Determinação da habilidade passante – Método do anel J. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 15823-4:2010 - Concreto autoadensável. Parte 4 – Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 15823-5:2010 - Concreto autoadensável. Parte 5 – Determinação da viscosidade – Método do funil V. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 15823-6:2010 - Concreto autoadensável. Parte 6 – Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 15900-1:2009 - Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 5739:2018 - Concreto-Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 7211:2019 - Agregados para concreto - Especificação. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 7222:2011 - Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ABNT NBR 9204:2012. **Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]

ADAWAY, M.; WANG, Y. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete -Effects on compressive strength. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 14, n. 1, p. 116–122, 2015.

ADESINA, A. et al. Fresh and mechanical properties overview of alkali-activated materials made with glass powder as precursor. **Cleaner Materials**, v. 3, n. November 2021, p. 100036, 2022

ADI-SUPER25. ADI-SUPER ADI-SUPER Superplastificante para concreto –. p. 20–21, 2021

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

ALBÉRIA CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

ARAÚJO, C. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em Questão, Porto Alegre**, v. v. 12, n., p. 11–32, 2006.

ARUNCHAITANYA, S.; ARUNAKANTHI, E. Usage of mineral admixtures in self compacting concrete - A review. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, v. 8, n. 3, p. 58–62, 2019.

ASTM C1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. **American Society for Testing and Materials**, n. C, p. 1–8, 2012

BARBOSA, J. P. N.; RIBEIRO, F. H. D. M.; COUTINHO, R. S. Avaliação Da Influência Da Utilização Do Pó De Vidro Como Substituição Parcial Ao Agregado Miúdo Nas Propriedades Do Concreto Auto Adensável. **Singular. Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v. 1, n. 3, p. 6–11, 2021.

BARELA, F. .; MOURA, R. R. .; BELLINASSO, C. A. B. CONCRETO PRODUZIDO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR SUCATA DE VIDRO. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão , v. 7, n. 2, 27 fev. 2020. p. 2020, 2020.

BAUER. **BAUER, Luiz Alfredo Falcão. Materiais de Construção Volume 1 . 5ª Edição. Revisada. LTC Editora. Rio de Janeiro. 2000.** [s.l: s.n.]. v. 1

BOTELHO, M. H. C. **Concreto Armado Eu Te Amo Para Arquitetos**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

CALISTER. **CALLISTER, W. D., Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução . 7ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.** [s.l: s.n.].

CALLISTER E RETHWISCH, 2013. **Ciência dos materiais - Callister - 8ª Ed.pdf**, 2013.

CEMPRE. **CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. Vidro. Disponível em <https://cempre.org.br/vidro/>. Acessado em 31/07/2021.** São Paulo,

2021.

CORDEIRO, R. DOS S.; MONTEL, A. L. B. Estudo da viabilidade para a produção de concretos com adição de resíduos de vidro em substituição ao agregado miúdo na cidade de Palmas-TO. **Desafios - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, v. 2, n. Especial, p. 104–123, 2015.

COSTA, A. C. S. DE S. et al. Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 4, p. 289–301, dez. 2019.

COSTA, J. M.; AZZI, S. S. Comparação Da Resistividade Elétrica Superficial E Volumétrica. **Artigo**, v. 6127, p. 11, 2017.

CZAPIK, P.; KUZA, D. M. B. Influence of the waste glass uses on the cement mortar properties. **Physical Sciences**, n. February, p. 1–8, 2021.

DE LA CRUZ, C. J.; RAMOS, G.; HURTADO, W. A. Preface: International Conference on Recent Trends in Physics (ICRTP 2016). **Journal of Physics: Conference Series**, v. 755, n. 1, 2017.

DIAB, A. M.; ALIABDO, A. A.; MOHAMED, I. A. Corrosion behaviour of reinforced steel in concrete with ground limestone partial cement replacement. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, n. 14, p. 747–761, 2015

DONG, W., Li, W., E TAO, Z. (2021). A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. *Resources, Conservation and Recycling*, 172, 105664.

EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. **Magazine of Concrete Research**, p. 1–32, 2002.

EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete - Specification, Production and Use. **The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems**, p. 63, 2005.

EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. **The European Guidelines for Self Compacting Concrete**, n. May, p. 63, 2002.

ELSEVIER. **Sustainable transport infrastructure and economic returns: A bibliometric and visualization analysis**. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

FELIU, V. et al. Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. I. Experimental evidence and theoretical predictions. **Corrosion Science**, v. 40, n. 6, p. 975–993, 1998.

GHORBANI, S. et al. Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. **Construction and**

Building Materials, v. 185, p. 110–119, 2018.

GOMES, A.; BARROS, P. C. Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável. p. Métodos de dosagem de concreto autoadensável, 2009.

GRÁCIO, M. C. C. Acoplamento bibliográfico e análise de cocitação: revisão teórico-conceitual. **Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação**, v. 21, n. 47, p. 82, 2016.

HELENE, P. R. DO LAGO. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo - SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993

HOPE, B. B., PAGE, J. A., E IP, A. K. C. (1986). Corrosion rates of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 16(5), 771–781.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90051-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90051-7)

HOPE, B. B.; PAGE, J. A.; IP, A. K. C. Corrosion rates of steel in concrete. **Concrete**, v. 16, n. c, p. 771–781, 1986.

HU, J. Y. et al. A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures. **Construction and Building Materials**, v. 325, n. February, 2022.

IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 2 nov. 2021.

JÚNIOR, J. J. A. et al. Patologia Em Concreto Armado E Seus Métodos De Recuperação Estrutural. **Revista Científica Novas Configurações: diálogos plurais**, v. 2, n. 1, p. 43–58, 2021.

KALAKADA, Z.; DOH, J. H.; CHOWDHURY, S. Glass powder as replacement of cement for concrete—an investigative study. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 26, n. 3, p. 1046–1063, 2022.

KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 2, p. 107–113, 2009.

LAMOUNIER;, A. S. et al. Determinação da resistividade elétrica e da porosidade aberta de compósitos cimentícios de engenharia. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 09 a 13 de Novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil**, v. 5738, n. 1, p. 2665–2672, 2014.

LING, T. C.; POON, C. S. Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar. **Journal of Hazardous Materials**, v. 192, n. 2, p. 451–456, 2011.

LOPES, F. L. C. et al. Caracterização Dos Concretos Convencional E Auto-Adensável Fabricados Em Sergipe Diante Da Corrosão Estrutural. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 62473–62481, 2020.

LUO, T. et al. Effect of adding solid waste silica fume as a cement paste replacement on the properties of fresh and hardened concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e01048, 2022.

MAHMOOD, A. H.; KASHANI, A. 9 - Recycled glass as a concrete component: possibilities and challenges. In: COLANGELO, F.; CIOFFI, R.; FARINA, I. (Eds.). . **Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management**. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. [s.l.] Woodhead Publishing, 2022. p. 187–209.

MARTINS, M. A. DE B. et al. BR Analysis of the Specimen's Dimensions Variation Influence in Self -Compacting Concrete Bulk Electrical Resistivity. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 50959–50973, 2021.

MARTINS, M. A. DE B. Propriedades reológicas e durabilidade do concreto autoadensável de alta resistência com resíduo de corte mármore e granito e areia de exaustão de fundição. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

MATOS, A. M. Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos. **Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto**, p. 157, 2010

MEHTA, P. K. .; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª edição, São Paulo, Editora IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto., 2008.

MEHTA, P. K. .; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2ª edição, São Paulo, Editora IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.

MEIRA, G. R. Corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado: ensaios eletroquímicos. p. 130, 2017.

MEYER, Y. A. et al. EIS Investigation of the Corrosion Behavior of Steel Bars Embedded into Modified Concretos with Eggshell Contents. **Metals**, v. 12, n. 3, p. 417, 2022.

MEYER, Y. A. et al. Electrochemical behavior and compressive strength of Al-Cu/xCu composites in NaCl solution. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 25, n. 4, p. 1303–1317, 2021.

MIRANDA, L. R. . et al. Avaliação da resistência à compressão e do desempenho frente à corrosão por cloretos de um concreto auto-adensável produzido com adição de biopolímero. n. 1, 2017.

- MOHAJERANI, A. et al. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 443–467, 2017.
- MONTEIRO, A. J. A. E.; MEDEIROS, R. A. Corrosão acelerada uma revisão sobre os métodos de ensaio disponíveis. **SPPC - Simpósio Paranaense de Patologia das Construções**, p. 67–80, 2017.
- MORAIS, J. M. P. DE et al. Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e759974964, 11 jun. 2020.
- NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. M. R. Construção e materiais de construção utilizando diferentes adições minerais em misturas binárias de pós. v. d, p. 317–326, 2012.
- NOVAES, A. H. M. et al. Metodologia científica: teoria e aplicação na educação a distância. **Petrolina: Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2019.**, p. 2019, 2019
- OKAMURA, H. Self-compacting high performance concrete. **Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)**, v. 6, n. 4, p. 269–270, 1996.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. Betão Auto-compactável. v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. Sel-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.1, April 2003. v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.
- OSÓRIO, W. R.; PEIXOTO, L. C.; GARCIA, A. **Electrochemical corrosion behaviour of a Ti-IF steel and a SAE 1020 steel in a 0.5M NaCl solution** **Materials and Corrosion**, 2010.
- PARDINI E LEVY NETO, 2016. **Compósitos Estruturais**, 2006.
- QUEVEDO-SILVA, F. et al. Bibliometric study: Guidelines on its application. **Revista Brasileira de Marketing**, v. 15, n. 2, p. 246–262, 2016.
- RAO, S.; SILVA, P.; DE BRITO, J. Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO₂ and TiO₂). **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 508–517, 2015.
- REPETTE, W. L. Concreto Autoadensável. . In: **ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, v. 2., p. 1769-1806**, p. 2011, 2011.
- RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Análise da difusão de cloretos no concreto contendo lama vermelha. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 137–152, 2012
- RIBEIRO, D. V.; SOUZA, C. A. .; ABRANTES, J. C. C. Uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para monitoramento da corrosão em concreto armado.

RIEM - IBRACON Structures and Materials Journal, v. 8, n. 4, p. 529–546, 2015.

RIBEIRO, D.V., CUNHA, M.P.T., 2014, Deterioração das estruturas de concreto armado. In RIBEIRO, D.V., SALES, A., SOUZA, C.A.C., ALMEIDA, F.C.R., CUNHA, M.P.T., LOURENÇO, M.Z., HELENE, P., *Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*, 1ª ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2014, Cap. 6, pp 87-118

RIBEIRO, V. A. DOS S. et al. Uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para monitoramento da corrosão em concreto com resíduo de pneu e Metacaulim e investigação da sua microestrutura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. e18011729826, 2022.

RIGHI, D. et al. Análise de concretos produzidos com vidro moído quando submetidos à elevadas temperaturas. p. 13. Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Rio de Janeiro, 2012.

ROCHA, B. DOS S. Manifestações patológicas e avaliação de estruturas de concreto armado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2015

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 19–32, 2016.

SAGUES, A. A.; KRANC, S. C.; MORENO, E. I. The time-domain response of a corroding system with constant phase angle interfacial component: Application to steel in concrete. **Science**, v. 37, n. 7, 1995.

SAMAN, R. D.; MOGHADDAM, M. S. S.; MOGHADDAM, M. H. M. Effects of waste glass and rubber on the SCC: rheological, mechanical, and durability properties. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 25, n. 2, p. 302–321, 2021.

SANTOS, H. R. DOS; SILVA, A. DE P. E; LEITE, D. U. Análise Da Corrosão Das Estruturas De Concreto Armado Através Da Resistividade Elétrica: Revisão De Literatura. p. 202–215, 2021

SHARIFI, Y.; HOUSHIAR, M.; AGHEBATI, B. Recycled glass replacement as fine aggregate in self-compacting concrete. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 7, n. 4, p. 419–428, 2013.

SILVA, L. R. R. da. Análise de propriedades do concreto autoadensável com resíduo polimérico. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

SILVA, P. Resistividade elétrica e capilaridade do concreto autoadensável. v. 1, n. 1, p. 65–84, 2013.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Effect of iron slag as partial replacement of fine aggregates on the durability characteristics of self-compacting concrete. **Construction and**

Building Materials, v. 128, p. 88–95, 2016.

SOUSA, J.; SANTO, D. E.; ENCANTOS, C. V. A reciclagem como alternativa para o reaproveitamento das garrafas tipo long neck, n. 1, p. 1–7, 2018.

SOUZA, M.H. B., Influência do polímero superabsorvente em argamassas autoadensáveis para empreendimentos hidráulicos. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2022.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo - SP: PINI, 1998. v. 152

SRIKANTH S.; LALITHA, K. G. Durability properties of self compacting concrete partial replacement of fine aggregate with waste crushed glass. **Materials Today: Proceedings**, v. 51, p. 2411–2416, 2022.

TRENTIN, P. O. et al. Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, 2020.

TUAUM, A.; SHITOTE, S.; OYAWA, W. Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate. **Buildings**, v. 8, n. 2, 2018.

TUTIKIAN, B. F. ; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. 2a. ed. São Paulo - SP: Editora Pini, 2015.

TUTIKIAN, B. F. Método para dosagem de concreto autoadensável. **Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, p. 148, 2004.

VERZEGNASSI, E. Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve autoadensável. **Dissertação de mestrado**, p. 121, 2015.

VIAN, D. **Análise Do Comportamento Mecânico E Durabilidade De concretos produzidos com vidro moído**. [s.l.] Universidade do Vale do Taquari - Univates, 2018.

VIEIRA, F. M. P.. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concreto com adição de sílica ativa**. p. 242, UFRGS - Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, 2003.

ZHENG, K. Recycled glass concrete. **Eco-Efficient Concrete**, v. 2010, p. 241–270, 2013.