

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ULTRA ALTO
DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO FRENTE À AÇÃO DE
CLORETOS**

Silvete Mari Soares

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. José Américo Alves Salvador Filho

São Carlos

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ULTRA ALTO
DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO FRENTE À AÇÃO DE
CLORETOS**

SILVETE MARI SOARES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de
São Carlos como parte dos requisitos para a
obtenção do Título de Doutora em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. José Américo Alves Salvador Filho

São Carlos
2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Silvette Mari Soares, realizada em 25/03/2021.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira (UFSCar)

Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro (EESC/USP)

Prof. Dr. Almir Sales (UFSCar)

Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira (USP)

Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei (UEM)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Aos meus pais Antenor e Eunice (in memoriam)
com muita saudade e gratidão
e aos meus filhos Raquel e Guilherme
com muito orgulho e carinho

AGRADECIMENTOS

A história do meu doutorado completa 30 anos agora em 2021 e meus agradecimentos têm que começar pelo meu querido orientador Wilson Sérgio Venturini (*in memoriam*), o primeiro e o que sempre me incentivou a continuar.

Agradeço à minha querida orientadora Fernanda Giannotti da Silva Ferreira pela confiança, doçura, amizade construída e orientação impecável. Sua calma foi minha calma.

Ao amigo e coorientador José Américo Alves Salvador Filho cujo incentivo foi fundamental para minha tomada de decisão de recomeçar meu doutoramento.

Durante os últimos quatro anos tive a sorte de conviver com alguns “anjos” ... ao primeiro, ao que é “o cara”, ao José Roberto de Oliveira devo quase tudo que consegui desenvolver. Devo meus agradecimentos também à Taís Oliveira Gonçalves Freitas e ao Arthur de Sousa Lima Vasconcelos pela enorme ajuda e pela infinita paciência. Essas amizades nasceram com a pesquisa e serão mantidas pela vida.

Agradeço também ao pessoal do Laboratório de Materiais e Componentes em especial ao técnico José Roberto, à Taís e ao Adalberto que foram fundamentais no desenvolvimento desse trabalho. E aos demais: Mariana, Rosana, Juliana, Mariane, Fernando, Alexandre, Thiago, Carla, Lucas da iniciação científica, que me ajudaram muito, e a todos os demais que frequentaram o laboratório, pela amizade construída.

Agradeço ao Guilherme Aris Parsekian e ao Ricardo Luiz Canato, que disponibilizaram o laboratório de Sistemas Estruturais para que realizássemos todos os ensaios mecânicos e ainda renderam boas risadas.

Agradeço especialmente ao meu amigo Beba, Everaldo Chaves de Oliveira, pela doação de todas as garrafas de vidro (de cerveja) pós consumo utilizadas nesta pesquisa.

Ao Flávio Munhoz da Associação Brasileira de Cimento Portland, pelo empréstimo das fôrmas de reação álcali-agregado e doação de cimento padrão para realização dos ensaios.

Na pessoa do químico Fabiano Ferreira Chotoli, agradeço ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo pela realização de alguns dos ensaios deste trabalho.

Agradeço ao Antônio Luiz Quinelato coordenador do Lapoc da CNEM, pela realização do ensaio de FRX.

À Danila da GCP *Applied Technologies*, pela doação dos aditivos utilizados neste estudo. Agradeço também à Holcim, pela doação de todo o cimento utilizado nesta pesquisa. Na pessoa de Eder Pastorelli agradeço à Elkem pela doação da sílica ativa.

Ao aluno de Doutorado da Universidade de São Paulo, *campus* de São Carlos, Gustavo de Miranda Saleme Gidrão pelo auxílio nos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico.

Agradecimento especial ao Almir Sales, à Alessandra Lorenzetti de Castro e ao Eduardo Bellini Ferreira por todo ensinamento e pela colaboração com a nossa pesquisa, inclusive abrindo as portas dos seus laboratórios.

Aos membros da banca do meu exame de qualificação, Oswaldo Cascudo e Romel Dias Vanderlei pelas preciosas contribuições ao desenvolvimento desse trabalho.

Por último, mas nem por isso menos importante, quero agradecer à minha família e aos meus amigos.

De maneira muito especial quero agradecer aos meus filhos Raquel Soares Chinelatto e Guilherme Soares Chinelatto por todo amor, cuidado e compreensão... afinal foram quatro anos de pouca atenção da minha parte. Amo vocês!

Agradeço também ao Marcos Antônio Chinelatto pelo apoio que muitas vezes foi técnico.

Aos meus irmãos Sílvia, Samuel, Sérgio e Sidnei, cunhadas, cunhado, sobrinhas, sobrinhos, agregados e ao querido tio Joaquim (*in memoriam*) pela força, carinho e confiança. Samuel, a ajuda com os aparatos foi fundamental.

Agradeço também a todos os meus amigos que foram só carinho e incentivo e, de uma forma especial à Giseli, Paulinho e Ramiro (Poços de Caldas), Samara, Fátima, Palloma, Júlia e João (Caraguatatuba) e Maria Eugênia (São Carlos).

Por fim, agradeço a todos que, mesmo sem serem citados, de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho. E foram muitos!

Muito Obrigada!!

*Não diminua seus sonhos
para caberem nos seus medos...*

SOARES, S. M. **Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, 2021.

RESUMO

O concreto armado é um dos materiais de construção mais utilizados na construção civil, no Brasil e no mundo, pela facilidade de assumir formas diferentes e por proteger a armadura de ações externas e, assim, garantir sua durabilidade. Visando à construção de estruturas mais resistentes e duráveis o concreto armado passou a ser estudado não como material de alta resistência mecânica, mas como material de alto desempenho. O concreto de alto desempenho (CAD) é um concreto de alta resistência mecânica e com características que garantem sua maior durabilidade frente a ambientes agressivos, entre outros requisitos. O concreto de ultra alto desempenho (CUAD) é um material que tem baixa permeabilidade a cloretos, umidade e oxigênio com uma composição de matriz que tem uma baixa relação água/aglomerantes e, portanto, exibe alto desempenho mecânico e frente à corrosão das armaduras podendo ser usado para reparar estruturas de concreto. O CUAD geralmente é dosado com um alto teor de cimento, variando entre 800 e 1.000 kg/m³, o que afeta os custos de produção, consome fontes naturais de matéria prima e afeta negativamente o meio ambiente por meio de emissões de **CO₂**. Os materiais cimentícios suplementares (MCS) têm sido amplamente utilizados para substituir parcialmente o cimento Portland no concreto tanto como material de preenchimento quanto como material pozolânico. Nesse sentido, o pó de vidro apresenta-se como uma boa alternativa devido à sua natureza rica em sílica e grande quantidade disponível que, em muitos casos, é descartada em aterros sanitários ou não, de maneira inadequada. A hipótese considerada é a viabilidade da utilização do pó de vidro em altos teores em substituição ao cimento Portland, mantendo as características de alta resistência mecânica e de durabilidade frente à ação de cloretos dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho, proporcionando uma diminuição do consumo de cimento Portland. Este trabalho justifica-se pelo melhor conhecimento do uso do pó de vidro reciclado no compósito cimentício de ultra alto desempenho, em especial com relação à durabilidade frente a cloretos, com a análise de diversos fatores e possíveis problemas que essa substituição parcial possa vir a acarretar. O objetivo geral é avaliar a influência da substituição do cimento Portland por diferentes teores de pó de vidro reciclado em um compósito cimentício de ultra alto desempenho na resistência mecânica e na durabilidade frente ao ataque por cloretos, sendo um de seus objetivos específicos determinar o teor ideal de pó de vidro a ser incorporado em compósitos cimentícios. Foram desenvolvidos compósitos cimentícios com diferentes teores de pó de vidro reciclado (0%, 10%, 20%, 30% e 50%). Para tanto, foram realizados ensaios mecânicos e relacionados à durabilidade, tais como: absorção de água, resistência à penetração de cloretos, frente de penetração, teor total de cloretos, difusão e migração de cloretos, resistividade elétrica e potencial de corrosão dos compósitos cimentícios. Em relação à microestrutura, foram realizados ensaios de difratometria de raios X, termogravimetria, microscopia eletrônica de varredura e tomografia computacional. Os resultados mecânicos obtidos foram favoráveis à incorporação de pó de vidro em altos teores, uma vez que as resistências mecânicas se mantêm elevadas. Com relação à durabilidade frente ao ataque de íons cloreto os resultados também foram favoráveis à incorporação de altos teores de substituição do cimento Portland por pó de vidro, indicando alta capacidade dos CUAD em proteger o aço frente à ação de íons cloreto. E por fim, recomenda-se a utilização do teor de 50% de incorporação de pó de vidro em substituição ao cimento Portland por apresentar alta resistência mecânica, alta resistência ao ataque de cloretos, além de que a utilização desses compósitos cimentícios contribui para a diminuição da poluição ambiental, uma vez que a incorporação estudada é um resíduo.

Palavras-chave: CCUAD; sílica ativa; pó de vidro; durabilidade; ataque por cloretos.

SOARES, S. M. **Durability of ultra high performance cementitious composites with glass powder incorporation against the action of chlorides.** Thesis (Ph.D.) - Federal University of São Carlos, 2021.

ABSTRACT

Reinforced concrete is one of the most widely used construction materials in civil construction, in Brazil and worldwide, due to the ease of taking on different shapes and for protecting the reinforcement from external actions and, thus, guaranteeing its durability. In order to build more resistant and durable structures, reinforced concrete started to be studied not as a material of high mechanical resistance, but as a material of high performance. High performance concrete (HPC) is a concrete with high mechanical resistance and with characteristics that guarantee its greater durability in the face of aggressive environments, among other requirements. Ultra high performance concrete (UHPC) is a material that has low permeability to chlorides, moisture and oxygen with a matrix composition that has a low water / binder ratio and, therefore, exhibits high mechanical performance and against corrosion of the reinforcement, be used to repair concrete structures. UHPC is generally designed with a high cement content, ranging between 800 and 1,000 kg/m³, which affects production costs, consumes natural sources of raw material and negatively affects the environment through **CO₂** emissions. Supplementary cementitious materials (SCM) have been widely used to partially replace Portland cement in concrete, both as filling material and as pozzolanic material. In this sense, glass powder is a good alternative due to its silica-rich nature and the large amount available that, in many cases, is disposed of in landfills or not, inappropriately. The hypothesis considered is the feasibility of using glass powder at high levels to replace Portland cement, maintaining the characteristics of high mechanical resistance and durability against the action of chlorides in ultra high performance cementitious composites, providing a reduction in the consumption of Portland cement. This work is justified by the better knowledge of the use of recycled glass powder in the ultra high performance cementitious composite, especially with regard to durability against chlorides, with the analysis of several factors and possible problems that this partial substitution may cause. The general objective is to evaluate the influence of the substitution of Portland cement by different levels of recycled glass powder in an ultra high performance cementitious composite in the mechanical resistance and durability against the attack by chlorides, being one of its specific objectives to determine the ideal content of glass powder to be incorporated into cementitious composites. Cementitious composites with different contents of recyclable glass powder were developed (0%, 10%, 20%, 30% and 50%). For that, mechanical tests were carried out and related to durability, such as: water absorption, resistance to chloride penetration, penetration front, total chloride content, chloride diffusion and migration, electrical resistivity and corrosion potential of cementitious composites. Regarding the microstructure, X-ray diffraction tests, thermogravimetry, scanning electron microscopy and computed tomography were performed. The mechanical results obtained were favorable to the incorporation of glass powder at high contents, since the mechanical strength remain high. Regarding the durability against the attack of chloride ions, the results were also favorable to the incorporation of high contents of substitution of Portland cement by glass powder, indicating a high capacity of CUAD to protect steel against the action of chloride ions. And finally, it is recommended to use the 50% content of incorporation of glass powder to replace Portland cement because it has high mechanical resistance, high resistance to attack by chlorides, in addition to the use of these cementitious composites contributes to the reduction environmental pollution, since the studied incorporations are waste.

Keywords: UHPCC; silica fume; glass powder; durability; chloride attack.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corrosão eletroquímica.	32
Figura 2 – Formas de ocorrência de cloretos na estrutura do concreto.	34
Figura 3 – Efeito da concentração de cloreto de sódio na taxa de corrosão.....	35
Figura 4 – Micrografia eletrônica de varredura: a) Etringita e portlandita; b) $C - S - H$	40
Figura 5 – Representação bidimensional: a) Composto hipotético com arranjo cristalino simétrico e periódico; b) Rede do vidro de mesma composição, em que fica caracterizada a ausência de simetria e periodicidade.	43
Figura 6 – Esquema da variação do volume em função da temperatura e taxa de resfriamento.	44
Figura 7 – Difratoograma do pó de vidro.	46
Figura 8 – Morfologia de diferentes tamanhos de partículas de vidro: a) Imagem do microscópio eletrônico de varredura (MEV) de uma partícula de vidro (tamanho: 20-30 μm); b) Imagem MEV de partículas de vidro (tamanho: 40-80 μm); c) Imagem MEV de partículas de vidro (tamanho: até 800 μm); d) Imagem óptica de partículas de vidro (tamanho: até 10 mm).	46
Figura 9 – Construções em Quebec-Canadá, entre 2006 e 2012 utilizando concreto contendo pó de vidro usado como uma substituição parcial de cimento.	48
Figura 10 – Projeto de passarelas com seções reduzidas.....	48
Figura 11 – Conexões entre países via citações.	52
Figura 12 – Conexões entre autores via citações.....	53
Figura 13 – Etapas do programa experimental.	64
Figura 14 – Ensaios de caracterização dos materiais.	65
Figura 15 – Equipamento para a realização do ensaio de granulometria.	66
Figura 16 – Equipamento utilizado para realização da microscopia eletrônica de varredura. .	68
Figura 17 – Difratoograma de raios X da amostra de cimento Portland CP V ARI.	69
Figura 18 – Micrografia eletrônica de varredura do cimento CP V.	70
Figura 19 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.	71
Figura 20 – Difratoograma da amostra de sílica ativa utilizada.	74
Figura 21 – Micrografia da sílica ativa.....	74
Figura 22 – Moinho descarregando o pó de vidro (clique no hyperlink da figura para ser redirecionado ao vídeo).	75
Figura 23 – Preparo do pó de vidro reciclado.	75

Figura 24 – Processo de peneiramento e armazenagem do pó de vidro.....	76
Figura 25 – Difrátograma da amostra do pó de vidro utilizado.....	77
Figura 26 – Micrografia eletrônica de varredura do pó de vidro reciclado.	77
Figura 27 – Ensaio de potencial hidrogeniônico.	78
Figura 28 – Índice de consistência.	80
Figura 29 – Resistência à compressão nos ensaios de IAP com cal: pó de vidro, pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário.	81
Figura 30 – Índice de desempenho das argamassas: pó de vidro, pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário.....	83
Figura 31 – Pozolanicidade do pó de vidro.	86
Figura 32 – Condutividade elétrica versus tempo.	88
Figura 33 – Diferenças de condutividade elétrica.	88
Figura 34 – Curvas de distribuição granulométrica dos aglomerantes.....	89
Figura 35 – Ensaio do cone de Marsh.	90
Figura 36 – Realização do ensaio do miniabatimento e medição dos diâmetros de abertura da pasta.....	90
Figura 37 – Determinação do índice de consistência da pasta referência.	91
Figura 38 – Distribuição granulométrica do cimento, sílica ativa, pó de vidro e agregado miúdo.	92
Figura 39 – Curvas de distribuição granulométrica para os compósitos cimentícios.	92
Figura 40 – a) Realização do espalhamento (<i>flow table</i>); b) Medição de dois diâmetros para espalhamento.....	95
Figura 41 – Procedimento de mistura.....	95
Figura 42 – a) Argamassadeira utilizada no procedimento de mistura dos materiais; b) Argamassadeira durante um ensaio realizado (clique no hyperlink da figura para ser redirecionado ao vídeo).....	96
Figura 43 – Corpos de prova em câmara úmida.	97
Figura 44 – Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.	98
Figura 45 – Corpos de prova em estufa até constância de massa e corpos de prova em recipientes com água no ensaio de absorção de água.	99
Figura 46 – Ensaio de módulo de elasticidade estático.	100
Figura 47 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.	101
Figura 48 – Corpos de prova prismáticos para o ensaio de RAS.	102

Figura 49 – Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de RAS e relógio comparador para medida da variação dimensional dos corpos de prova.	103
Figura 50 – Câmara utilizada para acelerar o processo de carbonatação dos corpos de prova.	104
Figura 51 – Medida da frente de penetração de cloretos.	106
Figura 52 – Esquema e montagem do aparato para a realização do ensaio de migração de cloretos.	107
Figura 53 – Realização do ensaio de migração de cloretos.	107
Figura 54 – Correlação entre a condutividade elétrica e a concentração de íons cloreto, obtida experimentalmente.	108
Figura 55 – Esquema do gráfico obtido no ensaio de migração de cloretos, bem como a determinação do <i>time lag</i> (τ); início (Δ) e fim ($\bigcirc$) do estado estacionário de difusão...	109
Figura 56 – Precondicionamento das amostras.	111
Figura 57 – Amostras posicionadas nos aparatos.	111
Figura 58 – Aparato/amostra posicionado sobre o suporte com inclinação de 30°.	112
Figura 59 – Ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário em andamento.	113
Figura 60 – Frente de penetração de cloretos nas amostras.	113
Figura 61 – Procedimento indicado para a medição da frente de penetração de cloretos.	114
Figura 62 – Ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento.	116
Figura 63 – Extração do pó dos compósitos cimentícios (a), filtragem da solução (b), medida de pH (c).	118
Figura 64 – Barras em solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/l de hexametilenotetramina.	119
Figura 65 – a) Delimitação da área de exposição da barra; b) Posicionamento da barra no corpo de prova.	120
Figura 66 – Célula eletroquímica para a medida do potencial de corrosão das barras com a colocação da esponja para umedecimento superficial, medida do potencial de corrosão da armadura no compósito cimentício, utilizando uma esponja umedecida como contato.	121
Figura 67 – Ciclo de medida do ensaio de potencial de corrosão: a) Corpos de prova parcialmente imersos em solução de <i>NaCl</i> (3,5%) durante 3 dias; b) Corpos de prova em estufa a 50 °C durante quatro dias.	121
Figura 68 – Equipamento utilizado no ensaio de tomografia computadorizada de raios X.	123
Figura 69 – Corpos de prova utilizados no ensaio de tomografia de raios X; a) Amostra cilíndrica; b) Obtenção das amostras prismáticas; c) Amostras cúbicas e prismáticas.	124

Figura 70 – Teor ótimo de superplastificante.....	126
Figura 71 – Área de espalhamento da pasta de referência e com incorporação de pó de vidro, com teor de 2,25% de superplastificante.....	127
Figura 72 – Determinação dos tempos de início e fim de pega.....	128
Figura 73 – Gráfico com os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.	130
Figura 74 – a) Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 7 dias; b) Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 28 dias; c) Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 180 dias.....	133
Figura 75 – Sortividade dos compósitos cimentícios aos 7 dias, 28 dias e 180 dias.....	134
Figura 76 – Modos de ruptura à compressão axial.....	136
Figura 77 – Comparação dos valores dos resultados à compressão axial dos compósitos cimentícios.	137
Figura 78 – Efeito da relação água/aglomerante sobre a resistência à compressão de CAD e CUAD aos 28 dias.....	140
Figura 79 – Resultados de tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios. ...	142
Figura 80 – Resistência à tração por compressão diametral versus resistência à compressão axial para CCUAD.....	143
Figura 81 – Tração por compressão diametral e tração por flexão aos 28 dias.....	144
Figura 82 – Comparação dos valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático para os compósitos cimentícios aos 28 dias.	145
Figura 83 – Porosidade aparente.	147
Figura 84 – Densidade aparente.	148
Figura 85 – a) Relação entre porosidade aparente e resistência à compressão axial; b) Relação entre porosidade aparente e resistência à tração por flexão.	149
Figura 86 – Curvas de expansão dos compósitos cimentícios contendo pó de vidro em substituição ao cimento, para verificação da reação álcali-sílica.....	151
Figura 87 – Profundidade de penetração dos íons cloreto das amostras após exposição à solução de 3,5% de <i>NaCl</i>	153
Figura 88 – Frente de penetração de cloretos em compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro em substituição ao cimento após aspersão da solução de nitrato de prata aos 365 dias (a) e 720 dias (b).	154
Figura 89 – Teor total de íons cloreto dos corpos de prova após 311 dias de exposição à solução de 3,5% de <i>NaCl</i>	155

Figura 90 – Evolução da concentração de cloretos na solução presente na célula anódica em função do tempo, para ensaios de migração de cloretos. a) Amostras REF; b) Amostras VD50 (Δ = início do estado estacionário e $\circ$ = final do estado estacionário).....	156
Figura 91 – Fluxo de íons cloreto (J_{Cl}), coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário (D_s) e não estacionário (D_{ns}) através do concreto em função do tempo.....	158
Figura 92 – Relação entre o tempo de vida útil e a penetração de cloretos.....	160
Figura 93 – Coeficiente de difusão de cloretos e profundidade de penetração de cloretos aos 28 dias de idade.	161
Figura 94 – Correlação entre os coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário determinados por difusão e migração de cloretos em corpos de prova de referência e com 50% de pó de vidro.....	163
Figura 95 – Teor total de cloretos após ensaio de difusão de cloretos.	164
Figura 96 – a) Amostra não carbonatada de compósito cimentício referência; b) Amostra carbonatada de compósito cimentício com 50% de pó de vidro.	165
Figura 97 – Resistividade elétrica volumétrica dos compósitos cimentícios estudados.	167
Figura 98 – Correlação entre os coeficientes de difusão e a resistividade elétrica medida aos 28 dias de idade em corpos de prova de referência e com 50% de pó de vidro, mantidos em ambiente úmido.	168
Figura 99 – Resistividade elétrica dos compósitos cimentícios.	169
Figura 100 – Correlação razão pó de vidro/cimento versus resistividade elétrica dos compósitos cimentícios: 7 dias (a), 28 dias (b), 91 dias (c), 180 dias (d) e 230 dias (e).....	170
Figura 101 – Relação entre resistividade elétrica e resistência à compressão de compósitos cimentícios aos 7 dias (a), 28 dias (b) e 91 dias (c).	171
Figura 102 – Correlação da profundidade de penetração de cloretos versus resistividade elétrica dos compósitos cimentícios em idades avançadas.	172
Figura 103 – Evolução do potencial de corrosão das barras de armadura dos corpos de prova de compósitos cimentícios contendo pó de vidro em diversos teores, em função da idade, nos ciclos completos.	175
Figura 104 – Evolução do potencial de corrosão das barras de armadura dos corpos de prova de compósitos cimentícios contendo pó de vidro em diversos teores, em função da idade, nos semiciclos no estado úmido.....	176
Figura 105 – Barras de aço inseridas nos corpos de prova após ensaio de potencial de corrosão.	176

Figura 106 – Difractogramas das pastas de cimento aos 28 dias, 91 dias e 180 dias: a) do traço REF; b) VD50.	178
Figura 107 – Gráfico TG/DTG/DTA do traço de referência.	180
Figura 108 – Gráfico TG/DTG/DTA do traço VD50.	180
Figura 109 – Teor de água, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio nos compósitos cimentícios referência (REF) e com 50% de pó de vidro (VD50).	182
Figura 110 – MEV dos CCUAD REF e VD50 aos 28 dias.	183
Figura 111 – Partículas nos traços REF e VD50 determinadas por energia dispersiva de raios X (EDS) aos 28 dias.	184
Figura 112 – MEV dos CCUAD REF e VD50 aos 91 dias.	185
Figura 113 – Partículas no traço VD50 determinadas por energia dispersiva de raios X (EDS) aos 91 dias.	185
Figura 114 – Modelagem tridimensional dos corpos de prova dos traços analisados (clique no hyperlink da figura para ser redirecionado ao vídeo).	186
Figura 115 – Distribuição dos poros nos corpos de prova: a) REF, b) VD10, c) VD20, d) VD30 e e) VD50 (clique no hyperlink da figura para ser redirecionado ao vídeo).	187
Figura 116 – Frequência acumulada de diâmetros de poros dos compósitos cimentícios.	189
Figura 117 – Distribuição de poros dos compósitos cimentícios.	189
Figura 118 – Distribuição de poros e incremento de volume dos compósitos cimentícios.	190
Figura 119 – Curvas acumuladas da distribuição de poros dos compósitos cimentícios.	190
Figura 120 – Índice de porosidade dos compósitos cimentícios.	191

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado.	54
Quadro 2 – Caracterização física do agregado miúdo.	70
Quadro 3 – Nomenclatura adotada para os traços estudados	94
Quadro 4 – Ensaios realizados para caracterização dos compósitos cimentícios.	98
Quadro 5 – Ensaios realizados para avaliar durabilidade frente à ação de cloretos em compósitos cimentícios.	105
Quadro 6 – Nomenclatura adotada para cada traço estudado.	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de risco para o concreto em função do conteúdo de cloreto.....	37
Tabela 2 – Matérias-primas da indústria do vidro.....	45
Tabela 3 – Composição química do vidro (% em massa).	45
Tabela 4 - Características físicas do cimento CP V.....	68
Tabela 5 – Características químicas do cimento CP V.....	69
Tabela 6 – Composição química do agregado miúdo.....	71
Tabela 7 – Composição granulométrica do agregado utilizado.	71
Tabela 8 – Propriedades do aditivo superplastificante.	72
Tabela 9 – Propriedades do aditivo redutor de retração.	72
Tabela 10 – Composição química do aço.....	72
Tabela 11 – Propriedades físicas e químicas da sílica ativa.	73
Tabela 12 – Composição química da sílica ativa.	73
Tabela 13 – Composição química do pó de vidro.	76
Tabela 14 – pH das amostras de pó de vidro.....	78
Tabela 15 – Exigências químicas e físicas.	79
Tabela 16 – Resistência à compressão para avaliação da pozolanicidade do pó de vidro.	81
Tabela 17 – Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias.	82
Tabela 18 – Resultados obtidos no ensaio de Chapelle modificado.....	85
Tabela 19 – Avaliação da atividade pozolânica por medida de condutividade elétrica.	86
Tabela 20 – Perda relativa de condutividade elétrica (%) em função do tempo (s) para diferentes adições.....	87
Tabela 21 – Consumo de cada material constituinte dos compósitos cimentícios estudados, em kg/m ³	94
Tabela 22 – Quantidades de agregado.....	102
Tabela 23 – Tensões e correntes de referência para o ensaio de difusão de cloretos no estado não estacionário.....	112
Tabela 24 – Resistência à penetração de cloretos de vários tipos de compósitos cimentícios baseada na difusão de cloretos aos 28 dias de idade.	114
Tabela 25 – Valores de resistividade elétrica com indicativos da probabilidade de corrosão do concreto, segundo CEB – 192 e o boletim europeu COST 509.....	115
Tabela 26 – Classificação dos valores de resistividade elétrica volumétrica quanto à penetração de íons cloreto.	117

Tabela 27 – Proporção de materiais utilizados para a obtenção das soluções de água de poro.	118
Tabela 28 - Parâmetros utilizados no ensaio de tomografia.	124
Tabela 29 – Miniabatimento dos traços com 2,25% de SP.	127
Tabela 30 – Traço unitário e índice de consistência dos compósitos cimentícios estudados.	129
Tabela 31 – Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.	130
Tabela 32 – Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios (g/cm ²).	131
Tabela 33 – Composição dos concretos.	135
Tabela 34 – Comparação entre compósitos cimentícios de ultra alto desempenho e concreto convencional.	135
Tabela 35 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 2 dias.	135
Tabela 36 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 7 dias.	136
Tabela 37 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias.	136
Tabela 38 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 91 dias.	136
Tabela 39 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 365 dias.	136
Tabela 40 – Eficiência energética dos compósitos cimentícios.	141
Tabela 41 – Resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 28 dias e 180 dias de idade.	141
Tabela 42 – Resultados de resistência à tração por flexão.	143
Tabela 43 – Módulos de elasticidade dinâmico e estático aos 28 dias de idade.	144
Tabela 44 – Porosidade aparente (%).	146
Tabela 45 – Densidade aparente (g/cm ³).	147
Tabela 46 – Expansão média das amostras.	150
Tabela 47 – Frente de penetração dos íons cloreto dos corpos de prova expostos a uma solução de 3,5% de NaCl.	153
Tabela 48 – Fluxo de íons cloreto e coeficientes de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário.	158
Tabela 49 – Coeficientes de difusão de cloretos de acordo com diferentes autores.	159
Tabela 50 – Frente de penetração de cloretos e coeficientes de difusão de cloretos aos 28 dias.	161
Tabela 51 – Resistividade elétrica dos compósitos cimentícios estudados.	166
Tabela 52 – Resultados de condutividade elétrica e pH das soluções produzidas com os compósitos cimentícios após 365 dias de cura.	173

Tabela 53 – Valores de pH e condutividade elétrica das soluções de água dos poros dos compósitos cimentícios.	174
Tabela 54 – Resultados do ensaio de tomografia computadorizada.	188
Tabela 55 – Somatório do volume de poros correspondente aos poros maiores e menores que 40 µm e 90 µm.	191
Tabela 56 – Resumo dos principais resultados para as propriedades estudadas.	192

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Cimento CP V
CAD	Concreto de alto desempenho
CC	Concreto convencional
CCUAD	Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho
CDE	Concreto duplo estágio
CEMPRE	Compromisso empresarial para reciclagem
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNQ	Confederação Nacional do Ramo Químico
CP	Cimento padrão
CP V ARI	Cimento Portland Classe V – Alta resistência inicial
CP-SA	Cimento Portland Classe V + 8% de sílica ativa
CP-VD	Cimento Portland Classe V + 50% de pó de vidro
CP-SA-VD	Cimento Portland Classe V + 8% de sílica ativa + 50% de pó de vidro
CUAD	Concreto de ultra alto desempenho
d50	Tamanho abaixo do qual se encontram 50% do volume de material
d90	Tamanho abaixo do qual se encontram 90% do volume de material
DECiv	Departamento de Engenharia Civil
DRX	Difratometria de raios X
DTG	Derivada da termogravimetria
EDS	Energia dispersiva de raios X
EEQ	<i>Éco Entreprises Québec</i>
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo
EPA	<i>US Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios X
IFSC/USP	Instituto de Física de São Carlos/Universidade de São Paulo
IFSP	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LIEC	Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica
LMC	Laboratório de Materiais e Componentes
MCS	Materiais cimentícios suplementares

MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MF	Módulo de finura
NBR	Norma brasileira
pH	Potencial hidrogeniônico
RAS	Reação álcali-sílica
REF	Traço referência com adição de sílica ativa e 0% de pó de vidro
RR	Redutor de retração
SCA	Sílica da casca de arroz
SP	Superplastificante
TG	Termogravimetria
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UHPC	<i>Ultra high performance concrete</i>
UHPC	<i>Ultra high performance cementitious composite</i>
UR	Umidade relativa
VD10	Traço com adição de sílica ativa e substituição do cimento por 10% de pó de vidro (em volume)
VD20	Traço com adição de sílica ativa e substituição do cimento por 20% de pó de vidro (em volume)
VD30	Traço com adição de sílica ativa e substituição do cimento por 30% de pó de vidro (em volume)
VD50	Traço com adição de sílica ativa e substituição do cimento por 50% de pó de vidro (em volume)
CH	Portlandita, hidróxido de cálcio
$C - S - H$	Silicato de cálcio hidratado
$Ca(OH)_2$	Portlandita, hidróxido de cálcio
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
C_2S	Silicato dicálcico (belita)
C_3S	Silicato tricálcico (alita)
a/c	Relação água/cimento
a/agl	Relação água/aglomerantes
IAP	Índice de atividade pozolânica
$I_{cimento}$	Índice de desempenho com o cimento Portland

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1 Considerações iniciais	25
1.2 Justificativa da pesquisa	27
1.3 Objetivo	29
1.3.1 Objetivo geral.....	29
1.3.2 Objetivos específicos.....	29
1.4 Hipótese da pesquisa	29
1.5 Originalidade	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 Durabilidade.....	31
2.1.1 Corrosão das armaduras no concreto	32
2.1.2 Ação dos cloretos	34
2.2 Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho	37
2.3 Resíduos de vidro.....	42
2.3.1 Utilização do pó de vidro em compósitos cimentícios.....	45
2.3.2 Reações álcali-sílica	50
2.3.3 Estado da arte da utilização do pó de vidro em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho.....	52
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	64
3.1 Caracterização dos materiais	65
3.1.1 Cimento Portland.....	68
3.1.2 Agregado miúdo.....	70
3.1.3 Aditivos	72
3.1.4 Barras de aço	72
3.1.5 Sílica ativa	73
3.1.6 Pó de vidro	74

3.1.6.1	Potencial hidrogeniônico do pó de vidro	78
3.1.6.2	Índice de atividade pozolânica do pó de vidro	79
3.1.6.2.1	<i>Índice de atividade pozolânica com a cal</i>	80
3.1.6.2.2	<i>Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias</i>	82
3.1.6.2.3	<i>Chapelle modificado</i>	84
3.1.6.2.4	<i>Condutividade elétrica</i>	85
3.1.7	Granulometria dos aglomerantes.....	88
3.2	Estudos em pasta	89
3.2.1	Teor ótimo de aditivo superplastificante	89
3.2.2	Compatibilidade entre aglomerantes e aditivos	90
3.2.3	Tempos de pega.....	91
3.3	Definição dos traços.....	91
3.4	Caracterização dos compósitos cimentícios	97
3.4.1	Densidade de massa e teor de ar incorporado	98
3.4.2	Absorção de água por capilaridade	98
3.4.3	Resistência à compressão axial	100
3.4.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	100
3.4.5	Resistência à tração na flexão	100
3.4.6	Módulo de elasticidade estático e dinâmico.....	100
3.4.7	Porosidade aparente e densidade aparente	101
3.4.8	Reação álcali-sílica.....	101
3.4.9	Profundidade de carbonatação natural e acelerada	103
3.5	Ensaio relacionados à durabilidade frente à ação de cloretos.....	104
3.5.1	Frente de penetração de cloretos	105
3.5.2	Teor total de cloretos.....	106
3.5.3	Migração de cloretos	106
3.5.4	Difusão de cloretos.....	110

3.5.5	Efeito combinado de difusão de cloretos com carbonatação acelerada	115
3.5.6	Resistividade elétrica.....	115
3.5.7	Condutividade elétrica e pH dos compósitos cimentícios.....	117
3.5.8	Condutividade elétrica e pH das soluções da água de poro	118
3.5.9	Potencial de corrosão do aço em compósito cimentício	119
3.6	Estudos microestruturais.....	122
3.6.1	Difratometria de raios X.....	122
3.6.2	Termogravimetria.....	122
3.6.3	Microscopia eletrônica de varredura	123
3.6.4	Tomografia computadorizada	123
3.7	Análise estatística dos resultados	124
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	126
4.1	Estudos em pasta	126
4.1.1	Cone de Marsh	126
4.1.2	Mini abatimento	126
4.1.3	Tempos de pega.....	128
4.2	Definição dos traços.....	129
4.3	Estudo em compósitos cimentícios.....	130
4.3.1	Densidade de massa e teor de ar incorporado	130
4.3.2	Absorção de água por capilaridade	131
4.3.3	Resistência à compressão axial	135
4.3.4	Resistência à tração por compressão diametral e por flexão.....	141
4.3.5	Módulo de elasticidade estático e dinâmico.....	144
4.3.6	Porosidade aparente e densidade aparente	146
4.3.7	Reações álcali-sílica	149
4.3.8	Frente de carbonatação	152
4.4	Ensaio de durabilidade frente à penetração de cloretos	153

4.4.1	Frente de penetração de cloretos	153
4.4.2	Teor total de cloretos	155
4.4.3	Migração de cloretos	156
4.4.4	Difusão de cloretos	161
4.4.5	Efeitos combinados de difusão de cloretos com profundidade de carbonatação 164	
4.4.6	Resistividade elétrica.....	165
4.4.7	Condutividade elétrica e pH dos compósitos cimentícios.....	173
4.4.8	Condutividade elétrica e pH das soluções de água de poros.....	174
4.4.9	Potencial de corrosão do aço em compósitos cimentícios	174
4.5	Estudos microestruturais.....	177
4.5.1	Difratometria de raios X.....	177
4.5.2	Termogravimetria.....	179
4.5.3	Microscopia eletrônica de varredura	183
4.5.4	Tomografia computadorizada	186
4.6	Resumo das principais análises	192
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	194
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	198
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
	APÊNDICE A	214
	APÊNDICE B.....	215
	APÊNDICE C	216
	APÊNDICE D	224
	APÊNDICE E.....	229
	APÊNDICE F.....	231
	APÊNDICE G	232
	APÊNDICE H	234

APÊNDICE I.....	239
APÊNDICE J	240
APÊNDICE K	244
APÊNDICE L.....	248
APÊNDICE M	253
APÊNDICE N	255

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O concreto armado é um dos materiais de construção mais utilizados na construção civil, no Brasil e no mundo, pela facilidade de assumir formas diferentes e por proteger a armadura de ações externas e, assim, garantir sua durabilidade. Porém, a construção civil passou a confrontar-se, a partir da segunda metade do século XX, com problemas relativos à deterioração das estruturas. Os problemas associados à durabilidade das estruturas de concreto tendem a se acentuar quando grande parte das edificações completa uma idade em que os custos de manutenção e reparos são mais constantes.

Visando à construção de estruturas mais resistentes e duráveis é que o concreto armado passou a ser estudado não como material de alta resistência mecânica, mas como material de alto desempenho. O concreto de alto desempenho (CAD) é um concreto de alta resistência mecânica e com características que garantem sua maior durabilidade frente a ambientes agressivos, entre outros requisitos.

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 deslocamento do concreto de cobrimento, diminui a área da seção transversal de uma barra de aço e afeta o desempenho mecânico da estrutura de concreto. 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 perdidas.

Uma técnica de reforço usual é o aumento de seção com a utilização de concretos convencionais ou especiais, com inclusão ou não de armaduras adicionais, para reparar estruturas de concreto danificadas.

O concreto de ultra alto desempenho (CUAD) é um material que tem baixa permeabilidade a cloretos, umidade e oxigênio com uma composição de matriz que tem uma baixa relação água/aglomerantes e, portanto, exibe alto desempenho mecânico e frente à corrosão das armaduras podendo ser usado para reparar estruturas de concreto.

Existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados na composição do CUAD, o que resulta em variações expressivas no seu comportamento mecânico. Aditivos podem ser incorporados, visando manter a trabalhabilidade necessária do CUAD ou para evitar a retração. O uso de adições minerais interfere no comportamento mecânico através da formação de produtos resistentes e da possibilidade de melhor empacotamento das partículas.

O CUAD geralmente é dosado com um alto teor de cimento, variando entre 800 e 1.000 kg/m³, o que afeta os custos de produção, consome fontes naturais de matéria prima e afeta negativamente o meio ambiente por meio de emissões de CO₂. Os materiais cimentícios devem ser ambientalmente amigáveis (ecológicos) e devem proporcionar benefícios socioeconômicos, além de possuir boas características de resistência e de durabilidade.

De acordo com John *et al.* (2018), as estratégias tradicionais de mitigação das emissões de CO₂ na indústria cimenteira não são suficientes para garantir a diminuição necessária em um cenário de crescente demanda por cimento. A substituição do clínquer por fíler reduz as emissões de CO₂ na produção de cimento, quase que proporcionalmente à taxa de substituição, porque os filers não requerem calcinação.

Os filers são definidos como materiais particulados finos que são inertes ou quase quimicamente inertes quando misturados ao cimento, produzidos por moagem com ou sem tratamento de superfície. Eles são usados como substitutos parciais do clínquer ou de outros materiais cimentícios suplementares reativos. A definição de filers de minerais inertes inclui partículas na mesma faixa de granulometria do cimento, bem como partículas que são mais finas do que o cimento e são usadas por razões econômicas, técnicas e ambientais na indústria de cimento, bem como em outras indústrias.

Para a indústria cimenteira, o uso de filers ajuda a reduzir a energia térmica e as emissões de CO₂ e aumenta a expectativa de vida produtiva das pedreiras de calcário.

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) têm sido amplamente utilizados para substituir parcialmente o cimento Portland no concreto tanto como material de preenchimento quanto como material pozolânico. Nesse sentido, o pó de vidro apresenta-se como uma boa alternativa devido à sua natureza rica em sílica e grande quantidade disponível que, em muitos casos, é descartada em aterros sanitários ou não, de maneira inadequada. Dependendo da sua granulometria, o vidro pode ser considerado um material pozolânico.

A substituição parcial do cimento por pozolana implica na economia de energia e na redução do custo de fabricação do cimento. Isso aumenta o período de exploração das jazidas de calcário e argila e, conseqüentemente, o período de produção da fábrica de cimento. Além disso, há um aumento da capacidade de produção sem necessidade de novos investimentos.

Portanto, o conhecimento a respeito dos materiais pozolânicos, no que diz respeito às suas características físicas, químicas, mineralógicas, processos de obtenção e o seu comportamento quando adicionados a concretos e argamassas, torna-se relevante, tendo em vista os benefícios que estes materiais podem proporcionar em relação à resistência mecânica e durabilidade (SOARES; FERREIRA; SALVADOR FILHO, 2018a).

Materiais cimentícios suplementares têm sido cada vez mais utilizados na construção civil, o que leva à necessidade de garantir-se a qualidade e confiabilidade desses novos materiais. Esses novos materiais podem também diminuir os impactos ambientais resultantes do descarte no ambiente.

O potencial de impacto deste trabalho do ponto de vista técnico-científico e de inovação deve levar em conta o desenvolvimento do compósito cimentício de ultra alto desempenho (CCUAD) com o uso do pó de vidro como substituto parcial do cimento Portland na produção dos compósitos cimentícios. Com relação ao aspecto socioeconômico e ambiental, deve-se considerar o uso do pó de vidro reciclado como substituto parcial do cimento na produção dos compósitos cimentícios, o que torna esses materiais ecologicamente amigáveis.

1.2 Justificativa da pesquisa

Pelos recentes desenvolvimentos na tecnologia de concreto estão surgindo novas gerações de concreto, como o concreto de ultra alto desempenho (CUAD), que foi definido como um concreto com alta resistência mecânica e de altas ductilidade e durabilidade.

O CUAD é composto por um teor muito alto de cimento acrescido de sílica ativa, pó de quartzo e areia de quartzo, podendo conter fibras. A inclusão de fibras melhora a ductilidade e a capacidade de flexão do CUAD, que pode atingir resistência à compressão superior a 150 MPa, resistência à flexão de até 15 MPa, módulo de elasticidade de 45 GPa e mínima fluência a longo prazo, e é quase impermeável à penetração de cloretos (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016).

Essas características resultam da melhora da homogeneidade eliminando-se o agregado graúdo, do aumento da densidade de empacotamento melhorando a microestrutura e da incorporação de fibras.

Outra questão importante na atualidade é a utilização de resíduos como forma de diminuir a sua disposição na natureza, como é o caso dos vidros pós-consumo, que, embora sejam totalmente reutilizáveis, são descartados de maneira inadequada.

Segundo Alnahhal *et al.* (2018), o uso de materiais cimentícios suplementares como substitutos parciais do cimento convencional é considerado uma alternativa viável para a redução da emissão de CO_2 , pois, ao mesmo tempo que a indústria cimenteira tem um impacto negativo sobre o meio ambiente e a sustentabilidade, o concreto é um componente indispensável no desenvolvimento de infraestrutura, indústria e habitação.

De acordo com Barros (2016), a produção do cimento Portland é um processo altamente poluente e de elevado consumo de energia, contribuindo com cerca de 5% a 8% das emissões globais de gás carbônico (CO_2) na atmosfera. A produção de uma tonelada de cimento emite uma tonelada de dióxido de carbono. Além disso, a indústria do cimento é responsável por 3% do total do consumo de matérias-primas no mundo.

Materiais como metacaulim, sílica ativa, cinzas volantes, resíduos de vidro em pó e escória granulada de alto-forno têm sido avaliados para melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido com material reciclado.

O vidro, não sendo biodegradável, não é adequado para adição em aterros, sendo necessário investigar as oportunidades de reciclagem. Por outro lado, o vidro é um material 100% reciclável. Em princípio, a mesma unidade de vidro pode ser aproveitada inúmeras vezes,

constituindo uma grande vantagem do ponto de vista ambiental, não só pela economia de matérias-primas como também pela menor geração de resíduos sólidos urbanos. Porém, as indústrias geradoras e consumidoras de vidro não conseguem reciclar 100% do vidro produzido.

A utilização de vidro residual como substituto parcial do agregado miúdo em concreto estrutural é particularmente atraente. Adaway e Wang (2015) determinaram o nível de substituição de vidro, em proporções de 15%, 20%, 25%, 30% e 40%, e verificaram que o concreto contendo até 30% de agregado de vidro fino exibe maior resistência à compressão do que o concreto tradicional, sendo 9% e 6% superior à do controle, após 7 dias e 28 dias, respectivamente.

Segundo Soliman e Tagnit-Hamou (2016), o melhor desempenho do concreto de vidro de ultra alto desempenho no que diz respeito à durabilidade é com relação à capacidade de reduzir os custos de manutenção. Esse material pode ser usado para construir estruturas altamente eficientes em termos energéticos, ambientalmente amigáveis, acessíveis e resilientes, além de economizar o dinheiro gasto para o tratamento de vidros e diminuir sua disposição em aterros sanitários.

Du e Tan (2017) usaram alto volume de pó de vidro como substituto do cimento no compósito cimentício por meio de um extenso programa experimental conduzido para investigar a microestrutura, propriedades mecânicas e de durabilidade desses compósitos, com foco no desempenho de longo prazo. Além do uso de menor quantidade de matérias-primas, eliminação de resíduos da natureza e menor consumo de energia, as vantagens do compósito cimentício com alto volume de pó de vidro foram demonstradas pelos melhores comportamentos mecânicos e mais claramente pelo maior desempenho com relação à durabilidade.

De acordo com Barros (2016), dependendo do tamanho da partícula e da proporção de vidro utilizada na produção de concreto, comportamentos antagônicos podem ser observados: a reação álcali-sílica (RAS) relacionada a efeitos negativos de expansão e a reação pozolânica que melhora a resistência mecânica.

Alguns pesquisadores relatam a ocorrência da reação álcali-sílica quando o pó de vidro é utilizado como agregado miúdo (IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2010; SERPA *et al.*, 2013). No entanto, estudos realizados por Afshinnia e Rangaraju (2015) apresentaram resultados satisfatórios na mitigação da reação álcali-sílica quando este mesmo pó de vidro foi utilizado como material pozolânico em substituição parcial ao cimento.

Soares, Ferreira e Salvador Filho (2018b) avaliaram a influência da substituição do cimento Portland por diferentes teores de pó de vidro na ocorrência da reação álcali-sílica bem como na sua pozolanicidade, em uma matriz produzida com agregado reativo. Verificou-se neste trabalho que vidro moído passante na peneira de 0,075 mm possui atividade pozolânica e pode, portanto, ser utilizado como material cimentício suplementar. Em relação ao potencial reativo do vidro com os álcalis, no ensaio de RAS, utilizando o vidro como adição mineral em substituição ao cimento, não foram detectadas expansões deletérias superiores ao traço de referência para substituição de 20% do cimento por vidro moído. Para substituição de 10% do cimento, a possibilidade de ocorrência da RAS é mais evidente. Por outro lado, para teores de

30% e 50% de substituição, a reatividade é reduzida consideravelmente, mesmo o agregado sendo potencialmente reativo.

Soares, Ferreira e Salvador Filho (2018b) concluíram que a contribuição do pó de vidro na ocorrência da reação álcali-sílica depende do tamanho das suas partículas e da granulometria, mas também do teor de substituição utilizado.

Além da RAS, do ponto de vista da durabilidade e do desempenho estrutural, a corrosão de armaduras é um tema que tem recebido atenção especial da comunidade científica, principalmente no que diz respeito a estruturas submetidas à carbonatação e ao ataque de cloretos. Concretos de alto e ultra alto desempenho, devido à sua microestrutura densa, devem resolver este problema de durabilidade de estruturas de concreto convencional (SOHAIL *et al.*, 2021).

Sendo assim, este trabalho justifica-se pelo melhor conhecimento do uso do pó de vidro reciclado no compósito cimentício de ultra alto desempenho, em especial com relação à durabilidade frente a cloretos, com a análise de diversos fatores e possíveis problemas que essa substituição parcial possa vir a acarretar, conforme discutido anteriormente.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da substituição do cimento Portland por diferentes teores de pó de vidro reciclado em um compósito cimentício de ultra alto desempenho na resistência mecânica e na durabilidade frente ao ataque por cloretos.

1.3.2 Objetivos específicos

- i. Produzir compósitos cimentícios de ultra alto desempenho de referência e com substituição parcial do cimento por diferentes teores de pó de vidro;
- ii. Analisar o comportamento mecânico dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho estudados;
- iii. Analisar o comportamento frente ao ataque de cloretos dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho estudados;
- iv. Determinar o teor ideal de pó de vidro, considerando resistência mecânica e durabilidade frente à ação de cloretos, a ser incorporado em compósitos cimentícios.

1.4 Hipótese da pesquisa

Os compósitos cimentícios de ultra alto desempenho apresentam elevada resistência mecânica e elevada durabilidade frente ao ataque de cloretos; além disso, o uso de materiais cimentícios suplementares como o pó de vidro reciclado tem se mostrado viável. Nesse contexto, a hipótese considerada é a viabilidade da utilização do pó de vidro em altos teores em substituição ao cimento Portland, mantendo as características de alta resistência mecânica e de durabilidade

frente à ação de cloretos dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho, proporcionando uma diminuição do consumo de cimento Portland, de acordo com a quantidade dos materiais cimentícios suplementares utilizados.

1.5 Originalidade

A utilização de pó de vidro em substituição ao cimento Portland em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho é relativamente recente. Além disso, a substituição de 50% de cimento por pó de vidro e a sua influência nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos compósitos frente à ação de cloretos ainda não está consolidada no meio científico, consistindo assim na originalidade da presente pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Durabilidade

Além da resistência mecânica, as estruturas de concreto devem ter garantida sua durabilidade visto que mesmo concretos adequadamente dosados, lançados e curados podem apresentar deterioração prematura.

Durabilidade é a capacidade do material de suportar as solicitações para as quais foi concebido, ao longo de um determinado período de tempo. A NBR 6118 (ABNT, 2014) define durabilidade como a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) define durabilidade como a capacidade de edifício ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas, até um estado limite de utilização.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta mecanismos de deterioração relativos ao concreto, que são lixiviação, expansão por sulfato e reação álcali-agregado e mecanismos de deterioração relativos à armadura, que são a despassivação por carbonatação, ou seja, por ação do gás carbônico da atmosfera e a despassivação por elevado teor de cloretos, presente em atmosfera marinha, por exemplo.

A despassivação das armaduras determina o início da corrosão do aço, que é a principal causa da deterioração de estruturas. A corrosão da armadura instala-se devido à porosidade do concreto, que depende da dosagem, da espessura da camada de cobrimento ou da presença de fissuras.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a água está presente na maioria dos tipos de deterioração e a taxa de deterioração é determinada pela facilidade com que a água penetra nos sólidos porosos. Sendo agente fundamental da criação e da destruição de muitos materiais naturais, a água costuma ser a causa de muitos tipos de processos físicos da degradação e pode ser também a fonte de processos químicos de degradação. Os fenômenos físico-químicos associados ao transporte de água em sólidos porosos são controlados pela permeabilidade do sólido.

No concreto a água é necessária para reações de hidratação do cimento e atua como agente facilitador da mistura dos componentes do concreto. Dependendo das condições ambientais e da espessura do elemento de concreto, grande parte da água evaporável é perdida, deixando os poros vazios ou não saturados. Se o concreto estiver seco e não for saturado novamente pela exposição ao ambiente não será vulnerável aos fenômenos destrutivos relacionados à água. A possibilidade de saturação está relacionada com a permeabilidade do concreto.

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), como a resistência mecânica e a permeabilidade estão relacionadas entre si por meio da porosidade capilar, os fatores que influenciam a resistência do concreto também influenciam sua permeabilidade. A permeabilidade será reduzida pela

redução do volume dos grandes vazios capilares da matriz da pasta de cimento, usando uma relação água/cimento baixa, um consumo adequado de cimento e uma cura e adensamento apropriados.

As causas físicas da deterioração do concreto incluem desgastes superficiais, fissuração devida à cristalização de sais nos poros e exposição a temperaturas extremas (congelamento ou fogo). As causas químicas incluem a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas e reações expansivas envolvendo ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão das armaduras no concreto.

2.1.1 Corrosão das armaduras no concreto

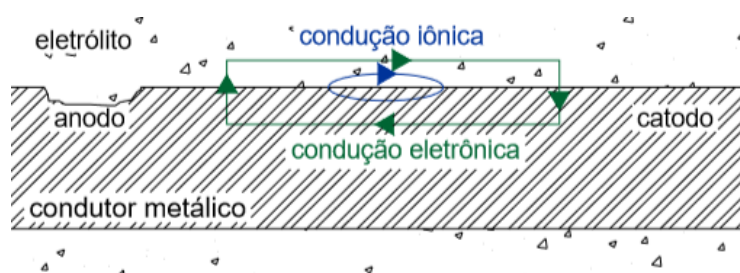
A corrosão do concreto é a principal causa de deterioração do concreto armado. Os danos resultantes da corrosão da armadura aparecem na forma de expansão, fissuração e lascamento do concreto de cobertura, além da perda de aderência entre o concreto e o aço e perda de área de seção transversal da barra de armadura.

O processo de corrosão do aço é causado pela necessidade do material em atingir seu estado de menor energia (estado mais estável). A maioria dos metais é encontrada na natureza na forma de compostos (óxidos e hidróxidos) que apresentam um estado mínimo de energia. Esses metais quando processados adquirem o estado metálico e ao entrarem em contato com o meio ambiente transformam-se em compostos com menor estado de energia. O ferro, principal componente da armadura de aço utilizada na estrutura de concreto, reage com o meio ambiente transformando-se em Fe_2O_3 hidratado (ferrugem) com um estado de energia menor, mais estável que o do ferro metálico (SOUZA, 2018).

A corrosão no aço é um processo eletroquímico causado pela ação de um agente oxidante (oxigênio e hidrogênio) que ao entrar em contato com a superfície do metal passa a receber elétrons – reação de redução. Os elétrons que são consumidos na reação de redução que ocorre no cátodo são fornecidos pela reação de oxidação do metal que ocorre no ânodo e são transferidos para o cátodo através de metal (eletrodo). Quando o metal sofre oxidação ele perde elétrons e transforma-se em cátion que desprende da estrutura metálica passando a ocorrer a dissolução do metal (SOUZA, 2018).

Na Figura 1 observa-se o esquema das alterações químicas fundamentais que ocorrem nas áreas anódicas e catódicas.

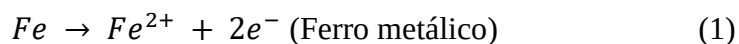
Figura 1 – Corrosão eletroquímica.



Fonte: Silva (2006).

A seguir estão as principais reações que descrevem a corrosão eletroquímica (Equações de 1 a 4).

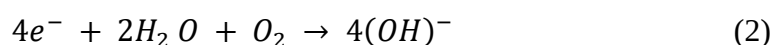
Região anódica:



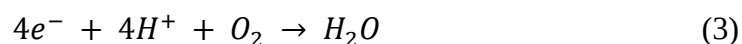
Região catódica:

a) Redução do oxigênio

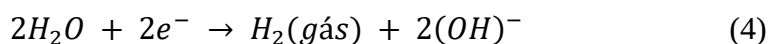
- Em meios neutros ou alcalinos:



- Em meios fracamente ácidos:



b) Evolução do hidrogênio



Dependendo do estado de oxidação a transformação do ferro metálico em produto de corrosão (ferrugem) produz um aumento de volume que pode chegar a 600% do volume do metal original. Para o processo catódico a presença do ar e da água na superfície do cátodo é absolutamente necessária (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Ribeiro (2018), os produtos de corrosão da armadura têm cor marrom-avermelhada e são porosos, solúveis, de baixa aderência e provocam expansões, podendo o ácido férrico ocupar um volume de duas até dez vezes maior que o volume do aço da armadura. Os produtos da corrosão da armadura levam à fissuração do concreto, aceleram a entrada de agentes agressivos, provocam o destacamento do concreto de cobrimento deixando a armadura exposta e podendo comprometer a estrutura.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), na superfície do aço que se encontra dentro do concreto é formado um filme protetor passivo, que ocorre em função das condições alcalinas existentes na solução nos poros da pasta de cimento, que tem pH entre 12 e 14 devido às grandes concentrações de hidróxidos. O ferro metálico não estará disponível para a reação anódica até que ocorra a despassivação da armadura. Quando, sob certas condições, o concreto tem alta permeabilidade, e quando os álcalis e a maior parte do hidróxido de cálcio são carbonatados ou lixiviados, o pH do concreto junto ao aço pode ser reduzido a menos de 11,5, destruindo a passividade do aço e propiciando condições para o processo de corrosão da armadura.

Mesmo com valores de pH superiores a 11,5 o filme protetor é destruído na presença de cloretos. O teor crítico de cloretos que inicia a corrosão do aço é da ordem de 0,4% em relação ao consumo de cimento para concreto armado, dependendo das condições de exposição da

estrutura, e depende de alguns fatores como grau de carbonatação, qualidade do concreto e umidade relativa.

Após a despassivação da armadura, a taxa de corrosão será controlada pela resistividade elétrica e pela disponibilidade de oxigênio. As adições, os agregados contaminados com sais e a penetração de soluções de sais de degelo ou água do mar são fontes comuns de cloretos no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O tempo de vida útil das estruturas é caracterizado pelos períodos de iniciação e de propagação da corrosão da armadura. O tempo que os agentes agressivos levam para atravessar o cobrimento, alcançar a armadura e promover sua despassivação é o período de tempo da iniciação da corrosão, e o período de propagação corresponde ao período de acumulação da deterioração até que ela seja inaceitável. O teor de oxigênio, a resistividade do material e a umidade relativa determinam a propagação. A carbonatação e a presença de cloretos acima da concentração crítica despassivam a armadura e iniciam o processo de corrosão.

De acordo com Ribeiro (2010), a verificação da profundidade de carbonatação é um teste simples para avaliação de fenômenos que podem favorecer a corrosão em concreto armado. Os mecanismos de transporte dos agentes agressivos (que no caso da carbonatação é o CO_2) envolvidos na carbonatação são a permeabilidade e a difusividade (GONEN; YAZICIOGLU, 2007).

O pó de vidro é um material alcalino e sua utilização como substituição parcial do cimento poderia retardar o processo de carbonatação, que se caracteriza pela redução do pH dos compostos do cimento.

2.1.2 Ação dos cloretos

Segundo Ribeiro (2018), é comum a incorporação de elementos agressivos durante o preparo do concreto. O mais comum dentre os agentes agressivos é íon Cl^- , podendo ser adicionado a partir de aditivos aceleradores de pega, agregados e água contaminados ou tratamentos de limpeza.

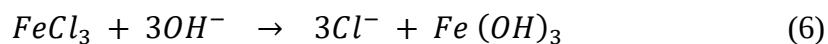
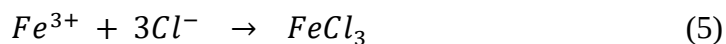
Na Figura 2 mostra-se, esquematicamente, que ao penetrar no concreto parte dos cloretos é ligada quimicamente aos compostos que contêm aluminato (C_3A e C_4AF), parte é adsorvida pelo gel amorfo de silicato de cálcio hidratado ($C-S-H$) e uma outra parte é encontrada livre para participar de processos corrosivos.

Figura 2 – Formas de ocorrência de cloretos na estrutura do concreto.



Fonte: Cascudo (1997).

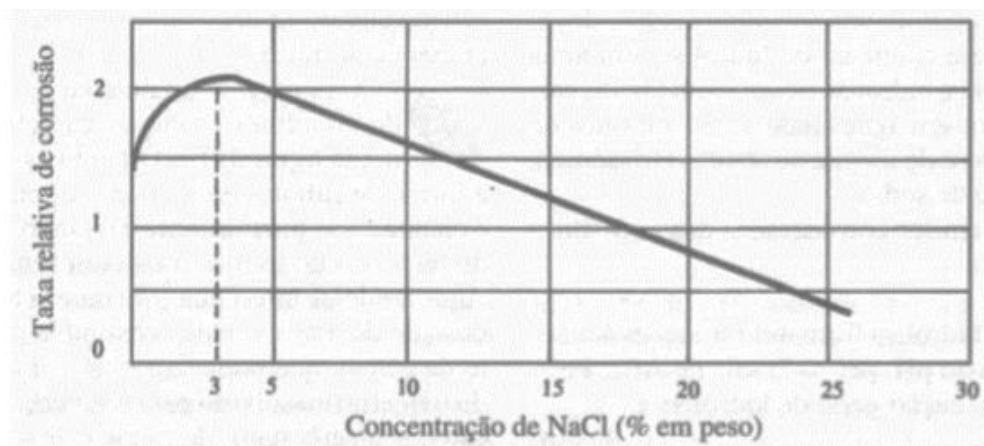
Ainda de acordo com Ribeiro (2018), os ânions Cl^- podem destruir a película passivadora proporcionada pelo meio alcalino e acelerar permanentemente a corrosão do aço, sem serem consumidos, conforme reações abaixo (Equações 5 e 6).



Essas reações continuam sem consumir o ânion cloreto de maneira que pequenas quantidades de cloretos podem ser responsáveis por grandes corrosões.

O efeito do cloreto de sódio na corrosão do aço deve-se ao fato desse sal ser um eletrólito forte, ocasionando aumento da condutividade, que é fundamental no mecanismo eletroquímico de corrosão. Na Figura 3 observa-se que no caso de ferro em água saturada de ar, em temperatura ambiente, a taxa de corrosão inicialmente cresce com a concentração de cloreto de sódio atingindo um valor máximo (3% de $NaCl$) e depois decresce até um teor de 26% (RIBEIRO, 2018).

Figura 3 – Efeito da concentração de cloreto de sódio na taxa de corrosão.



Fonte: Ribeiro (2018).

Não há um consenso no meio científico sobre o mecanismo de despassivação do aço pelos cloretos. Conforme Cascudo (1997), existem três teorias que podem explicar o efeito dos cloretos na corrosão do aço:

1. *A teoria do filme de óxido*: segundo essa teoria, os cloretos penetram nos defeitos do filme de óxido passivante muito mais facilmente que outros íons agressivos e podem dispersar-se coloidalmente nesse filme permitindo o ataque do aço.
2. *A teoria da adsorção*: conforme essa teoria, os cloretos são adsorvidos na superfície do aço com os íons hidroxila ou com o oxigênio dissolvido, promovendo a hidratação do ferro e viabilizando sua dissolução em cátions.
3. *A teoria do complexo transitório*: de acordo com essa teoria, os cloretos competem com os ânions hidroxila (OH^-) para a produção de compostos ferrosos de corrosão,

denominados complexos transitórios, os quais difundem-se a partir do ânodo em direção ao cátodo, permitindo que a corrosão do aço continue.

Quando a umidade atinge um valor crítico há uma rápida aceleração do processo corrosivo, a partir do qual a corrosão do aço acontece de forma mais acentuada. Se além da umidade houver também substâncias poluentes, a velocidade de corrosão do aço é acelerada. Os cloretos podem atingir a armadura de aço, oriundos do exterior, através da rede de poros, caso a estrutura esteja em atmosfera marinha ou em outro ambiente que contenha cloretos. A quantidade de cloretos é incrementada temporalmente chegando, até mesmo, a atacar toda a superfície da armadura, podendo provocar velocidades de corrosão da armadura intensas e perigosas (RIBEIRO, 2018).

A penetração dos cloretos acontece através dos mecanismos clássicos de penetração de água e transporte de íons, descritos a seguir:

- *Absorção ou sucção capilar:* a água que contém os cloretos penetra através dos poros do concreto devido à tensão superficial, principalmente em ciclos de umedecimento e secagem;
- *Migração de íons:* ocorre quando há a presença de um campo elétrico, que pode ser gerado, por exemplo, pela corrente elétrica do processo eletroquímico ou pela técnica de proteção catódica;
- *Difusão de íons:* o líquido ou gás penetra devido à ação de um gradiente de concentração entre o elemento que difunde e o meio difusor; e
- *Permeabilidade:* movimento de um fluido submetido à ação de um gradiente de pressão.

O teor de cloretos presente no concreto junto às armaduras capaz de desencadear o fenômeno da corrosão é o “teor crítico de cloretos”.

Há duas formas de expressar o teor de cloretos necessário para que ocorra a despassivação da armadura: a relação Cl^-/OH^- da solução dos poros e a quantidade de cloretos por unidade de cimento ou concreto. A relação Cl^-/OH^- é um parâmetro mais apropriado para prever o início do processo corrosivo, embora a obtenção desse valor seja muito difícil devido à grande quantidade de fatores intervenientes, e ainda à variabilidade verificada no momento da medição deste no concreto. É mais prático determinar a quantidade limite de cloretos para despassivar as armaduras em relação à massa de cimento ou de concreto.

A NBR 12655 (ABNT, 2015) recomenda que o percentual máximo admissível de cloretos em relação à massa de cimento para estruturas em concreto armado varie de 0,15% a 0,40% dependendo das condições de serviço da estrutura. Já para o concreto protendido esse teor deve ser menor que 0,05% em relação à massa de cimento.

Na Tabela 1 correlacionam-se os teores de cloretos, obtidos com base na norma BS 1881-124:2015, com o risco de corrosão das armaduras, mostrando as quantidades admissíveis em relação à massa de cimento e à massa de concreto (RIBEIRO, 2018).

Tabela 1 – Limites de risco para o concreto em função do conteúdo de cloreto.

Risco de corrosão	Teor de cloretos em relação à massa de cimento (%)	Teor de cloretos em relação à massa de concreto (%)
Desprezível	< 0,2	< 0,03
Baixo	0,2 a 0,4	0,03 a 0,06
Médio	0,4 a 1,0	0,06 a 0,14
Alto	> 1,0	> 0,14

Fonte: Ribeiro (2018).

Para a análise do teor de cloretos, as amostras podem ser obtidas na forma de pó, a partir da realização de furos com auxílio de uma broca ou a partir da extração de corpos de prova, que são cortados em fatias e triturados. O teor de cloretos pode ser determinado pelos métodos de gravimetria, titulometria ou análise volumétrica e potenciometria.

Além dos métodos baseados na química analítica clássica, a determinação do teor de cloretos é realizada através de métodos como a espectroscopia de fluorescência de raios X e a cromatografia. São pouco empregados, pois exigem equipamentos específicos e sofisticados, de elevado custo. Alguns pesquisadores utilizam ainda o método de extração da solução dos poros do concreto, com auxílio de uma seringa e, então, avalia-se o teor de cloretos através do pH da solução.

Os compósitos cimentícios além de alta resistência mecânica, precisam ser resistentes frente à ação de cloretos para que possam ser considerados de ultra alto desempenho.

2.2 Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho

Os materiais compósitos, formados pela combinação de dois ou mais materiais, com características e propriedades diversas, que continuam a ser claramente identificáveis após a combinação, vêm sendo cada vez mais utilizados na engenharia civil. Os compósitos são formados, basicamente, por dois componentes: a matriz e o componente de reforço.

Os compósitos são normalmente classificados em função do tipo de matriz e da natureza e forma de funcionamento do elemento de reforço, ou seja, os compósitos podem ser reforçados por partículas ou reforçados por fibras.

A partir das matrizes cimentícias são geradas praticamente todas as argamassas e concretos. A matriz cimentícia é formada pela hidratação do cimento e caracteriza-se pela boa resistência à compressão, reduzida resistência à tração, modesto módulo de elasticidade e comportamento frágil.

Tendo em vista o exposto acima, neste trabalho considera-se o estudo de um CCUAD reforçado com partículas, a saber, agregado miúdo, sílica ativa e pó de vidro reciclado.

O concreto de alto desempenho é uma evolução dos concretos convencionais, utilizando as mesmas matérias-primas com os mesmos princípios básicos de resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade, contendo adições minerais, que atuam preenchendo os vazios e como material pozzolânico, e superplastificantes, que permitem a utilização de baixas relações água/material cimentício, mantendo uma trabalhabilidade adequada para a utilização em estruturas de concreto.

O princípio básico na obtenção de um CAD consiste na diminuição da porosidade do concreto, e para isso é necessário diminuir a relação água/aglomerante; otimizar a granulometria dos agregados para obter maior compacidade; e utilizar adições minerais que provocam o refinamento dos poros e dos grãos. O emprego dessas ações simultâneas resulta em aumento de compacidade, resistência mecânica e durabilidade, ou seja, aumento do desempenho.

O concreto de ultra alto desempenho foi recentemente definido como um compósito à base de cimento com uma resistência à compressão superior a 150 MPa, utilizando água, sílica amorfa, fíler e agregado fino, bem como superplastificante, e podendo ser reforçado com fibras.

As principais propriedades do CUAD são porosidade extremamente baixa e alta densidade de empacotamento, resultante de partículas com diâmetros amplamente distribuídos variando de 0,1 a 1000 μm e uma relação água/cimento (a/c) menor que 0,20.

A principal característica do CUAD é o uso de sílica amorfa, que pode ser classificada em sílica ativa, microssílica, nanossílica etc., de acordo com o tamanho de suas partículas e propriedades. As características do CUAD, como funcionalidade e resistência mecânica, são consideravelmente dependentes das propriedades físicas e tipos de sílica amorfa usados (LEE *et al*, 2018a).

Na pasta de cimento hidratada os poros com diâmetro maior que 50 nm são os que mais interferem na compacidade e resistência mecânica dos concretos. Para reduzir a porosidade é necessário reduzir a água e o ar aprisionado na mistura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Vale salientar que não basta conhecer apenas o volume total de poros, mas também é necessário conhecer a distribuição dos tamanhos dos poros, assim como a interconectividade entre eles. Um poro isolado não produz efeito maléfico, mas poros interconectados formam caminhos por onde os agentes agressivos podem percorrer e afetar as propriedades do material.

A resistência da pasta depende também do grau de hidratação dos compostos do cimento ($C - S - H$ primário) e do avanço das reações pozzolânicas com o hidróxido de cálcio (formação de silicatos de cálcio hidratados secundários). A presença de adições minerais como a sílica ativa, cinza volante, metacaulim e outras melhora as propriedades reológicas da pasta, pela finura elevada que apresentam; diminui a exsudação pela segmentação dos canais de fluxo de água; proporciona o refinamento dos vazios devido à presença do $C - S - H$ secundário; e proporciona o refinamento das dimensões dos cristais de hidróxido de cálcio remanescentes das reações pozzolânicas.

O concreto é composto basicamente por cimento, agregados, adições, aditivos e água.

O cimento Portland é um cimento hidráulico produzido pela pulverização de clínqueres e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como adição na moagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Essa mistura deve proporcionar a formação de compostos hidráulicos e conferir a propriedade aglomerante do cimento Portland.

No forno ocorre a descarbonatação do calcário e a desestruturação dos argilominerais, liberando os quatro elementos principais (*Ca*, *Si*, *Al* e *Fe*) que se recombinaem sinterizando os componentes formadores do clínquer Portland: silicato tricálcico (alita – C_3S), silicato dicálcico (belita – C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF).

Segundo Cincotto (2011), o fenômeno inicial da hidratação é de dissolução-precipitação, onde parte da água é consumida na hidratação e o excesso é evaporado formando vazios, poros e capilares. A partir daí a água dos poros difunde através dos produtos hidratados formados, hidratando a fração anidra da partícula; essa fase é chamada de hidratação por difusão. Nas idades iniciais a velocidade de reação atinge um máximo e diminui em seguida, em torno de 72 horas. Para os materiais compósitos é a difusão da umidade ambiente para o interior e depende da porosidade da pasta; é uma reação sólido – umidade ambiente chamada reação topoquímica.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o processo de hidratação do cimento Portland consiste em reações simultâneas dos seus compostos anidros com a água, porém para cada composto a velocidade da reação é diferente. As características de perda de consistência e pega de uma pasta de cimento Portland são determinadas pelas reações de hidratação envolvendo os aluminatos, que se hidratam a uma velocidade bem mais rápida que os silicatos. Cerca de 75% do cimento Portland comum consistem de silicatos que determinam as características de endurecimento e resistência.

Assim que o cimento entra em contato com a água a fase líquida torna-se rapidamente saturada com várias espécies de íons. Dentro de poucos minutos da hidratação do cimento começam a aparecer cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, também chamado de etringita que compõe a pasta de cimento completamente hidratada e fornece a resistência e a durabilidade a longo prazo.

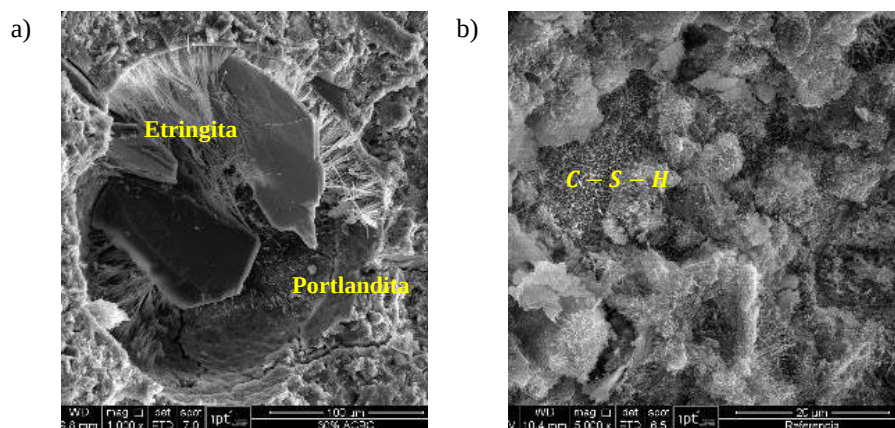
Poucas horas mais tarde, os espaços vazios ocupados por água e partículas de cimento em dissolução são ocupados por grandes cristais hexagonais de hidróxido de cálcio, chamados de portlandita, e pequenos hidratos de silicato de cálcio fibrosos ($C - S - H$). A portlandita, $Ca(OH)_2$, compõe de 20% a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada. O silicato de cálcio hidratado ($C - S - H$) compõe de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento completamente hidratada sendo a fase que determina as propriedades da pasta. A potencial contribuição à resistência do hidróxido de cálcio é limitada quando comparada ao $C - S - H$ devido à área superficial que é consideravelmente mais baixa.

Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15% a 20% do volume sólido da pasta de cimento hidratada. Durante os estágios iniciais da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina da solução favorece a formação de trissulfato hidratado. Nas pastas de cimento a etringita eventualmente

se transforma em monossulfato hidratado que no concreto de cimento Portland torna o concreto vulnerável ao ataque de sulfatos.

Na Figura 4 pode-se visualizar a morfologia dos principais produtos de hidratação do cimento: a etringita, a portlandita (CH) e o $C-S-H$.

Figura 4 – Micrografia eletrônica de varredura: a) Etringita e portlandita; b) $C-S-H$.



Fonte: Moretti (2018).

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), a pasta de cimento hidratada contém muitos tipos de vazios que têm influência em suas propriedades. O espaço interlamelar no $C-S-H$ corresponde a 28% da porosidade no $C-S-H$ 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.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que uma pequena quantidade de ar pode ficar aprisionada na pasta de cimento durante a mistura do concreto e outra pode ser incorporada pelo uso de aditivos. Os vazios de ar aprisionado e os vazios de ar incorporado na pasta de concreto podem interferir negativamente na resistência mecânica. Vazios de ar são geralmente esféricos. Podem ser decorrentes do ar que fica preso na pasta durante a mistura (3 mm) ou serem incorporados (50 e 200 μm).

Segundo Soliman e Tagnit-Hamou (2016), nos concretos de alto desempenho as estimativas colocam a porcentagem final de hidratação do cimento de 31% a 60% devido à proporção muito baixa de água para material cimentício. Partículas de cimento não hidratadas em concretos de ultra alto desempenho atuam como microagregados ou pontos de nucleação.

De acordo com Oliveira e Agopyan (2000), a água de poro é uma solução iônica composta predominantemente pelos íons Na^+ , K^+ e Ca^{2+} . Sua composição e concentração variam de

acordo com o tipo de cimento, agregados, adições, aditivos, quantidade de água de amassamento, grau de hidratação da matriz, e também com o meio externo. Essa água livre pode reagir com espécies químicas externas que venham a penetrar no concreto, com os produtos hidratados e com os grãos anidros.

A composição química da água de poro é um fator que influencia grandemente a corrosão do aço no interior do concreto. Visto isso, o pH é uma característica importante na água de poro, pois a alcalinidade da solução é responsável por passivar o aço e manter essa proteção ao longo do tempo. Além do pH, a condutividade elétrica da solução é outra propriedade muito importante, pois a mesma está relacionada com a mobilidade iônica na solução; quanto maior a condutividade, maior a facilidade de ocorrência de processos corrosivos.

Considerando que a produção de CCUAD consome grande quantidade de cimento Portland, o uso de adições minerais em sua formulação pode ser ambientalmente interessante.

As adições são definidas como “produtos de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características” pela NBR 11172 (ABNT, 1990) que foi confirmada em 2018. As adições podem melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco, a resistência e a durabilidade. As adições minerais podem ser quimicamente ativas e sem atividade química. Tutikian e Dal Molin (2008) definiram as adições quimicamente ativas como os materiais pozolânicos e os materiais cimentantes e as adições sem atividade química como fílers.

Materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes, definidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

O fíler é um material com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland que, quando adicionado aos concretos, atua melhorando suas propriedades, tais como a trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência à fissuração. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), os fílers são materiais que não apresentam reatividade, agindo pelo efeito físico de empacotamento das partículas e formação de pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento.

O fíler melhora a estrutura porosa da matriz, os poros maiores diminuem e a quantidade de poros menores aumenta. Esses efeitos podem contribuir com o aumento da resistência e da durabilidade do concreto (MOOSBERG-BUSTNES; LAGERBLAD; FORSSBERG, 2004).

O comportamento da sílica amorfa em CUAD engloba a reação pozolânica na qual a microsílica incorporada reage com a portlandita ($Ca(OH)_2$, CH) resultante da hidratação da alita e da belita, em função da velocidade de hidratação de cada um deles e o efeito fíler, com o tamanho das partículas de sílica amorfa variando em sub-micrômetros, sendo eficaz para preencher os vazios presentes entre as partículas de cimento e outros materiais constituintes (OERTEL *et al.*, 2014).

A matriz de cimento é significativamente densificada pelo efeito fíler, uma vez que os vazios presentes na matriz podem ser preenchidos com partículas de sílica não dissolvidas (KRAUSS; BUDELMANN, 2011).

As fases do clínquer se hidratam em várias taxas, resultando principalmente na formação das fases *C-S-H*, portlandita, etringita e monossulfato. A mistura de MCS com cimento Portland leva a um sistema mais complicado, onde a hidratação do cimento Portland e a reação hidráulica do MCS ocorrem simultaneamente e também podem influenciar na reatividade um do outro. A reação da maioria dos MCS é mais lenta que a reação das fases de clínquer.

A incorporação de uma grande quantidade de sílica amorfa na mistura de CUAD e sua baixa relação a/c podem promover efeito de enchimento em vez de reação pozolânica. Especialmente durante as primeiras idades (< 24 h), a sílica amorfa deve se comportar de forma mais dominante como um fíler em CUAD, que aumenta as taxas de hidratação por efeito de nucleação, enquanto a reação pozolânica é provavelmente insignificante devido à alcalinidade relativamente baixa da solução de poro neste estágio (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

O pó de vidro, dependendo de sua granulometria, pode ser utilizado na produção do CCUAD considerando tanto suas propriedades como material pozolânico quanto seu efeito de preenchimento.

2.3 Resíduos de vidro

O vidro é um dos materiais mais comumente usados no mundo devido à sua excelente transparência óptica e propriedades mecânicas. Atualmente, cerca de 130 milhões de toneladas de produtos de vidro são produzidos em todo o mundo todos os anos (MOHAJERANI *et al.*, 2017). Estes produtos de vidro têm tempo de serviço limitado e apenas uma pequena parte deles é reciclada.

Só nos EUA foram 11,38 milhões de toneladas e cerca de 60% dos resíduos de vidro foram descartados em aterros em 2017 (EPA, 2020).

O Brasil produz em média 980.000 toneladas de embalagens de vidro por ano, usando cerca de 45% de matéria-prima reciclada na forma de cacos. Parte deles foi gerada como refugo nas fábricas e parte retornou por meio da coleta seletiva. Cerca de 47% das embalagens de vidro foram recicladas em 2011 no Brasil, somando 470.000 t/ano. Desse total, 40% são oriundos da indústria de envase, 40% do mercado difuso, 10% do “canal frio” (bares, restaurantes, hotéis) e 10% do refugo da indústria.

Na Alemanha, o índice de reciclagem em 2010 foi de 87%, correspondendo a 2,6 milhões de toneladas, e em 2009 foi de 81%. Na Suíça o índice foi de 95% e nos EUA 40% (CEMPRE, 2020).

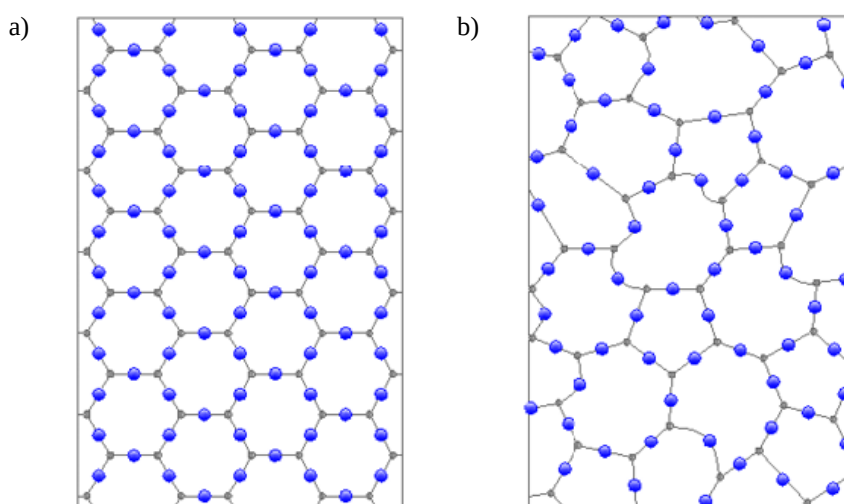
Os vidros mais comuns são produzidos à base de sílica e contêm outros óxidos, especialmente CaO , Na_2O , K_2O e Al_2O_3 , que definem suas propriedades. Os vidros tradicionais pertencem à

classe de materiais cerâmicos e entre suas aplicações estão recipientes, lentes, fibras de vidro, tanto para reforço como em comunicação, janelas e fachadas de prédios tendo como principais características a transparência óptica e a relativa facilidade com a qual podem ser fabricados (CALLISTER JR, 2008).

De acordo com Cascudo (2010), os vidros ou cerâmicas não cristalinas representam, na sua maioria, silicatos amorfos, que do ponto de vista da composição química são semelhantes às cerâmicas cristalinas. Nas várias formas cristalinas de sílica os poliedros estão unidos para formar uma rede tridimensional orientada. Na sílica vítrea os poliedros estão unidos por ligações iônico-covalentes que produzem uma rede tridimensional ao acaso, sem orientação.

Na Figura 5 estão esquematizados os arranjos dos poliedros para sílica e sílica vítrea.

Figura 5 – Representação bidimensional: a) Composto hipotético com arranjo cristalino simétrico e periódico; b) Rede do vidro de mesma composição, em que fica caracterizada a ausência de simetria e periodicidade.



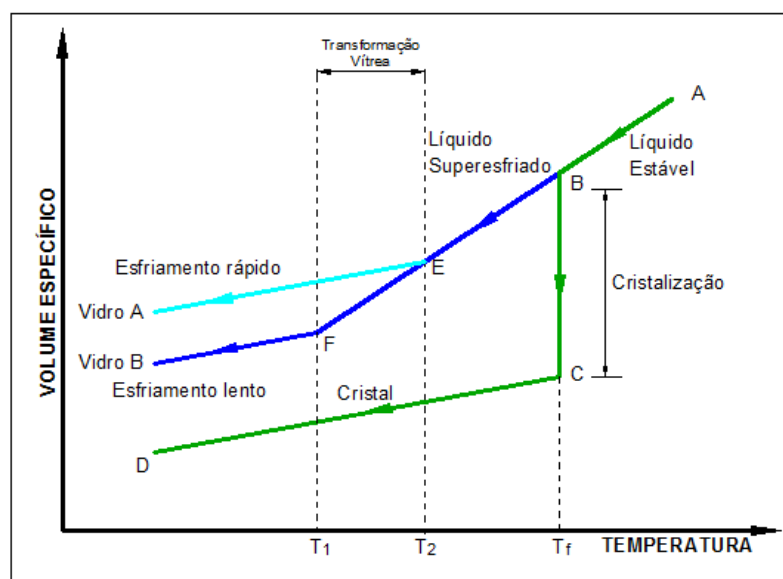
Fonte: Barros (2016).

A Figura 5a mostra que os materiais cristalinos são anisotrópicos, ou seja, suas propriedades dependem significativamente da orientação cristalográfica. Os de estrutura cúbica e os policristalinos tendem a ser isotrópicos, A Figura 5b mostra que os vidros apresentam isotropia e distribuição atômica irregular. Os vidros apresentam semelhanças com dois estados da matéria: líquido no que se refere à estrutura atômica e sólido no que se refere à rigidez dos átomos na estrutura, e apresentam escoamento viscoso, observado em altas pressões (BARROS, 2016).

A maioria dos vidros é obtida pelo método de fusão-resfriamento, que envolve a fusão dos componentes em altas temperaturas e o resfriamento da massa fundida sem a cristalização. Durante o resfriamento o material pode passar por dois processos distintos: o de transição vítrea e o da cristalização. Ou seja, com a diminuição rápida da temperatura, se toda a massa fundida passar pela transição vítrea, haverá a formação de um vidro. Porém, se a diminuição da temperatura for bastante lenta ocorrerá formação de cristais. Em função da temperatura o vidro pode passar pelo estado líquido, apresentar reologia viscosa e possuir comportamento mecânico frágil (quebradiço).

Na Figura 6 apresenta-se um esquema da variação do volume do vidro em função da temperatura e da taxa de resfriamento. O ponto **A** mostra que o material é um líquido estável, com um determinado volume específico que à medida que resfria modifica o arranjo interno dos átomos. No ponto **B**, na temperatura de fusão ou solidificação, sendo a taxa de resfriamento baixa, ocorrerá cristalização em T_f . Nesse caso, faz-se necessário um determinado intervalo de tempo até que as unidades atômicas ou moleculares se orientem e atinjam posições regulares específicas para a formação de um cristal. O volume diminuirá drasticamente em **BC**, sem variação de temperatura devido à perda de calor latente. A diminuição do volume específico compensa a perda de calor em consequência do arranjo atômico. O cristal formado segue então por **CD**, onde o sólido se contrai com a queda de temperatura não mais devido a rearranjos atômicos, mas sim devido à contração térmica. Voltando ao ponto **B**, sendo a taxa de resfriamento suficientemente alta, não haverá tempo para que os átomos ou moléculas se organizem para formar cristais, obtendo um líquido super-resfriado, passando o material do estado líquido de equilíbrio para um estado de metaestabilidade. Ao longo de **BE**, a viscosidade do material aumenta com o decréscimo da temperatura. Para alguns materiais, no ponto **E** a viscosidade é tão alta que impossibilita a movimentação de átomos ou moléculas para rearranjo atômico (BARROS, 2016).

Figura 6 – Esquema da variação do volume em função da temperatura e taxa de resfriamento.



Fonte: Barros (2016).

Pode-se observar transição vítrea em qualquer temperatura abaixo de T_g , sendo que acima desta temperatura tem-se um material viscoso e abaixo um sólido elástico, dependendo da taxa de resfriamento. Uma determinada massa de vidro que sofre resfriamento rápido ocupa maior volume, por ter tido menos chance de se organizar, apresentando então menor densidade, quando comparada ao mesmo vidro submetido a um resfriamento mais lento (BARROS, 2016).

A cadeia produtiva vidreira começa com a extração de minerais para o abastecimento das usinas de base com as matérias-primas do vidro. Na Tabela 2 apresentam-se as principais matérias-primas constituintes do vidro e suas respectivas proporções.

Tabela 2 – Matérias-primas da indústria do vidro.

Principais matérias-primas da indústria de vidro	Composição
Areia	70%
Barrilha	15%
Calcário	10%
Dolomita	2%
Feldspato	2%
Aditivos	Sulfato de sódio, ferro, cobalto, cromo, selênio, magnésio, cálcio

Fonte: Adaptado de CNQ (2015).

De acordo com a CNQ (2015), os insumos utilizados na fabricação de vidro são abundantes e podem ser obtidos sem maiores problemas com exceção da barrilha (carbonato de sódio), usada para reduzir o ponto de fusão do vidro e que corresponde a 60% do custo dos materiais, apesar de representar apenas 12% em peso.

O vidro é composto principalmente por sílica e apresenta baixa perda ao fogo e grandes quantidades de sílica amorfa em sua composição (Tabela 3).

Tabela 3 – Composição química do vidro (% em massa).

Elementos	Guo <i>et al</i> (2020)		Soliman e Tagnit-Hamou (2017)	Abellán-Garcia (2020)
	Sodocálcico	Âmbar	Areia de vidro	Pó de vidro
SiO_2	71 - 75	71,90 - 72,40	73,00	75,47
CaO	10 - 15	-	11,30	9,02
$Na_2O + K_2O$	12 - 16	13,80 - 14,40	13,50	12,40
$CaO + MgO$	-	11,60	12,50	10,99
Al_2O_3	-	1,70 - 1,80	1,50	1,09
SO_2	-	0,12 - 0,14	-	-
Fe_2O_3	-	0,30	0,40	0,79
Cr_2O_2	-	0,01	-	-
Perda ao fogo	-	-	0,60	0,80

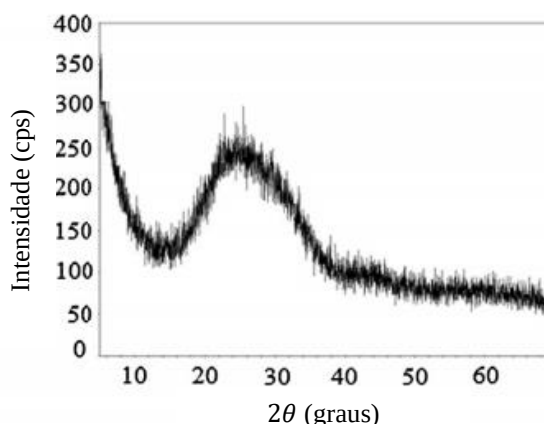
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A composição do vidro e suas características após moagem permitem sua utilização em compósitos cimentícios, tanto como agregado quanto como adição mineral, em função da reatividade do material que depende de sua finura.

2.3.1 Utilização do pó de vidro em compósitos cimentícios

Na Figura 7 observa-se um difratograma de raios X proveniente da análise de pó de vidro e pode-se verificar a presença de halo amorfo, indicando uma estrutura predominantemente amorfa (sílica amorfa), ou seja, reativa do material.

Figura 7 – Difratoograma do pó de vidro.

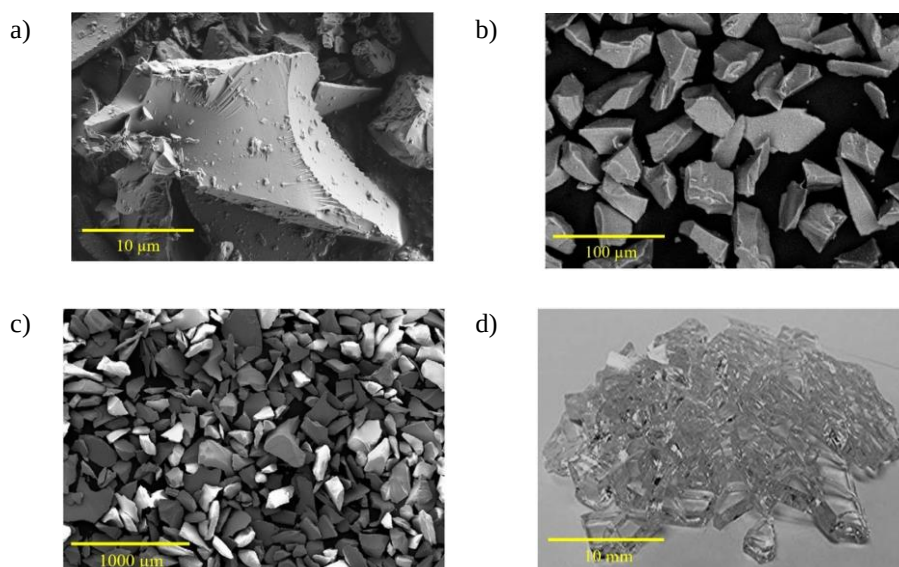


Fonte: Soliman e Tagnit-Hamou (2017).

O pó de vidro apresenta superfície irregular e lisa e o tamanho das suas partículas determina sua pozolanicidade e também modifica a fluidez das matrizes cimentícias; partículas menores aumentam a fluidez e partículas maiores promovem o bloqueio mecânico entre as partículas adjacentes e consequentemente reduzem a fluidez (GUO *et al.*, 2020).

Na Figura 8 observa-se a morfologia de diferentes tamanhos de partículas de vidro.

Figura 8 – Morfologia de diferentes tamanhos de partículas de vidro: a) Imagem do microscópio eletrônico de varredura (MEV) de uma partícula de vidro (tamanho: 20-30 μm); b) Imagem MEV de partículas de vidro (tamanho: 40-80 μm); c) Imagem MEV de partículas de vidro (tamanho: até 800 μm); d) Imagem óptica de partículas de vidro (tamanho: até 10 mm).



Fonte: Guo *et al.* (2020).

Pulverizado, o vidro reciclado é adicionado à mistura de cimento usada para fazer o concreto, que depois é usado na infraestrutura e na construção de calçadas, pistas de skate, bancos de parque e barreiras acústicas. O pó de vidro ajuda a reduzir a quantidade de materiais exigidos pela produção e, da mesma forma, reduz as emissões de gases de efeito estufa gerados. Também

aumenta a resistência mecânica do concreto e clareia sua cor, reduzindo as ilhas de calor urbanas. O concreto com aditivo de pó de vidro também parece ser mais resistente à água, mais durável e resistente aos ciclos de congelamento e descongelamento. O vidro também pode ser utilizado para a produção de concreto reforçado com fibras de ultra alto desempenho, cuja excepcional resistência e durabilidade permitem a utilização de três a quatro vezes menos concreto em diferentes tipos de obras e estruturas (EEQ, 2020).

As crescentes preocupações ambientais com o aumento da escassez de aterros sanitários juntamente com o transporte crescente e o crescimento dos custos de aterro são as forças motrizes que promovem a reciclagem de resíduos de demolição de concreto em concreto novo. A reciclagem de resíduos de construção, incluindo concreto, e os constituintes ligados ao fluxo de resíduos sólidos municipais em aterros sanitários, incluindo vidro que ocorre principalmente como resíduos de vidro de cores misturadas com valor de mercado limitado, são considerados passos importantes para as práticas da construção sustentável. Percebe-se que o vidro residual de cor mista oferece a desejada composição química e reatividade para uso como material cimentício suplementar para aumentar a estabilidade química, características do sistema de poros (refinamento de poros, descontinuidade e preenchimento de poros), resistência à umidade e durabilidade do concreto. Para alcançar esses benefícios, os resíduos de vidro precisam ser moídos para tamanho de partícula em microescala para acelerar suas reações químicas benéficas em concreto (NASSAR; SOROUSHIAN, 2012).

De acordo com Lu e Poon (2019), as cores atraentes do vidro residual são úteis para desenvolver argamassas arquitetônicas com uma aparência esteticamente agradável. Além disso, o vidro residual pulverizado pode ser usado como material cimentício para melhorar as propriedades de durabilidade das argamassas de cimento. A substituição de agregados naturais por resíduos de vidro pode reduzir a retração por secagem e a absorção de água dos blocos de pavimentação. A adição de resíduo de vidro pode melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco e reduzir a retração por secagem do concreto devido às suas propriedades não absorventes e impermeáveis. Por fim, a incorporação de resíduo de vidro pode melhorar a resistência do concreto à altas temperaturas e à penetração de íons cloreto.

A pesquisa de Krstic e Davalos (2019) mostra que, nas últimas décadas, vários esforços foram dirigidos para incorporar resíduos de vidro em misturas de concreto. Uma visão geral da literatura dos últimos 15 anos mostrou que as primeiras aplicações do vidro foram na forma de material granular. O vidro foi triturado e usado como agregado reciclado graúdo e miúdo em concreto para aplicações não estruturais, bem como em outros materiais de construção, como blocos de pavimentação e telhas arquitetônicas. A maioria dos estudos relatou que a substituição de agregados naturais por resíduos de vidro triturado de até 20% aumentou a resistência à compressão, e 10% de substituição foi sugerido como mais eficaz. No entanto, havia preocupações com o potencial efeito negativo do vidro com a reação álcali-sílica, devido ao alto teor de sílica nas partículas de vidro.

No estudo relatado por Omran e Tagnit-Hamou (2016) demonstra-se o desempenho *in situ* de concreto contendo pó de vidro usado como uma substituição parcial de cimento em várias

construções em Quebec-Canadá, entre 2006 e 2012 (Figura 9), incluindo lajes internas e externas e elementos de parede estruturais.

Figura 9 – Construções em Quebec-Canadá, entre 2006 e 2012 utilizando concreto contendo pó de vidro usado como uma substituição parcial de cimento.



Fonte: Adaptado de Omran e Tagnit-Hamou (2016).

Além dos benefícios ambientais, o concreto feito com substituição de 20% de pó de vidro mostrou aumentos na resistência à compressão em 91 dias (7%), resistência à tração em 28 dias (35%) e resistência à flexão em 28 dias (4%) em comparação com misturas de referência sem pó de vidro. Um aumento significativo na resistência à penetração de cloretos (284%, ou seja, 987 vs. 2800 Coulombs) pode ser obtido na utilização do concreto com pó de vidro (OMRAN; TAGNIT-HAMOU, 2016).

Soliman, Omran e Tagnit-Hamou (2017) desenvolveram um novo tipo de concreto de ultra alto desempenho usando resíduos de vidro. O resíduo de vidro em pó foi utilizado em substituição ao cimento nos teores de 22,5% e 25%, com d_{50} de 3 μm e 10 μm . Foram avaliadas $a/c = 0,225$ e 0,250. O novo material exibiu excelentes trabalhabilidade e propriedades reológicas devido à absorção zero das partículas de vidro e densidade de empacotamento para toda a matriz do material. As propriedades mecânicas superiores do concreto de ultra alto desempenho usando resíduos de vidro permitiram o projeto de passarelas com seções reduzidas (uma redução no volume de concreto de aproximadamente 60% em relação ao concreto normal). O melhor desempenho com relação à durabilidade pode contribuir na redução do custo de manutenção e do cobrimento das armaduras do concreto (Figura 10).

Figura 10 – Projeto de passarelas com seções reduzidas.



Fonte: Soliman; Omran; Tagnit-Hamou, (2017).

A construção de duas passarelas na Universidade de Sherbrooke usando concreto de ultra alto desempenho com resíduos de vidro mostra o potencial do material para ser produzido em larga escala e usado em projetos futuros. Concreto de ultra alto desempenho usando resíduos de vidro

pode garantir alta eficiência energética, estruturas ambientalmente amigáveis, acessíveis e resilientes (SOLIMAN; OMRAN; TAGNIT-HAMOU, 2017).

O artigo de revisão de Omran *et al.* (2018) chegou às seguintes conclusões a respeito da utilização do pó de vidro para a produção de concretos:

- O uso de pó de vidro aumenta a trabalhabilidade devido à sua natureza não absorvente e superfície lisa.
- O uso de pó de vidro pode fornecer melhores propriedades mecânicas (resistência à compressão, tração e flexão, bem como módulo de elasticidade) em comparação com a referência sem pó de vidro, especialmente em idades posteriores, fornecidas pela atividade pozolânica do pó de vidro.
- O uso de pó de vidro pode melhorar as características de durabilidade: adsorção, resistência à permeabilidade do íon cloreto, resistência aos ciclos de congelamento-degelo, incrustação de sal de degelo, expansão devido à reação álcali-sílica de prismas de concreto contendo materiais cimentícios ternários, cimento, pó de vidro e sílica ativa ou metacaulim.
- O pó de vidro reduz a penetrabilidade do íon cloreto no concreto em mais de 60%, reduzindo assim o risco de corrosão induzida por cloreto da armadura de aço. Em um sistema binário (pó de vidro e cimento), a reação álcali-sílica pode ser reduzida em cerca de 50%, e em um sistema ternário (pó de vidro, cimento e sílica ativa), a expansão devido à reação álcali-sílica pode ser completamente mitigada.
- O uso de pó de vidro pode reduzir a emissão de gases de efeito estufa (emissões de dióxido de carbono) do concreto associados à produção de cimento e à proteção do meio ambiente.
- O uso de pó de vidro pode economizar os custos relacionados ao processamento e ao descarte dos resíduos de vidro em aterros sanitários, bem como redução do preço do concreto.
- O pó de vidro é um material branco em seu estado natural e pode fornecer coloração esbranquiçada aos produtos de concreto, levando à redução dos gases de efeito estufa.

A revisão feita por Guo *et al.* (2020) tenta esclarecer os debates atuais sobre os efeitos do vidro residual nas propriedades do concreto:

- O efeito do vidro nas propriedades do concreto no estado fresco está associado com o tamanho, teor e morfologia das partículas de vidro. No geral, a fluidez é melhorada pelo uso de partículas de vidro em um teor de cerca de 20% a 30%. Esse limite superior crítico depende do tamanho da partícula de vidro. Para vidro com um diâmetro de até 100 μm , a fluidez aumenta com o tamanho da partícula. No entanto, o uso de partículas maiores de vidro pode reduzir a fluidez.
- Devido à reação pozolânica e efeito de preenchimento, a substituição de até 25% do cimento por pó de vidro provavelmente aumenta a resistência à compressão. No entanto, o uso de vidro em excesso pode reduzir a resistência à compressão devido ao efeito de diluição. A porcentagem crítica de substituição do vidro está associada à relação

água/cimento do concreto, porque a relação água/cimento afeta a quantidade de hidróxido de cálcio que reage com o vidro.

- Substituir agregados miúdos ou de maior granulometria por vidro pode reduzir a resistência à compressão. O efeito do vidro está associado a ambos, tamanho de partícula e porcentagem de substituição.
- O uso de partículas de vidro pode refinar a microestrutura e reduzir a permeabilidade do concreto, portanto, melhorar a resistência ao ataque de sulfato e resistência ao gelo-degelo. Contudo, o uso do vidro pode interferir negativamente na resistência à carbonatação e promover a expansão devido à reação álcali-sílica. A expansão devido à reação álcali-sílica está associada ao tipo, tamanho e teor do vidro. Embora existam várias estratégias para suprimir a expansão devido à reação álcali-sílica, reduzir o tamanho da partícula de vidro é um método direto e eficaz. O tamanho das partículas de vidro abaixo de 425 µm não causou expansão.

As aplicações existentes de concreto incorporando vidro demonstram a viabilidade e os benefícios do uso de vidro em larga escala na infraestrutura civil com maior sustentabilidade, propriedades mecânicas, durabilidade e funcionalidade.

A seleção adequada de resíduos de vidro é essencial para garantir o sucesso dessas aplicações. Recomenda-se selecionar o tipo apropriado, tamanho de partícula e porcentagem de substituição de vidro para alcançar propriedades no estado fresco e endurecido adequadas, bem como durabilidade do concreto.

2.3.2 Reações álcali-sílica

A reação química entre os álcalis presentes no cimento Portland e a sílica contida no agregado forma sílica gel, que não apenas causa fissuras pela reação expansiva, mas também afeta as características mecânicas do concreto e diminui sua vida útil.

A consideração do efeito da sílica contida no agregado sobre essa forma de ataque químico (reação álcali-sílica) requer atenção aos três principais fatores que são necessários para que uma possível reação ocorra: alto teor alcalino na mistura (normalmente fornecida pelo cimento); agregados reativos contendo sílica reativa e água disponível.

A sílica ativa bem dispersa reage com os álcalis disponíveis no concreto fresco, formando silicatos alcalinos. Isso liga os álcalis e deve impedir o ataque a agregados siliciosos reativos. Esse mecanismo reduz o risco de reação álcali-sílica através do combate ao primeiro fator acima. Como a sílica ativa contribui para uma permeabilidade reduzida, a quantidade de água disponível é menor. Esses dois fatores se combinam para reduzir a suscetibilidade do concreto com sílica ativa às reações álcali-sílica.

O tamanho diminuto e a reatividade pozolânica da sílica ativa refinam muito a estrutura dos poros do concreto, aumentando a impermeabilidade, e isso significa que menos água é capaz de passar para dentro e através do concreto. Na reação álcali-sílica é a absorção de água pelo gel higroscópico que causa a expansão prejudicial no concreto.

Assim, uma dosagem controlada de sílica ativa pode impedir os principais fatores que podem levar à reação álcali-sílica em um concreto ou argamassa (LEWIS; FIDJESTØL, 2019).

A grande quantidade de álcalis encontrada no pó de vidro (9% a 21% de Na_2O) também pode desencadear o aparecimento da reação álcali-sílica. Porém, esse fenômeno não é observado em misturas que contenham partículas de vidro com dimensões inferiores a 300 μm , podendo essa manifestação ser mitigada a partir da utilização de pó de vidro com tamanho de partículas inferiores a 100 μm (PAN *et al.*, 2017).

A presença de um material pozolânico como o pó de vidro reduz a quantidade de portlandita disponível na mistura de cimento, diminuindo a probabilidade de manifestação da reação álcali-sílica. A reação pozolânica do pó de vidro aumenta a concentração de alumínio na solução dos compósitos cimentícios. O alumínio participa ativamente na redução da dissolução da sílica reativa dos agregados, evitando o aparecimento da reação álcali-sílica ainda que a concentração de sódio aumente com a utilização do vidro (ZHENG, 2016).

A baixa expansão devido à reação álcali-sílica para o CUAD contendo areia de vidro pode ser atribuída ao diâmetro máximo das partículas utilizadas, menores do que 30 μm . Com esse tamanho de partículas o pó de vidro produz $C - S - H$ por meio da reação pozolânica em vez de gel pela reação álcali-sílica. A baixa expansão também pode ser explicada pela relação água/aglomerantes muito baixa usada para o CUAD, que não fornece umidade suficiente para iniciar a reação (SOLIMAN; TAGNUT-HAMOU, 2017).

Saccani e Bignozzi (2009) investigaram a solubilidade de vários vidros em solução de $NaOH$ 1 N. Eles notaram que o vidro de chumbo-silicato apresentou a maior taxa de dissolução, o vidro de borossilicato é menos solúvel em comparação com o vidro de silicato de chumbo e o vidro de soda cal é o mais estável. Também foi observado que a água saturada com cal Ca^{2+} dificulta a dissolução do vidro, independentemente da composição química. O tamanho das partículas do vidro no experimento variou de 0,075 mm a 2,00 mm.

Du e Tan (2013) investigaram vidro verde, marrom e transparente reciclado com tamanho de partícula de até 0,075 mm e não notaram efeito de expansões deletérias, maiores que o mínimo estabelecido em norma. O vidro transparente apresentou maior expansão, o vidro verde mostrou expansão cerca de três vezes menor que o vidro transparente e o vidro marrom apresentou expansão nove vezes menor que o vidro transparente. A expansão reduzida foi atribuída ao Cr_2O_3 .

Kou e Xing (2012) investigaram as propriedades de CUAD com a relação água/aglomerante igual a 0,15 e pó de vidro com tamanho de partícula menor que 0,045 mm. Segundo os autores, a substituição de cimento por pó de vidro é muito eficaz, porém pó de vidro diminui a resistência à compressão precoce (sete dias) do CUAD. A reatividade do pó de vidro em comparação com a sílica ativa foi muito baixa.

Dos resultados anteriores sabe-se que o tamanho da partícula de vidro é o principal parâmetro que controla os valores de expansão da reação álcali-sílica.

2.3.3 Estado da arte da utilização do pó de vidro em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho

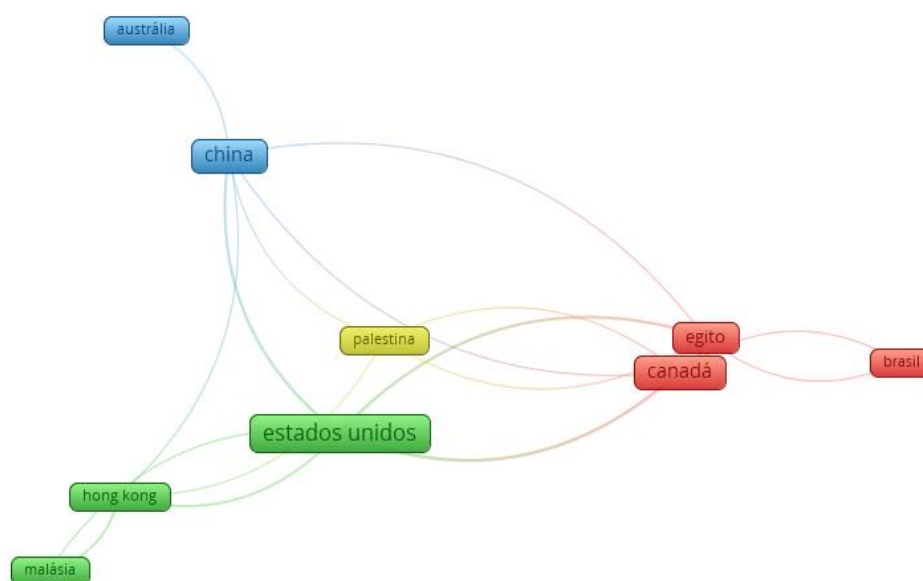
Foi elaborada uma revisão bibliográfica sistemática seguida de uma análise bibliométrica, que é um método planejado para responder uma pergunta específica a partir da coleta, seleção e análise dos estudos disponíveis em bancos de dados. No presente trabalho, a pergunta norteadora é: como estão sendo estudados os CUAD produzidos com o pó de vidro reciclado e sua durabilidade frente à ação de cloretos?

Como parte da revisão sistemática foram escolhidas as bases de dados pertinentes: utilizaram-se o *Science Direct*, *Scopus* e *Research Gate*. A busca nos bancos de dados abrangeu os anos de 2014 a 2021. Foram consideradas as publicações disponíveis até o momento da pesquisa (13/11/2020).

Foram utilizadas as seguintes palavras-chave, incluindo combinações entre elas: UHPC, UHPCC, *waste*, *glass*, *microstructure*, *durability* e *chloride*. Nos bancos de dados Science Direct e Scopus, utilizando o termo UHPC, foram encontrados 1.023 e 1.378 artigos, respectivamente. Combinando os outros termos e analisando os títulos e resumos foram selecionados 37 artigos que mais se aproximavam do tema proposto. Vale salientar que foram avaliados artigos de pesquisa e artigos de revisão nas áreas de engenharia e ciência dos materiais.

Na Figura 11 estão expressas as conexões entre países via citações, cada país com pelo menos dois artigos publicados. Foram listados os 10 países mais citados dentre os selecionados na pesquisa bibliográfica.

Figura 11 – Conexões entre países via citações.

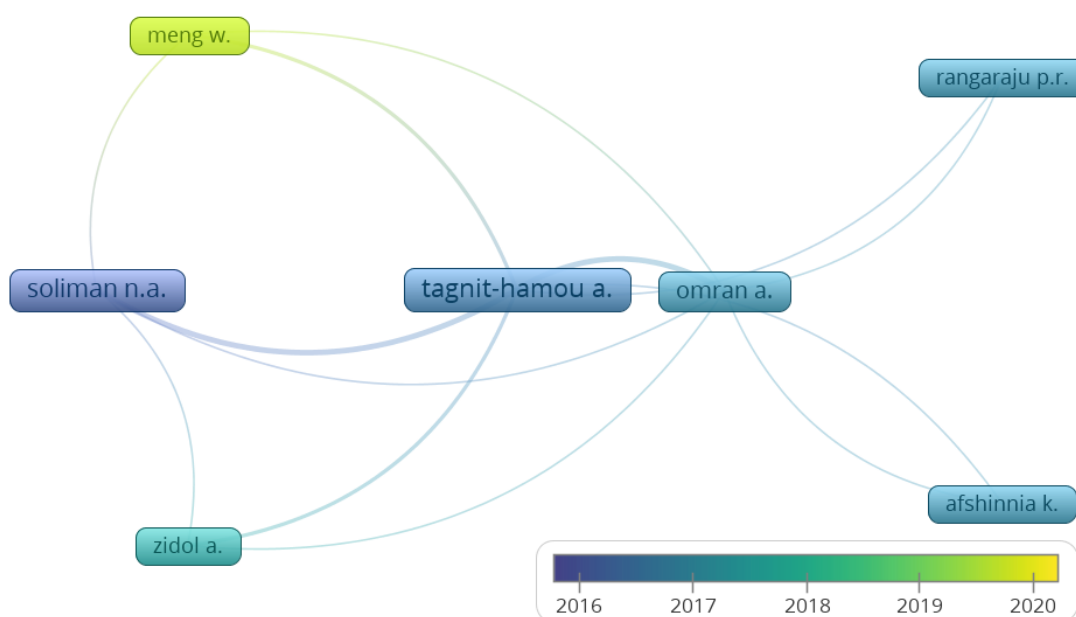


Fonte: Adaptado do software VOSviewer (2020).

O Brasil, por exemplo, está conectado com Egito e Canadá via citações. Os EUA estão conectados com China, Egito, Canadá, Hong Kong e Malásia. Alterando-se o número de publicações o número de conexões também se altera.

Na Figura 12 estão expressas as conexões entre autores via citações, cada autor com pelo menos dois artigos publicados. Foram listados os sete autores mais citados dentre os selecionados na pesquisa bibliográfica.

Figura 12 – Conexões entre autores via citações.



Fonte: Adaptado do software VOSviewer (2020).

No Quadro 1 está apresentada uma sinopse com os artigos selecionados na revisão bibliográfica sobre a utilização do pó de vidro reciclado em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho e questões relativas à durabilidade.

O número de citações de cada artigo apresentado é o número entre colchetes no Quadro 1 obtido pela pesquisa bibliográfica na base de dados *Scopus* realizada no dia 18/11/2020.

Vale salientar que os autores citados neste trabalho vão além dos apresentados no Quadro 1, atendendo a proposta de fazer uma revisão bibliográfica que explicasse e direcionasse os rumos do presente trabalho.

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado.

AUTORES / CITAÇÕES*	TÍTULO	APLICAÇÃO	MATERIAIS	PRINCIPAIS RESULTADOS
(IBRAHIM; MEAWAD, 2018) [8]	<i>Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials</i>	Argamassas; pó de vidro como MCS; atividade pozolânica; reação álcali-agregado.	Cimento; pó de vidro #20 μm	Os resultados da atividade pozolânica de diferentes tipos de vidro sodocálcico são melhores que os do vidro borossilicato, com a formação de <i>CSH</i> . A baixa expansão relacionada à reação álcali-sílica da mistura de vidro/cimento é segura para ser usada na prática.
(PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018) [33]	<i>A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass</i>	Concreto; pó de vidro como MCS; pó de vidro como agregado; durabilidade.	Artigo de revisão	Deve-se observar a variabilidade em termos de composição química do vidro para chegar às misturas de concreto ideais. Mais vidro reciclado pode ser usado para reduzir o impacto ambiental do concreto. A partir de estudos bibliográficos, na maioria das vezes é melhor usar o resíduo de vidro reciclado como substituição parcial do cimento do que como substituição parcial do agregado fino.
(MOSABERPANAH; EREN; TARASSOLY, 2019) [10]	<i>The effect of nanosilica and waste glass powder on mechanical, rheological, and shrinkage properties of UHPC using response surface methodology</i>	Concreto de ultra alto desempenho; adição de nanosílica; adição de pó de vidro.	Cimento; pó de vidro #63 μm ; a/c = 0,2; $f_{c28} = 131 \text{ MPa}$	A adição de nanosílica aumentou a resistência à compressão aos 28 dias e a retração por secagem do CUAD, enquanto a fluidez foi reduzida. A adição de resíduos de vidro em pó aumentou a resistência à compressão aos 28 dias, a retração por secagem e a fluidez do CUAD.
(ELAQRA; RUSTOM, 2018) [15]	<i>Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste</i>	Pasta de cimento; incorporação de pó de vidro; propriedades mecânicas e reológicas.	Cimento; substituição: 0%, 10%, 20%, 25% e 30%; pó de vidro = 75 μm ; a/c = 0,4	O pico de intensidade de CH diminuiu para idades mais avançadas com 10% e 20% de pó de vidro, o que está relacionado à ativação da reação pozolânica, portanto maior resistência à compressão. A maior resistência à compressão foi obtida para 20% de pó de vidro. A incorporação de pó de vidro nas pastas de cimento provou que o pó de vidro participa da formação de mais produtos hidratados pelo consumo de CH para formar mais <i>CSH</i> .
(ZHENG, 2016) [57]	<i>Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction</i>	Pasta e argamassa; pó de vidro como MCS; reação álcali-agregado.	Pó de vidro = 50 μm e 125 a 200 μm	O pó de vidro controla a RAS aumentando a concentração de alumínio na solução de poros para reduzir a dissolução de sílica amorfa de agregados reativos.

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado (continuação).

AUTORES / CITAÇÕES*	TÍTULO	APLICAÇÃO	MATERIAIS	PRINCIPAIS RESULTADOS
(LEE <i>et al.</i> , 2018b) [57]	<i>Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material</i>	Concreto; propriedades mecânicas e de durabilidade; pó de vidro como material cimentício suplementar.	Cimento 394,2 kg/m ³ ; agregados miúdo e graúdo; 20% pó de vidro = 22,8 µm; 20% lodo de vidro = 14,7 µm; a/c = 0,35; pó de vidro = 43 MPa; lodo de vidro = 45 MPa	A resistência à compressão dos concretos em idades iniciais foi mais baixa que do concreto normal, porém em idades posteriores (90 dias) o concreto com lodo de vidro supera o concreto normal. As melhores propriedades mecânicas do concreto com lodo de vidro são atribuídas à maior reatividade pozolânica, maior área superficial, granulometria mais fina e reduzida porosidade total dos concretos resultantes. O DRX e a porosidade dos concretos resultantes confirmaram que o lodo de vidro teve um efeito de micropreenchimento e apresentou reatividade. A reação pozolânica contribuiu significativamente para a melhora do grau de compactação do concreto e o aumento da resistência, permeabilidade e durabilidade do concreto.
(GUO <i>et al.</i> , 2018) [17]	<i>Reduced alkali-silica reaction damage in recycled glass mortar samples with supplementary cementitious materials</i>	Argamassa; pó de vidro como material cimentício suplementar; reação álcali-agregado.	Cimento; agregado de vidro	As amostras de argamassa de vidro tinham suficiente resistência a danos RAA com 30% de cimento substituído por MCS. Além de mitigar a pressão ambiental e reduzir CO ₂ gerado durante a produção de cimento, os resultados demonstram que a substituição de parte do cimento por resíduos de vidro em pó e cinzas pode levar a um material de construção mais ecológico e durável.
(RODIER; SAVASTANO JR, 2018) [9]	<i>Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials</i>	Pasta e argamassa; pó de vidro como material suplementar cimentício.	Pó de vidro plano; 20% em argamassa; 50% em pasta; pó de vidro = 45 µm; a/c = 0,5	De acordo com os resultados do estudo, o resíduo do processo de polimento de vidro plano possui atividade pozolânica e pode ser utilizado para a elaboração de cimento verde e materiais cimentícios ecoeficientes.
(RASHIDIAN-DEZFOULI; AFSHINNIA; RANGARAJU, 2018) [13]	<i>Efficiency of Ground Glass Fiber as a cementitious material, in mitigation of alkali-silica reaction of glass aggregates in mortars and concrete</i>	Pasta e concreto; pó de vidro e fibra de vidro como material cimentício suplementar e como agregado; reação álcali-agregado.	Pó de vidro; fibra de vidro	A fibra de vidro moída em níveis de dosagem de reposição de 30% pode ser utilizada com sucesso para mitigar a expansão de ASR de misturas de argamassas e concretos contendo agregado de vidro.

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado (continuação).

AUTORES / CITAÇÕES*	TÍTULO	APLICAÇÃO	MATERIAIS	PRINCIPAIS RESULTADOS
(KHAN; ABBAS; FARES, 2017) [25]	<i>Review of high and ultra high performance cementitious composites incorporating various combinations of fibers and ultrafine</i>	Compósito cimentício de alto e ultra alto desempenho.	Artigo de revisão	Um compósito cimentício com propriedades mecânicas e de durabilidade superiores deve conter ultrafinos, e ainda assim há nenhum consenso sobre a dosagem mais favorável desses materiais finos; a implementação estrutural do CCUAD talvez inclua: resistência a explosões/impacto, renovação de obras de alvenaria, reforço de concreto armado e condições ambientais adversas.
(ALNAHHAL <i>et al.</i> , 2018) [18]	<i>Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement</i>	Concreto; materiais cimentícios suplementares; altas temperaturas; durabilidade.	Substituição do cimento por vários tipos de resíduo = até 30%	Os resultados revelaram que o uso de 30% de MCS produziu a maior eficiência de resistência à compressão. Além disso, um aumento significativo foi observado para as propriedades relacionadas à durabilidade em idades posteriores. As emissões de CO ₂ foram reduzidas em aproximadamente 29% quando foi incorporado com 30% de MCS.
(VAITKEVIČIUS; ŠERELIS; HILBIG, 2014) [50]	<i>The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete</i>	Concreto de ultra alto desempenho; microestrutura; substituição de sílica ativa e cimento por pó de vidro.	Cimento; pó de quartzo; pó de vidro = 25,80 µm	Pó de vidro com tamanho de partículas inferior ao do cimento apresenta atividade pozolânica benéfica. Os melhores resultados de resistência mecânica se apresentaram em concretos com a combinação de sílica ativa e pó de vidro.
(ALI; DINKHA; HAIDO, 2017) [22]	<i>Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders</i>	Concreto de alto desempenho; propriedades mecânicas; altas temperaturas; substituição do cimento por pó de vidro e por sílica ativa.	Cimento = 934 kg/m ³ ; sílica ativa = 25%; pó de vidro = 25%; a/c = 0,225	A degradação das propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho submetidos a altas temperaturas com a utilização de pó de vidro é menor que em concretos com sílica ativa.
(SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016) [63]	<i>Development of ultra high performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete</i>	Concreto de ultra alto desempenho; substituição de cimento por pó de vidro.	Cimento = 807 kg/m ³ ; substituição: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%; a/c = 0,189	Concreto de ultra alto desempenho com pó de vidro apresenta características aprimoradas quanto à absorção de água devido a sua superfície lisa. A trabalhabilidade é aprimorada em proporções maiores de pó de vidro. Em termos de resistência à compressão do concreto, a substituição do cimento em 20% por pó de vidro apresentou melhores resultados, embora a substituição de 50% seja a melhor proporção em relação à fluidez.

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado (continuação).

AUTORES / CITAÇÕES*	TÍTULO	APLICAÇÃO	MATERIAIS	PRINCIPAIS RESULTADOS
(PAN <i>et al.</i> , 2017) [22]	<i>High temperature performance of mortars containing fine glass powders</i>	Argamassas; altas temperaturas; substituição de cimento por pó de vidro.	Substituição: 5%, 10% e 20%; pó de vidro = 45 μ m e 60 μ m	A substituição do cimento por pó de vidro causa dois efeitos antagônicos, o pozolânico e o de diluição, efeitos positivos e negativos, respectivamente. A utilização de pó de vidro nas argamassas submetidas a altas temperaturas reduziu a condutividade térmica, sendo assim a transferência de calor foi mais lenta no ambiente interno das amostras.
(HARBEC <i>et al.</i> , 2017) [14]	<i>Mechanical and durability properties of high performance glass fume concrete and mortars</i>	Concreto e argamassa; penetração de cloretos; reação álcali-agregado.	Pó de vidro como substituição de sílica ativa: 10%	Existe o ganho acelerado de resistência à compressão em idades iniciais para materiais cimentícios com pó de vidro devido ao seu conteúdo alcalino e efeito de nucleação. Para idade de 28 dias, a resistência à compressão de materiais cimentícios com pó de vidro é inferior aos com sílica ativa, contudo essa diferença é minimamente reduzida em idades superiores a 91 dias. Em uma idade precoce, o pó de vidro produziu propriedades de durabilidade mais baixas do que com sílica ativa, devido à reatividade pozolânica mais lenta do pó de vidro.
(SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2017) [43]	<i>Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap</i>	Concreto de ultra alto desempenho; empacotamento das partículas.	Pó de vidro como substituição de sílica ativa: 30% e 50%	Devido à baixa absorção de água pelo vidro, a trabalhabilidade pode ser aprimorada a partir da utilização da mesma relação a/c. A substituição de 70% de sílica ativa por pó de vidro apresentou resistência à compressão equivalente a concretos confeccionados puramente com sílica ativa.
(NASSAR; SOROUSHIAN, 2012) [160]	<i>Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement</i>	Concreto; substituição de cimento por pó de vidro.	Cimento; agregado graúdo; pó de vidro = 13 μ m; a/c = 0,38 e 0,50; substituição: 20%	O pó de vidro finamente moído sofre reação pozolânica que resulta na melhoria da microestrutura do concreto com agregado reciclado por meio da melhoria na qualidade da argamassa/pasta remanescente fixada à superfície do agregado reciclado que, subsequentemente, forma a interface entre o agregado reciclado e nova argamassa com agregado reciclado. O uso de resíduos de vidro resultou em características de durabilidade aprimoradas, como adsorção e permeabilidade de cloreto através da melhoria nas características do sistema de poros, efeito de preenchimento das partículas de vidro e conversão de <i>CH</i> em <i>C – S – H</i> . Aumento significativo na resistência em idade avançada é alcançado através da formação de microestrutura mais densa e menos permeável. A melhora na resistência aos 56 dias fornece uma medida indireta da atividade pozolânica dos resíduos de vidro moído.

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado (continuação).

AUTORES / CITAÇÕES*	TÍTULO	APLICAÇÃO	MATERIAIS	PRINCIPAIS RESULTADOS
(LU; POON, 2019) [6]	<i>Recycling of waste glass in construction materials</i>	Argamassas e concretos; adição e substituição de cimento por pó de vidro.	Artigo de revisão	O resíduo de vidro em pó pode ser usado como um material cimentício para melhorar as propriedades de durabilidade das argamassas de cimento. A adição de pó de vidro pode melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco e reduzir a retração por secagem do concreto devido às suas propriedades não absorventes e impermeáveis. A incorporação de pó de vidro pode melhorar a resistência do concreto de vidro a altas temperaturas e à penetração de íons cloreto.
(KRSTIC; DAVALOS, 2019) [2]	<i>Field application of recycled glass pozzolan for concrete</i>	Concreto; resistência mecânica.	Pozolana de vidro: 20%, 30% e 40%; cinzas volantes: 30%; escória: 40%	As misturas com 30% de pó de vidro e 30% de cinza volante desenvolveram forças comparáveis aos 90 dias. Entre as três misturas com vidro pozolana, a mistura com menor teor de vidro, 20%, atingiu maior resistência inicial aos 28 dias, mas devido à maior reatividade pozolânica tanto as misturas com 30% e 40% mostraram maiores resistências aos 56 dias, e todos os três alcançaram valores comparáveis aos 90 dias.
(GUO <i>et al.</i> , 2020) [2]	<i>New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure</i>	Concreto; propriedades no estado fresco; resistência à compressão; durabilidade; propriedades térmicas; propriedades elétricas; microestrutura.	Artigo de revisão	A fluidez do concreto é melhorada pelo uso de partículas de vidro em um teor de até 20% a 30%. Esse limite superior crítico depende do tamanho da partícula de vidro. Para vidro com um diâmetro de até 100 mm, a fluidez aumenta com o tamanho da partícula. O uso de partículas grossas de vidro pode reduzir a fluidez. Devido à reação pozolânica e efeito de preenchimento, substituindo até 25% cimento com pó de vidro aumenta a resistência à compressão. O uso de vidro em excesso pode reduzir a resistência à compressão devido ao efeito de diluição. O vidro pode degradar a resistência à carbonatação e promover RAS. Reduzir o tamanho da partícula de vidro é um método direto e eficaz para mitigar os efeitos da RAS. O uso de vidro reduziu a condutividade térmica e aumentou a condutividade do concreto.
(OMRAN; TAGNIT-HAMOU, 2016) [64]	<i>Performance of glass-powder concrete in field applications</i>	Concreto; substituição de cimento por pó de vidro; resistência mecânica; durabilidade.	Cimento; pó de vidro: substituição 10% e 20%	Boas características mecânicas especialmente em idades posteriores, fornecidas pela atividade pozolânica do pó de vidro. O pó de vidro reduz a penetração do íon cloreto no concreto em aproximadamente um terço, assim reduzindo o risco de corrosão do aço induzida por cloreto.

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado (continuação).

AUTORES / CITAÇÕES*	TÍTULO	APLICAÇÃO	MATERIAIS	PRINCIPAIS RESULTADOS
(SOLIMAN; OMRAN; TAGNIT-HAMOU, 2017) [11]	<i>Laboratory Characterization and Field Application of Novel Ultra-High Performance Glass Concrete</i>	Concreto de ultra alto desempenho; substituição de cimento por pó de vidro; resistência mecânica; durabilidade.	Cimento; pó de vidro; substituição: 22,5% e 25% a/c = 0,225 e 0,250	O material exibiu excelente trabalhabilidade e propriedades reológicas devido à absorção zero das partículas de vidro e densidade de empacotamento otimizada para toda a matriz do material. O pó de vidro melhorou muito a microestrutura do concreto, que não só produziu propriedades mecânicas superiores, mas também levou a propriedades de durabilidade superiores. A mecânica e a durabilidade características do concreto são comparáveis ou mesmo muito melhores do que aquelas obtidas a partir de concreto convencional.
(OMRAN <i>et al.</i> , 2018) [6]	<i>Performance of Ground-Glass Pozzolan as a Cementitious Material: A review</i>	Concreto; substituição de cimento por pó de vidro.	Artigo de revisão	A pozolana de vidro fosco obtida pela trituração do vidro residual misto até uma finura semelhante à do cimento pode atuar como MCS por se tratar de um material amorfo e pozolânico. O pó de vidro mostrou desempenho promissor em misturas de argamassa e concreto em laboratório e em aplicações de campo em larga escala.
(MO; GAO; SU, 2020) [1]	<i>Mechanical performances and microstructures of metakaolin contained UHPC matrix under steam curing conditions</i>	Concreto de ultra alto desempenho; propriedades mecânicas; durabilidade.	Cimento; metacaulim; substituição: 0% 5%, 10%, 15% e 20% a/c = 0,2	A cura térmica a 55 °C ou 90 °C por 24 h ou 48 h pode aumentar notavelmente a resistência à compressão do concreto em idades iniciais, tornando-a equivalente ao nível das amostras curadas após 28 dias de imersão em água a 20 °C. No entanto, o crescimento da resistência à compressão degrada significativamente após o final da cura térmica com o tempo.
(SOHAIL <i>et al.</i> , 2021) [0]	<i>Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes</i>	Concreto de alto e ultra alto desempenho; durabilidade.	Cimento; sílica ativa; cinza volante	CAD e CUAD podem ser uma solução viável e prática para os problemas de durabilidade encontrados em regiões climáticas adversas. Esses materiais cimentícios podem ser fabricados usando materiais comumente disponíveis e métodos convencionais de mistura e cura para atingir resistências à compressão de 160 MPa.
(ABDULKAREEM <i>et al.</i> , 2018) [17]	<i>Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC</i>	Concreto de alto e ultra alto desempenho; trabalhabilidade; resistência mecânica.	Cimento; escória de alto-forno; sílica ativa	A forma da lâmina e a alta velocidade de mistura resultam em concreto trabalhável e homogêneo apesar da baixa relação água/aglutinante (0,14) e curta duração de mistura (3,5 min). A sílica ativa cinza melhora a resistência à compressão do CUAD em idade precoce, em comparação com o branco. Esse último garante melhor trabalhabilidade. A substituição de 30% do cimento pela escória de alto-forno A melhora sua densidade de empacotamento, aumenta sua trabalhabilidade, acelera sua duração de pega e promove a hidratação do cimento, o que aumenta a resistência à compressão do CUAD em idade precoce.

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado (continuação).

AUTORES / CITAÇÕES*	TÍTULO	APLICAÇÃO	MATERIAIS	PRINCIPAIS RESULTADOS
(ZHOU; QIAO, 2018) [14]	<i>Durability of ultra-high performance concrete in tension under cold weather conditions</i>	Concreto de ultra alto desempenho; durabilidade.	Cimento; sílica ativa; a/c = 0,18	CUAD é caracterizado como um material cimentício muito durável, mas não intrinsecamente invencível. Congelamento prolongado e ações de descongelamento ainda levam à deterioração do material quanto ao módulo de elasticidade, resistência à tração e absorção de energia.
(MAYHOUB <i>et al.</i> , 2020) [3]	<i>The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: a review</i>	Concreto de pó reativo (CPR).	Artigo de revisão	Melhoria da microestrutura, eliminação de agregados graúdos, empacotamento de partículas e aumento da tenacidade são os principais princípios do desenvolvimento de CPR que resultam em boas propriedades mecânicas e de durabilidade para a matriz. O CPR requer alto teor de cimento, e materiais pozolânicos devem ser usados para obter a reatividade necessária. A porcentagem de aumento na resistência à compressão pode chegar a 33% quando se usa cinza volante como substituição de cimento de 40% sob cura em autoclave. A resistência à compressão pode aumentar 45% quando se utiliza cinza de casca de arroz com 30% de substituição de sílica ativa sob a cura térmica.
(KHAYAT <i>et al.</i> , 2019) [14]	<i>Rheological properties of ultra-high performance concrete: An overview</i>	Concreto de ultra alto desempenho; propriedades reológicas.	Artigo de revisão	A composição química, distribuição de tamanho de partícula, conteúdo, formato de partícula, textura de superfície e área de superfície específica dos materiais aglomerantes, bem como a relação água/aglomerantes, podem ter um efeito significativo nas propriedades reológicas. Para areia, a gradação e o tamanho máximo de partícula desempenham papéis críticos.
(LI; AFSHINNIA; RANGARAJU, 2016) [18]	<i>Effect of alkali content of cement on properties of high performance cementitious mortar</i>	Argamassa cimentícia de alto desempenho.	Cimento; cinza volante; areia reativa; a/c = 0,2	O aumento no teor de álcali do cimento reduziu a trabalhabilidade da argamassa. No entanto, a redução da trabalhabilidade pode ser restaurada aumentando a dosagem de superplastificante ou substituindo o cimento por um MCS. O aumento no teor de álcali do cimento resultou em um aumento no tempo de pega final da argamassa, com ou sem cinza volante. Quando o teor alcalino do cimento era menos de 0,60% de Na ₂ O, a resistência à compressão não foi significativamente afetada. O maior teor de álcali do cimento aumentou a retração por secagem e a permeabilidade ao cloreto.

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado (continuação).

AUTORES / CITAÇÕES*	TÍTULO	APLICAÇÃO	MATERIAIS	PRINCIPAIS RESULTADOS
(SHAIKH <i>et al.</i> , 2020) [12]	<i>Performance evaluation of ultra-high performance fibre reinforced concrete: a review</i>	Concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras.	Artigo de revisão	As melhores características mecânicas na maioria dos concretos foram obtidas com a relação água/cimento inferior a 0,20, 3% de fibra de aço em volume, comprimento da fibra de aço de cerca de 13 mm com gancho de extremidade. As maiores características mecânicas foram obtidas com os corpos de prova expostos à cura térmica a 90 °C. O desempenho à compressão das amostras que foram expostas à cura térmica foi maior do que das expostas à cura com água. A aplicação de materiais cimentícios suplementares para substituição do cimento, bem como sílica ativa, pode diminuir o custo de materiais e a pegada de carbono desse material. Também é mostrado que concreto incorporando quantidade adequada de materiais cimentícios complementares poderia atingir propriedades mecânicas que são ligeiramente inferiores às do concreto convencional.
(JUHART <i>et al.</i> , 2019) [3]	<i>Functional and environmental performance optimization of Portland cement-based materials by combined mineral fillers</i>	Concretos; empacotamento de partículas.	Micro, eco e macro fílers	Apenas enchimentos inertes foram testados. No entanto, o método é também adequado para misturas que contenham MCS hidráulicos e pozolânicos ativos. Pastas otimizadas com micro, eco e macro fílers devidamente selecionados, bem como hidraulicamente eficazes, são propensas a reduzir o impacto ambiental do concreto. Além disso, essas pastas ecoeficientes são susceptíveis de melhorar o desempenho do concreto em termos de trabalhabilidade e desempenho ambiental em comparação com o concreto normal.
(RONG <i>et al.</i> , 2015) [106]	<i>Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites</i>	Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho; propriedades mecânicas; microestrutura.	Cimento; cinza volante; nanosílica	Quando o teor de nano-SiO ₂ era de 3%, a resistência à compressão e flexão da argamassa atingiu o máximo. Com a adição de 5% as propriedades mecânicas diminuíram ligeiramente devido à nucleação de partículas de nano-SiO ₂ . A adição de partículas de nano-SiO ₂ alterou também o processo de hidratação. Havia grandes quantidades de cimento não hidratado nos materiais à base de cimento por causa da baixa relação água/aglutinante. Amostra com partículas de nano-SiO ₂ tinha menor conteúdo de Ca(OH) ₂ em comparação com as amostras de referência. No entanto, a adição de nano-SiO ₂ a 5% teve efeito negativo na microestrutura dos compósitos cimentícios.

Quadro 1 – Sinopse das pesquisas relacionadas ao pó de vidro reciclado (continuação).

AUTORES / CITAÇÕES*	TÍTULO	APLICAÇÃO	MATERIAIS	PRINCIPAIS RESULTADOS
(KOUTNY <i>et al.</i> , 2018) [10]	<i>Rheological behaviour of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume</i>	Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho; reologia.	Cimento; sílica ativa: substituição 15%, 20% e 25%	A superfície específica do cimento em argamassas de CCUAD com altos teores de sílica ativa não é parâmetro que afeta diretamente a tensão de escoamento da argamassa. Ao lado da gradação e da fração de volume de sólidos, a composição mineralógica e o teor de C_3A parecem ser um parâmetro fundamental responsável pela trabalhabilidade do material no estado fresco.
(RONG <i>et al.</i> , 2014) [49]	<i>Effect of silica fume and fly ash on hydration and microstructure evolution of cement based composites at low water-binder ratios</i>	Compósitos baseados em cimento; hidratação; microestrutura.	Cimento; Cinza volante: substituição 35%; sílica ativa: substituição 10%; a/c = 0,17	A adição de sílica ativa alterou o processo de hidratação após o início da hidratação e a cinza volante retardou a hidratação, principalmente nos períodos dormentes e de aceleração. Quando sílica ativa e cinzas volantes eram incorporadas juntas no cimento, o resultado da hidratação do cimento foi significativamente diferente da hidratação do cimento a uma a/c mais alta ($> 0,35$), presumivelmente devido ao fato de que as partículas de sílica ativa dominam a hidratação a uma a/c muito baixa. Havia grandes quantidades de cimento não hidratado nos materiais à base de cimento por causa da baixa a/c. A porosidade e o diâmetro médio dos poros diminuíram com o aumento do período de cura.
(LI <i>et al.</i> , 2020) [1]	<i>Durability of ultra-high performance concrete: a review</i>	Concreto de ultra alto desempenho; durabilidade.	Artigo de revisão	CUAD exibiu resistência à permeabilidade da água superior à de íons cloreto, carbonatação e outros ataques químicos devido à estrutura densa. O coeficiente de difusão de íons cloreto encontrado foi pelo menos uma ordem de magnitude menor que o de concreto de alto desempenho. Carbonatação raramente acontece em CUAD sob cura úmida ou térmica, após 1 a 3 anos de exposição. Em contraste, os produtos de carbonatação recém-formados podem preencher parcial ou completamente microfissuras em CUAD para recuperar a resistência mecânica.

Nota: *Número de citações do artigo representado pelo número entre colchetes obtido pela pesquisa bibliográfica na base de dados *Scopus* realizada no dia 18/11/2020.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Segundo Patel *et al.* (2019), as partículas de vidro com dimensões abaixo de 75 μm que substituem cimento até 10% a 25% dão resultados satisfatórios na produção de pasta e argamassa. Eles estudaram o efeito da diminuição do tamanho da partícula de vidro em pó (12 μm) sobre o estado fresco e endurecido da pasta e da argamassa, em função da substituição em várias dosagens, com relação ao valor agregado destes em redução de impacto ambiental. Os resultados de um estudo de impacto ambiental indicaram que 20% de substituição é viável para o pó de vidro com 63 μm de diâmetro, e para diâmetro de 75 μm é limitado a valores de 10% a 15%.

He *et al.* (2019) estudaram o uso do pó de vidro como um material suplementar de cimento para produzir concreto a fim de efetivamente economizar recursos e resolver problemas de poluição ambiental. O efeito do pó de vidro em substituir parcialmente o cimento, em massa, na resistência à compressão, módulo de elasticidade e fluência do concreto foi estudado experimentalmente, e a microestrutura interna também foi determinada. Os resultados mostram que o uso de pó de vidro reduz as resistências à compressão e módulo de elasticidade nas primeiras idades, mas o uso de teor inferior a 20% aumenta as resistências à compressão e módulo de elasticidade em idades mais avançadas.

O efeito do pó de vidro nas propriedades mecânicas dos materiais à base de cimento foi estudado por vários autores. A maioria dos resultados leva à conclusão de que a resistência à compressão dos materiais à base de cimento diminui com o aumento do teor de pó de vidro (IDIR *et al.*, 2011; SHAYAN; XU, 2004; LI *et al.*, 2019). No entanto, exceções foram observadas em alguns estudos (DU; TAN, 2017; GAO *et al.*, 2020). Esta diferença depende da idade de cura e do tamanho de partícula de pó de vidro. Além disso, a incorporação de pó de vidro também pode aumentar a resistência à carbonatação, resistência ao cloreto, resistência ao ácido sulfúrico e resistência ao gelo/degelo de produtos à base de materiais cimentícios (OMRAN *et al.*, 2017; SIAD *et al.*, 2016; LEE *et al.*, 2018b; SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016).

Algumas pesquisas focam na aplicação do pó de vidro reciclado como pozolana em matrizes cimentícias sendo necessária a moagem fina do material para conferir reatividade ao vidro. Nessas condições o pó de vidro pode ser utilizado em substituição parcial do cimento ou da sílica ativa. Outras utilizam o pó de vidro como agregado miúdo ou fíler na produção de concretos e argamassas. Outras ainda avaliam a durabilidade dos compósitos cimentícios considerando ataques por sulfatos, carbonatação ou ataque por cloretos.

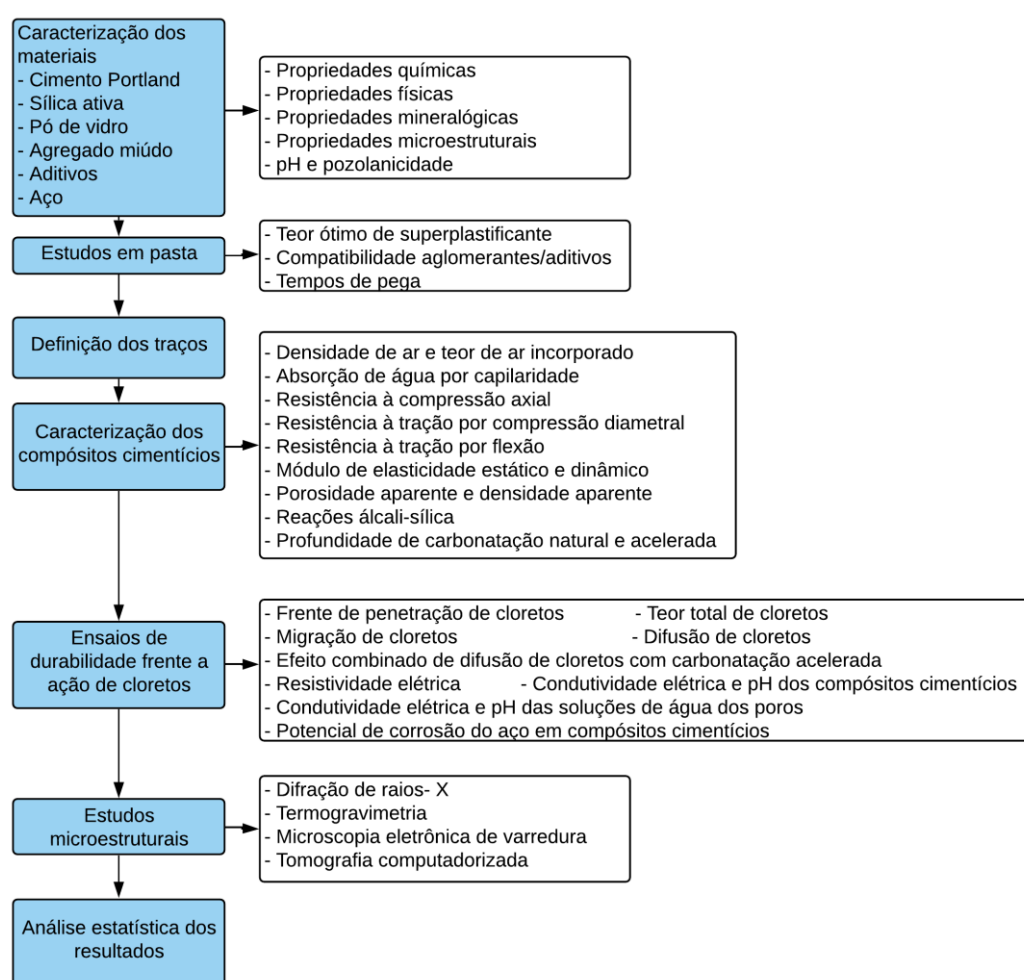
Dentro desse contexto esse trabalho utilizou o pó de vidro reciclado finamente moído em substituição parcial do cimento Portland. Este estudo foi realizado em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com o intuito de avaliar o efeito da incorporação de pó de vidro reciclado em vários teores na durabilidade do material frente ao ataque de cloretos.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O método de trabalho apresentado neste capítulo foi elaborado a partir da necessidade de definir as dosagens de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho (CCUAD), com e sem incorporação de pó de vidro em substituição parcial do cimento Portland, visando à avaliação do seu comportamento mecânico e durabilidade frente à ação de cloretos.

No organograma apresentado na Figura 13 descrevem-se as sete etapas do programa experimental e as avaliações realizadas em cada etapa, sendo elas: caracterização dos materiais, estudos em pasta, definição dos traços, caracterização dos compósitos cimentícios, ensaios de durabilidade frente à ação de cloretos, estudos microestruturais e análise estatística dos resultados.

Figura 13 – Etapas do programa experimental.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A presente pesquisa com compósitos cimentícios de ultra alto desempenho e incorporação de pó de vidro reciclado é continuidade de estudos recentes realizados por pesquisadores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), *campus* de Caraguatatuba/SP (SALVADOR FILHO *et al.*, 2017), que analisaram as propriedades das

presentes em cada material (qualitativa e quantitativamente). A preparação das amostras foi feita por fusão alcalina; britagem, moagem e homogeneização; prensagem em leito de ácido bórico. Os métodos utilizados foram espectrometria por plasma com emissão óptica; espectrometria por fluorescência de raios X e gravimetria. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Poços de Caldas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em Poços de Caldas/MG. Os átomos da amostra são excitados através da aplicação de uma fonte de radiação de elevada energia que possibilita a entrada de fótons de raios X que atingem os elétrons. Nesse processo ocorre liberação de energia (fluorescência) desprendida na forma de fótons de raios X.

Para análise das características físicas do cimento, sílica ativa e pó de vidro utilizados, foram realizados os ensaios de granulometria e superfície específica. Com a distribuição granulométrica dos materiais, foi possível avaliar o empacotamento dos materiais utilizados na confecção dos compósitos cimentícios.

As análises de granulometria a laser dos materiais finos foram realizadas no granulômetro a laser *FRITSCH*, modelo *ANALYSETTE 22 NanoTec* (Figura 15), que utiliza a difração de lasers para determinar o tamanho das partículas pela teoria de cálculo de Mie, no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Para cada amostra ensaiada, foi colocada uma pequena quantidade do material em água potável em temperatura ambiente junto a um dispersante químico de polimetacrilato de amônio *Darvan C-N* da *Vanderbilt*. Para a sílica ativa foi preparada uma solução com três partes de sílica ativa para cada parte de água potável à temperatura ambiente, com teor de 1% de dispersante de polimetacrilato de amônio em relação à água. O material foi desaglomerado mecanicamente em um moinho de bolas com esferas de alumina por 1,5 h. O procedimento foi necessário para desaglomerar as partículas maiores de sílica ativa e verificar a real granulometria do material.

Figura 15 – Equipamento para a realização do ensaio de granulometria.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Um feixe de laser é disparado sobre a amostra dispersa, e o tamanho das partículas é determinado pela variação angular dos raios.

Os ensaios de massa específica e índice de finura foram realizados no LMC do Departamento de Engenharia Civil (DECiv) da UFSCar. A determinação das massas específicas foi realizada de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015) e o índice de finura foi determinado de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2013). As superfícies específicas foram determinadas pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017) no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em São Paulo/SP.

Para a análise mineralógica foi utilizada a difratometria de raios X (DRX) dos materiais, realizada no laboratório do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (IFSC/USP) em São Carlos/SP, com o objetivo de caracterizar as fases mineralógicas ou a estrutura cristalina presente em cada material. Foi utilizada uma unidade de raios X: *Rigaku Rotaflex*, modelo: RU200B; $2\theta/\theta$, varredura normal de 3° a 120° ; passo 0.0200/segundo; varredura de $2^\circ/\text{min}$; tensão de 40 kV e 60 mA, ânodo de cobre. Um sólido cristalino é constituído por um arranjo de átomos ordenados com regularidade periódica numa rede cristalina. Um feixe de raios X monocromáticos incide sobre os átomos; os elétrons absorvem a radiação, vibram e emitem ondas com a mesma frequência e em diversas direções. A difração é a superposição dessas ondas; a diferença na distância percorrida por duas ondas idênticas difratadas resulta em um número inteiro de comprimento de onda, que define as condições de difração dos raios X pela lei de Bragg, por meio da qual são obtidas informações das distâncias interplanares dos planos cristalográficos e a intensidade da reflexão, possibilitando, assim, caracterizar os cristais.

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada nas amostras em pó, com o objetivo de observar as características da morfologia e microestrutura das partículas e identificar os elementos químicos que as compõem.

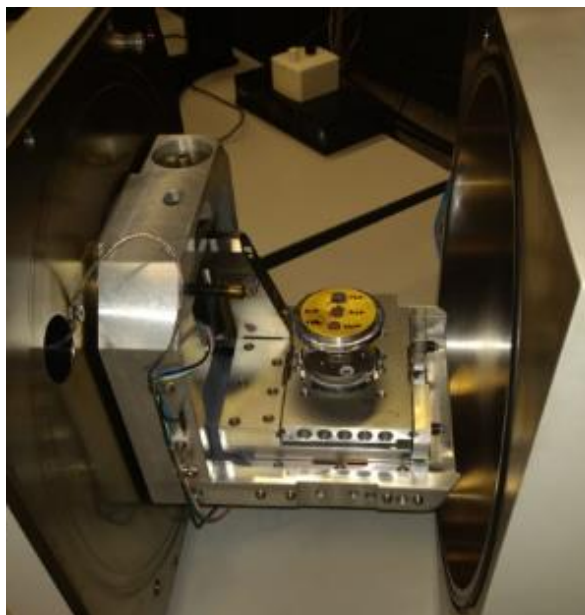
As análises de MEV podem fornecer informações sobre a morfologia e identificação dos elementos químicos de uma amostra sólida

. É um dos equipamentos mais versáteis disponíveis para a análise de características microestruturais de objetos sólidos. As análises foram realizadas no equipamento *Inspect F50* da *FEI Company* no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Materiais da EESC/USP.

A microscopia eletrônica de varredura permite aumentos da ordem de 30.000 vezes. Um feixe de elétrons incide sobre a amostra promovendo interações físicas que podem resultar no espalhamento dos elétrons. É possível obter imagens da topografia da amostra em alta resolução, e a partir de imagens de menor resolução podem-se identificar as diferenças na composição química das fases pelo maior ou menor brilho nas imagens.

Na Figura 16 pode ser observado o equipamento utilizado, aberto, para possibilitar a visualização das amostras colocadas.

Figura 16 – Equipamento utilizado para realização da microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os detectores de energia dispersiva presentes no equipamento de MEV realizam a análise química das regiões de interesse nas amostras.

3.1.1 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland CP V ARI de alta resistência inicial, fabricado pela Holcim do Brasil S/A. O cimento foi especificado de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018).

Na Tabela 4 podem ser observadas as características físicas do cimento CP V utilizado na pesquisa.

Tabela 4 - Características físicas do cimento CP V.

Propriedades físicas	Valores obtidos	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)
Massa específica (NBR 16372 (ABNT, 2015))*	3,16 g/cm ³	***
Início de pega (NBR 16607 (ABNT, 2018))*	135 min	> 120 min
Fim de pega (NBR 16607 (ABNT, 2018))*	210 min	< 600 min
Água para pasta de consistência normal (NBR 16606 (ABNT, 2018))	30%	***
Finura retido 75 µm (NBR 11579 (ABNT, 2013))*	0,10%	< 6,0%
Superfície específica (NBR 16605 (ABNT, 2017))**	665 m ² /kg	>300 m ² /kg
Resistência à compressão (f_{cj})	1 dia	27,5 MPa
	3 dias	42,0 MPa
	7 dias	48,7 MPa
	28 dias	52,2 MPa

Notas:

* Ensaios realizados no Laboratório LMC da UFSCar

** Ensaio realizado no IPT/SP

*** Valores limites não especificados pela NBR 16697 (ABNT, 2018)

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Tabela 5 podem ser observadas as características químicas do cimento CP V utilizado na pesquisa.

Tabela 5 – Características químicas do cimento CP V.

Componentes	Valores obtidos (% em massa)	NBR 16697 (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	4,05	< 4,5%
Anidro silício (SiO_2)	23	*
Óxido de cálcio (CaO)	61,4	*
Óxido de estrôncio (SrO)	0,27	< 6,5%
Óxido férrico (Fe_2O_3)	2,49	*
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	4,31	*
Anidrido sulfúrico (SO_3)	2,97	< 3,5%
Óxido de tório (ThO_2)	< 0,01	*
Óxido de sódio (Na_2O)	0,74	-
Óxido de potássio (K_2O)	1,74	*
Equivalente alcalino (em Na_2O)	1,88	*
Óxido de urânio (U_3O_2)	< 0,01	*
Óxido de fósforo (P_2O_5)	0,52	-
Cloreto (Cl^-)	0,12	-

* A NBR 16697 (ABNT, 2018) não estabelece valores limites

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

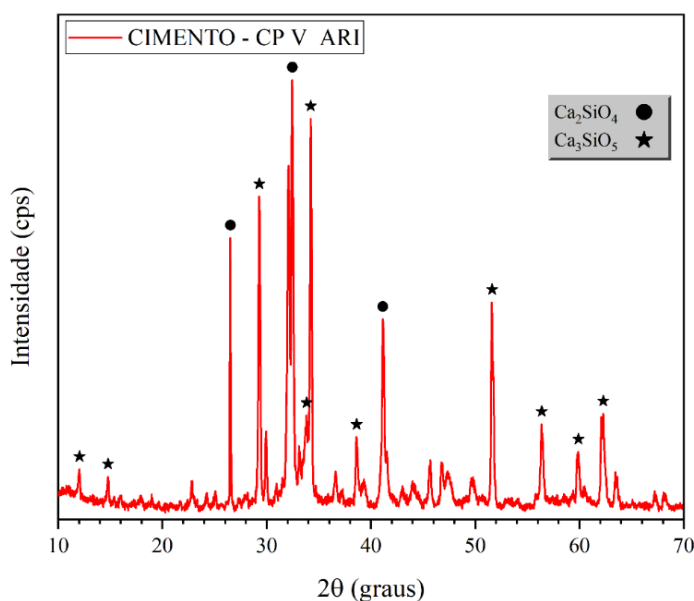
O teor de equivalente alcalino (em Na_2O) do cimento é dado pela Equação 7.

$$\text{Teor alcalino} = \%Na_2O + 0,658 * \%K_2O \quad (7)$$

O cimento utilizado apresentou teor de equivalente alcalino de 1,88%.

Os requisitos físicos e químicos para o cimento utilizado foram todos atendidos em conformidade com a NBR 16697 (ABNT, 2018). Os resultados obtidos por DRX do cimento Portland, bem como as fases presentes nos picos, podem ser observados na Figura 17.

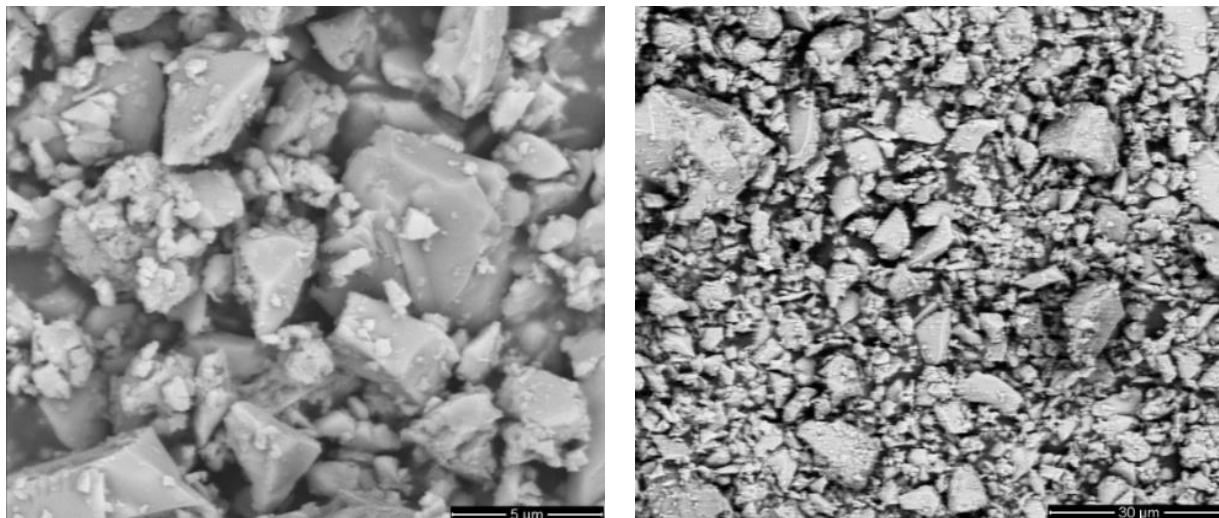
Figura 17 – Difratoograma de raios X da amostra de cimento Portland CP V ARI.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Pelo DRX podem-se observar 10 picos de silicato tricálcico (Ca_3SiO_5), Alita e 3 picos de silicato dicálcico (Ca_2SiO_4), Belita. Na Figura 18 apresentam-se as imagens da análise de MEV do cimento CP V utilizado.

Figura 18 – Micrografia eletrônica de varredura do cimento CP V.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia de leito de rio quartzosa comercializada na cidade de São Carlos/SP, peneirada manualmente, passante na peneira número 16, ou seja, dimensões menores que 1,2 mm.

No Quadro 2 podem ser analisadas as características físicas do agregado miúdo determinadas segundo as normas da ABNT.

Quadro 2 – Caracterização física do agregado miúdo.

Características	Metodologia	Agregado utilizado
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	0,64
Massa específica (g/cm^3)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,56
Massa unitária seca solta (kg/m^3)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1475,78
Massa unitária compactada (kg/cm^3)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1617,83
Impureza orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Solução mais clara que a padrão
Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	1,66

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Destaca-se que foram utilizados somente agregados miúdos nos compósitos cimentícios estudados.

Na Tabela 6 pode ser observada a composição química do agregado miúdo utilizado determinada por FRX.

Tabela 6 – Composição química do agregado miúdo.

Componentes	Valores obtidos (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	0,58
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	3,4
Óxido de cálcio (CaO)	0,071
Óxido de cromo (Cr_2O_3)	0,049
Óxido férrico (Fe_2O_3)	0,67
Óxido de potássio (K_2O)	1,2
Óxido de sódio (Na_2O)	0,37
Anidro silícico (SiO_2)	94,0
Dióxido de tório (ThO_2)	< 0,01
Dióxido de titânio (TiO_2)	0,35
Uraninita (U_3O_8)	< 0,01

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Tabela 7 pode ser observada a composição granulométrica, verificada pela porcentagem retida e acumulada em cada uma das peneiras. A dimensão máxima ($D_{máx}$) do agregado utilizado é de 1,2 mm e o módulo de finura (MF) é um 1,49.

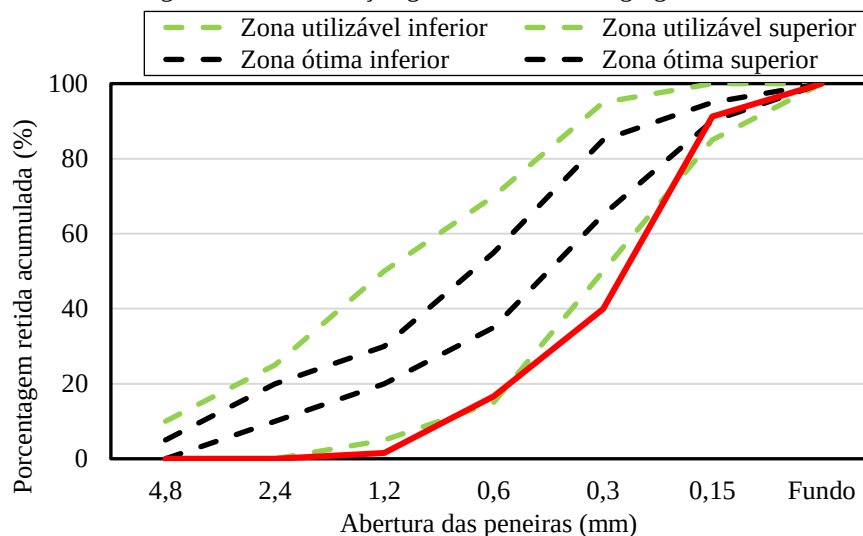
Tabela 7 – Composição granulométrica do agregado utilizado.

Peneira (mm)	% retido	
	Discreta	Acumulada
4,8	0,00	0,00
2,4	0,00	0,00
1,2	1,53	1,53
0,6	15,10	16,63
0,3	23,36	39,99
0,15	51,28	91,26
Fundo	8,74	100,00

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 19 pode ser verificado o gráfico de distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado nesta pesquisa.

Figura 19 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A curva de distribuição granulométrica do agregado encontra-se no limite inferior da zona utilizável, segundo o estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2019). Uma maior quantidade de finos nos compósitos cimentícios de alto desempenho possui a intenção de promover um melhor empacotamento e uma melhor densificação do compósito cimentício.

3.1.3 Aditivos

Devido ao alto consumo de cimento por metro cúbico de compósito cimentício produzido e para que a relação água/aglomerante utilizada fosse baixa e a consistência fosse mantida para todos os traços estudados, foi utilizado o aditivo superplastificante à base de policarboxilatos *Tec Flow 8000* da *GCP Applied Technologies*.

Além do aditivo superplastificante, o aditivo redutor de retração *Eclipse* da *GCP Applied Technologies* foi utilizado para reduzir as fissuras por retração plástica ou por secagem. A compatibilidade dos aditivos com os aglomerantes utilizados foi avaliada.

Nas Tabelas 8 e 9, respectivamente, as propriedades do aditivo superplastificante e do aditivo redutor de retração, fornecidas pelo fabricante, podem ser observadas.

Tabela 8 – Propriedades do aditivo superplastificante.

Produto	<i>TEC FLOW 8000</i>
Aspecto/cor	Líquido/alaranjado
Massa específica (g/cm ³) NBR 11768-3 (ABNT, 2019)	1,080 – 1,120
Teor de sólidos (%)	44,35 – 49,01
pH*	5,52

* Ensaio realizado no LMC.

Fonte: *GCP Applied Technologies* (2017).

Tabela 9 – Propriedades do aditivo redutor de retração.

Produto	<i>ECLIPSE</i>
Aspecto/cor	Líquido/transparente
Massa específica (g/cm ³) NBR 11768-3 (ABNT, 2019)	0,910
pH*	5,95

* Ensaio realizado no LMC

Fonte: *GCP Applied Technologies* (2017).

3.1.4 Barras de aço

Foram utilizadas barras de aço CA 60 com 5 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento para os ensaios de potencial de corrosão.

O aço foi fornecido pela *Arcelor Mital*. Na Tabela 10 está apresentada a composição química do aço utilizado, fornecida pelo fabricante.

Tabela 10 – Composição química do aço.

Elemento	% em massa	Elemento	% em massa	Elemento	% em massa
<i>C</i>	0,12000	<i>V</i>	0,00170	<i>Cu</i>	0,19675
<i>Si</i>	0,08850	<i>W</i>	0,01275	<i>Co</i>	0,01850

Tabela 10 – Composição química do aço (continuação).

Elemento	% em massa	Elemento	% em massa	Elemento	% em massa
<i>Mn</i>	0,42975	<i>Pb</i>	0,00700	<i>Ti</i>	0,00100
<i>P</i>	0,02000	<i>Mg</i>	0,00265	<i>Nb</i>	0,00400
<i>S</i>	0,02575	<i>B</i>	0,00248	<i>Fe</i>	98,75000
<i>Cr</i>	0,08450	<i>Sn</i>	0,05800	<i>Ca</i>	0,00180
<i>Ni</i>	0,09425	<i>Zn</i>	0,00368	<i>Ce</i>	0,00300
<i>Mo</i>	0,00965	<i>As</i>	0,01250	<i>Zr</i>	0,00150
<i>Al</i>	0,03600	<i>Bi</i>	0,00200	<i>La</i>	0,00100

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.1.5 Sílica ativa

Sílica ativa do tipo *Elkem* microsílica 920U da *Elkem Materials South America*, que teve suas características físicas e químicas determinadas segundo a NBR 13956-1 (ABNT, 2012). A sílica ativa possui 2,25 g/cm³ de densidade. Na Tabela 11 podem ser observadas algumas propriedades do material fornecidas pelo fabricante. Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de FRX da sílica ativa.

Tabela 11 – Propriedades físicas e químicas da sílica ativa.

Propriedade	Valor obtido	Limites NBR 13956-1 (ABNT, 2012)
Anidro silícico (SiO_2)	94,1%*	≥ 85,0%
Umidade	Máx. 3,0%	≤ 3,0%
% retido na peneira 45µm	Máx. 10%	≤ 10,0%
Perda ao fogo	3,6%*	≤ 6,0%
Área de superfície específica	247 m ² /kg**	*
Índice de atividade pozolânica	Mín. 105%	≥ 105%

*Ensaio realizado no CNEN/Lapoc (2018).

**Ensaio realizado no IPT (2019).

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 12 – Composição química da sílica ativa.

Componentes	Valores obtidos (% em massa)	NBR 13956-1 (ABNT, 2012)
Perda ao fogo (PF)	3,6	≤ 6,0%
Anidro silícico (SiO_2)	94,1	≥ 85,0%
Óxido de cálcio (CaO)	< 0,2	*
Óxido de estrôncio (SrO)	< 0,2	*
Óxido férrico (Fe_2O_3)	< 0,5	*
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	< 0,2	*
Óxido de titânio (TiO_2)	< 0,2	*
Óxido de tório (ThO_2)	< 0,01	*
Óxido de sódio (Na_2O)	0,61	*
Óxido de potássio (K_2O)	1,66	*
Equivalente alcalino (Na_2O)	1,70	*
Óxido de urânio (U_3O_2)	< 0,01	*

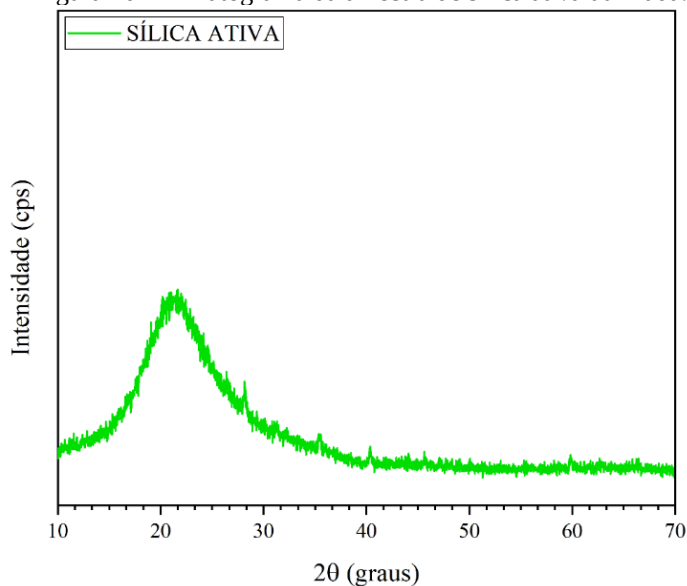
* Sem limites estabelecidos na NBR 13956-1 (ABNT, 2012).

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O teor de equivalente alcalino (em Na_2O) da sílica ativa é dado pela Equação 7.

Na Figura 20 podem ser observados os resultados obtidos para a análise de DRX para a sílica ativa utilizada.

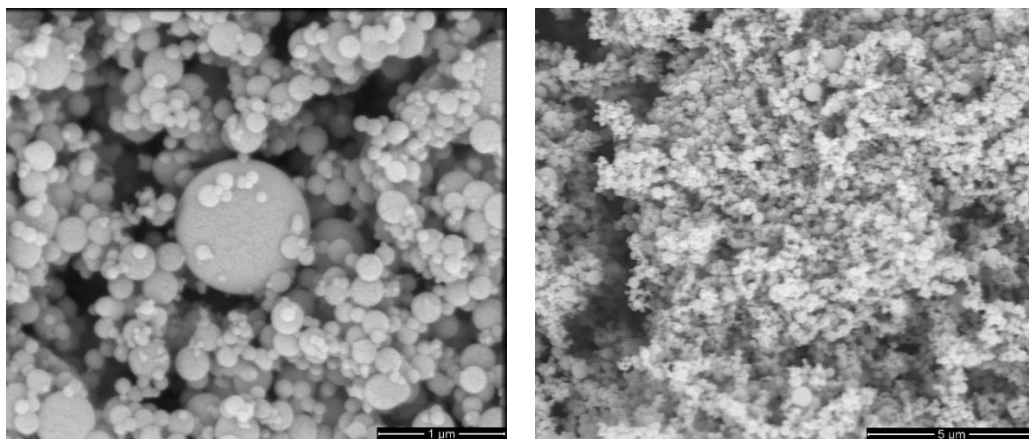
Figura 20 – Difratoograma da amostra de sílica ativa utilizada.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O comportamento predominantemente amorfo do material é representado pela banda amorfa obtida na análise do DRX. Na Figura 21 é apresentada a micrografia da sílica ativa obtida pela microscopia eletrônica por varredura.

Figura 21 – Micrografia da sílica ativa.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Observa-se pela figura acima que o material sílica ativa apresenta uma forma esférica bastante regular, diferente do que se observa na morfologia do cimento, que se apresenta bastante irregular.

3.1.6 Pó de vidro

Foi utilizado o pó de vidro com tamanho de partículas passantes nas peneiras de malha #200. Foram empregados vidros classificados como soda-cal, a partir de garrafas pós-consumo da cor

âmbar, para minimizar variações não controladas devido aos corantes, na produção dos compósitos cimentícios. Após coleta e encaminhamento ao LMC da UFSCar, as garrafas de vidro foram lavadas em água com detergente para retirada de rótulos, tampas, cola e impurezas (sujeira). Em seguida foram secas ao ar e trituradas em betoneira carregada com esferas de aço-cromo. Após trituração, o vidro foi moído em um moinho de bolas que possui revestimento de sílex, com as bolas utilizadas para o processo de moagem do mesmo material. Na Figura 22 observa-se o moinho com o material moído descarregado.

Figura 22 – Moinho descarregando o pó de vidro ([clique no hyperlink da figura para ser redirecionado ao vídeo](#)).



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O vidro resultante da moagem em moinho de bolas foi seco em estufa a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, por 24 horas. Depois de seco o vidro foi peneirado em peneirador mecânico, numa média de 15 minutos para cada 200 g de pó de vidro. Na Figura 23 observa-se o processo para processamento do pó de vidro.

Figura 23 – Preparo do pó de vidro reciclado.



Fonte: Adaptado de Freitas (2019).

Os materiais moídos foram acondicionados em sacos de papel e de plástico, evitando o contato com a umidade. Na Figura 24 podem-se observar os processos de peneiramento e armazenamento realizados.

Figura 24 – Processo de peneiramento e armazenagem do pó de vidro.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Finalmente, o vidro foi armazenado em caixas de papelão grandes e envoltas em sacos plásticos, protegidas de umidade.

A densidade obtida para o pó de vidro é de $2,55 \text{ g/cm}^3$, obtida no LMC e sua superfície específica é de $393 \text{ m}^2/\text{kg}$, determinada pelo método de Blaine no IPT.

Na Tabela 13 observa-se a composição química do pó de vidro reciclado, que foi determinada por FRX.

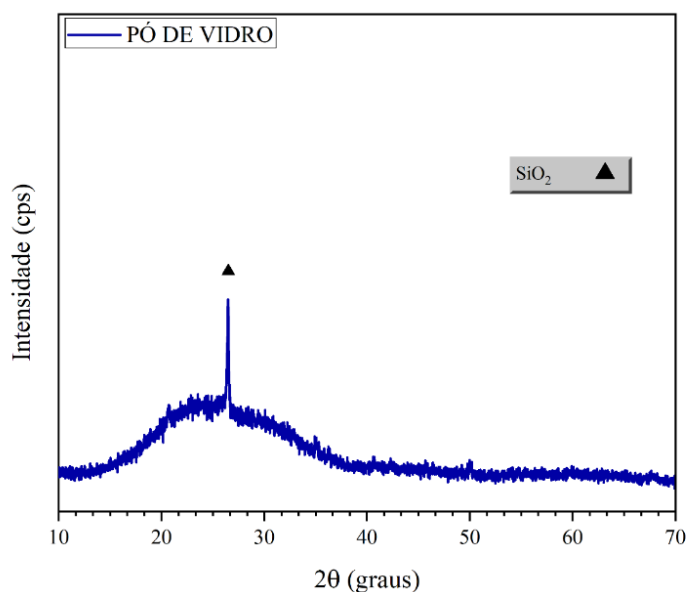
Tabela 13 – Composição química do pó de vidro.

Componentes	Valores obtidos (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	0,58
Anidro silícico (SiO_2)	74
Óxido de cálcio (CaO)	9,1
Óxido de estrôncio (SrO)	0,039
Óxido férrico (Fe_2O_3)	0,42
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	3,7
Óxido de tório (ThO_2)	< 0,01
Óxido de potássio (K_2O)	0,56
Óxido de sódio (Na_2O)	11
Óxido de rubídio (Rb_2O)	0,016
Óxido de magnésio (MgO)	0,74
Óxido de urânio (U_3O_8)	< 0,01

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A análise de DRX também foi realizada para as amostras do pó de vidro utilizado. Os picos no gráfico indicam uma fase cristalina. Na Figura 25 é possível verificar os resultados do ensaio.

Figura 25 – Difratoograma da amostra do pó de vidro utilizado.



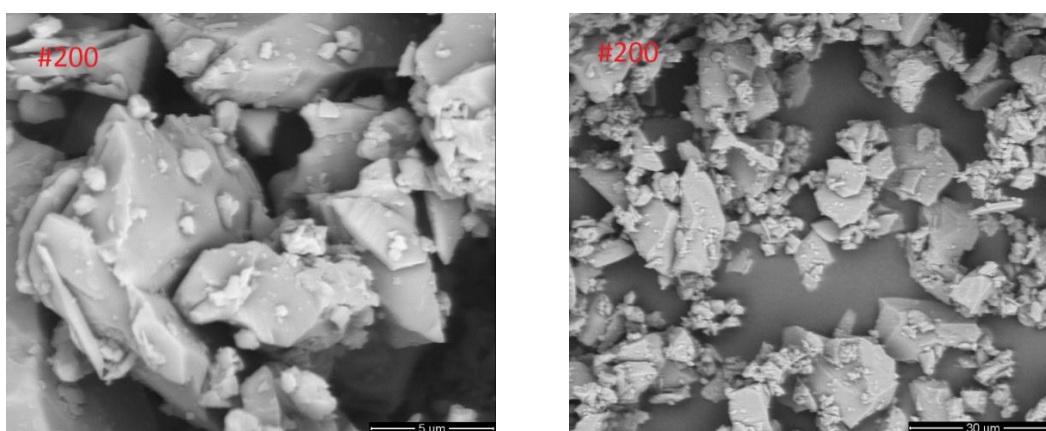
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O material é predominantemente amorfo, com um pico de SiO_2 , sendo o comportamento do material representado pela banda amorfa obtida na análise da DRX.

O pico de SiO_2 pode ser explicado por uma possível contaminação do material, pois, durante o processo de moagem a seco, as esferas de sílex, sob ação da gravidade e da rotação do moinho, vão realizando a moagem do material em partículas menores; como consequência têm-se o desgaste do moinho e das bolas, sendo esses materiais ricos em SiO_2 .

Pela análise da microscopia eletrônica de varredura, Figura 26, pode-se observar a morfologia do pó de vidro.

Figura 26 – Micrografia eletrônica de varredura do pó de vidro reciclado.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A morfologia do pó de vidro é semelhante à do cimento, porém com forma mais angular, com arestas mais bem definidas e superfície mais lisa, diferente da sílica ativa, que é esférica.

3.1.6.1 Potencial hidrogeniônico do pó de vidro

O potencial hidrogeniônico (pH) do pó de vidro foi determinado de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2013).

Para verificar a corrosibilidade do resíduo é importante determinar o seu potencial hidrogeniônico (pH). De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2013), um resíduo é considerado não corrosivo quando o pH da solução for superior a 2 e inferior a 12,5.

O ensaio para determinação do pH do pó de vidro foi realizado no LMC da UFSCar.

Na Figura 27 pode-se observar a realização do ensaio de potencial hidrogeniônico que utilizou um pHmetro digital microprocessado modelo PG1800 do fabricante GEHAKA.

Figura 27 – Ensaio de potencial hidrogeniônico.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Foi preparada uma solução com relação 1:1 (resíduo: água deionizada) em massa. Os ensaios foram realizados em triplicata com o pó de vidro passante na peneira de malha #200.

Na Tabela 14 podem ser verificados os resultados obtidos no ensaio de pH. Todas as amostras podem ser consideradas como resíduo não corrosivo, pois apresentaram valores de pH dentro dos limites estipulados pela NBR 10004 (ABNT, 2013) ($2 < \text{pH} < 12,5$).

Tabela 14 – pH das amostras de pó de vidro.

Amostra	pH	Slope do eletrodo (%)	Coefficiente de variação	Desvio padrão (%)
Pó de vidro	10,53	96	3,3E-05	5,8E-03

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao comparar os resultados, observa-se que as amostras de pó de vidro estão na faixa considerada como meio básico.

3.1.6.2 Índice de atividade pozolânica do pó de vidro

A avaliação da pozolanicidade do pó de vidro foi determinada por ensaios mecânicos e químicos, seguindo diretrizes da NBR 5751 (ABNT, 2015) para a determinação de atividade pozolânica com cal aos sete dias, da NBR 5752 (ABNT, 2014) para a determinação do índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias, e da NBR 15895 (ABNT, 2010) para determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado pelo método Chapelle modificado, além do método da condutividade elétrica.

Os materiais pozolânicos podem ser classificados como pozolanas naturais (classe N), pozolanas da cinza volante (classe C) e todos os demais materiais (classe E) de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015).

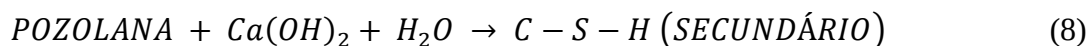
Na Tabela 15 podem-se observar as exigências químicas e físicas que as adições devem atender para serem consideradas como pozolanas.

Tabela 15 – Exigências químicas e físicas.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (% mín.)	70	70	50
SO_3 (% máx.)	4	5	5
Teor de umidade (% máx.)	3	3	3
Perda ao fogo (% máx.)	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na_2O (% máx.)	1,5	1,5	1,5
Material retido na peneira 45 μm (% máx.)	34	34	34
Índice da atividade pozolânica			
Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (% mín.)	75	75	75
Com a cal aos 7 dias (MPa)	6	6	6
Água requerida (% máx.)	115	110	110

Fonte: Adaptada da NBR 12653 (ABNT, 2015).

A reação pozolânica ocorre devido à presença do hidróxido de cálcio – CH com a pozolana e água, gerando uma nova fase de $C - S - H$, menos densa se comparada à primeira formação do produto, conforme a Equação 8.



A importância das reações pozolânicas é pela formação do gel de $C - S - H$ secundário, e também pelo tamanho dos poros, pois o $C - S - H$ secundário preenche os poros maiores, favorecendo a durabilidade e a resistência mecânica (DAL MOLIN, 2011).

Para um material ser considerado pozolânico, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015), os compostos devem apresentar um somatório das quantidades de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), no mínimo de 50% para classe E, e no mínimo de 70% para classes N e C, e apresentar quantidade máxima de SO_3 de 5% e de Na_2O de 1,5%.

Conforme verificado no resultado do DRX, o pó de vidro apresentou o somatório das quantidades de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ igual a 78,12%, o que caracteriza este material como pozolana comercial, pelo fato de conter alto teor de sílica ativa na composição, que reagindo com o $Ca(OH)_2$ irá formar o $C - S - H$, composto diretamente relacionado com a resistência mecânica do compósito cimentício.

Com relação à quantidade máxima de SO_3 e Na_2O_3 , o material estudado não apresenta nenhum teor, portanto menor que 5% e menor que 1,5%, respectivamente. Sendo assim os teores dos componentes estão de acordo com a norma.

A perda ao fogo para o pó de vidro passante na peneira #200 foi de 0,58%, menor que 6% que é o máximo estabelecido e a quantidade de material retido na peneira de malha 0,045 mm foi de 14%, menor que o máximo determinado pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

3.1.6.2.1 Índice de atividade pozolânica com a cal

Foi determinada a atividade pozolânica do pó de vidro, com cal, aos sete dias, de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2015). Para a realização do ensaio foram utilizados hidróxido de cálcio, areia normal fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e o pó de vidro reciclado passante nas peneiras de malha #200. Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura com argamassa de pó de vidro reciclado.

A argamassa foi preparada com uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio e mais uma quantidade de material pozolânico (pó de vidro), que corresponde ao dobro do volume do hidróxido de cálcio. Foram utilizados também 234 g de cada uma das quatro frações da areia normal. A quantidade de água para a mistura correspondeu a um índice de consistência de 230,5 mm, obtido na verificação do índice de consistência, mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Índice de consistência.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O material pozolânico e o hidróxido de cálcio foram misturados e homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 min, aproximadamente. Essa mistura foi adicionada à água de amassamento colocada previamente na cuba do misturador mecânico. Em seguida foi adicionada à areia e finalizada a mistura.

A cura dos corpos de prova foi realizada nos próprios moldes, mantidos vedados para evitar a perda de umidade. O tempo de cura foi de sete dias, sendo que, durante as primeiras 24 horas,

os corpos de prova permaneceram em ambiente à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; durante as 144 h ± 1 h posteriores, os corpos de prova foram mantidos em estufa à temperatura de $55^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Foram realizados ensaios de resistência à compressão em prensa hidráulica de 100 tf.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015), a argamassa deve apresentar resistência à compressão mínima de 6 MPa.

Na Tabela 16 apresentam-se os valores médios de resistência à compressão para avaliação da pozolanicidade do pó de vidro passante nas peneiras #200.

Tabela 16 – Resistência à compressão para avaliação da pozolanicidade do pó de vidro.

Amostras	Resistência à compressão axial -IAP / Cal		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Pó de vidro #200	4,97	0,10	2,09

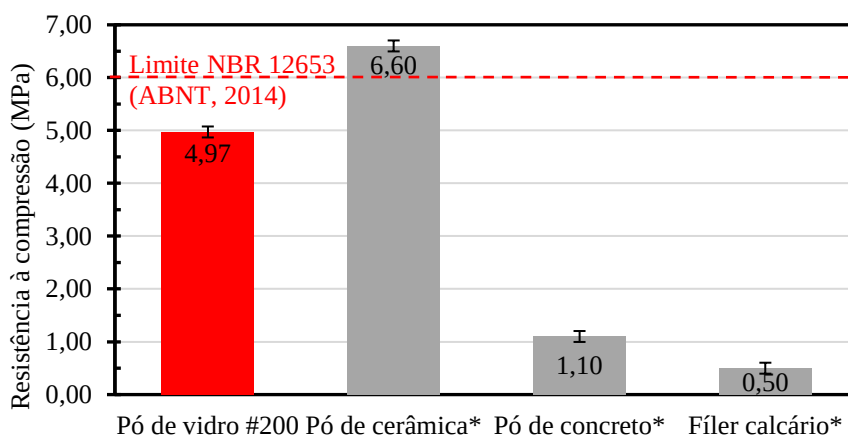
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os resultados dos ensaios e a análise estatística estão apresentados no Apêndice A.

Foi realizado o ensaio para verificação da atividade pozolânica aos sete dias com cal para os corpos de prova com argamassa de pó de vidro passante nas peneiras #200. Foram utilizadas, como estudo comparativo, as análises feitas por Brekailo *et al.* (2019), onde os autores avaliam o potencial reativo de adições de resíduo de cerâmica vermelha, resíduos de concreto e fíler calcário. Assim, foram utilizados os resultados dos três materiais para comparação com os valores obtidos com o pó de vidro.

Na Figura 29 observam-se os resultados de IAP com a cal para as argamassas com pó de vidro, e os resultados obtidos nos ensaios com pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário realizados por Brekailo *et al.* (2019).

Figura 29 – Resistência à compressão nos ensaios de IAP com cal: pó de vidro, pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário.



Notas: * (Brekailo *et al.*, 2019).

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Pode-se observar que o pó de cerâmica obteve resultados satisfatórios pelo IAP com a cal aos sete dias, enquanto a argamassa com pó de vidro não atingiu a resistência de 6,0 MPa prevista pela NBR 12653 (ABNT, 2015) para ser considerada pozolânica. O material fíler, do qual espera-se baixa reatividade, apresentou de fato a menor resistência.

3.1.6.2.2 Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias

O ensaio de índice de desempenho com o cimento Portland ($I_{cimento}$) foi realizado de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014). Utilizou-se o cimento Portland CP II F32, areia normalizada fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), água deionizada, e as amostras de pó de vidro (passante nas peneiras de malha #200). Foram produzidas argamassas com pó de vidro e uma argamassa de referência (sem pó de vidro). A argamassa de referência foi confeccionada em uma proporção cimento: areia de 1:3 (em massa) e relação a/c = 0,48. Na argamassa com pó de vidro 25% da massa do cimento foi substituída pelo pó de vidro. O índice de consistência da argamassa produzida com pó de vidro foi mantido em ± 10 mm do índice de consistência da argamassa de referência.

Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura para cada traço. Os corpos de prova permaneceram em cura imersa até a idade de ruptura (28 dias). O índice de desempenho foi calculado pela Equação 9:

$$I_{cimento} = \frac{f_{cVD}}{f_{cREF}} * 100 \quad (9)$$

Onde:

f_{cVD} = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova com pó de vidro (MPa);
 f_{cREF} = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova de referência (MPa).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015), o índice de desempenho mínimo com o cimento deve ser de 90%.

Para o ensaio da atividade pozolânica do pó de vidro reciclado passante nas peneiras #200, o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, expresso em porcentagem (%), foi determinado.

Na Tabela 17 apresentam-se os valores dos índices de atividade pozolânica para avaliação da pozolanicidade com cimento do pó de vidro passante nas peneiras #200.

Tabela 17 – Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias.

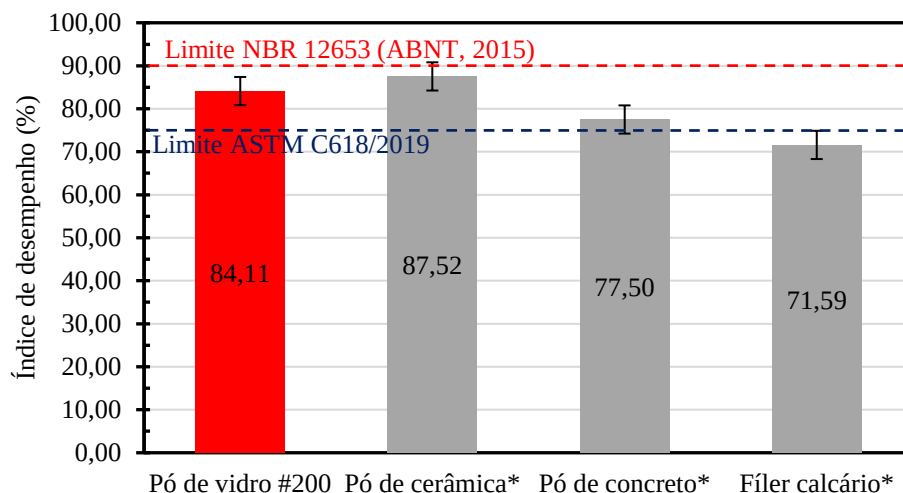
Amostras	$I_{cimento}$		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)
Pó de vidro #200	84,11	3,28	3,90

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e a análise estatística estão apresentados no Apêndice B.

Na Figura 30 observam-se os resultados de $I_{cimento}$ para a argamassa com pó de vidro, como também os resultados obtidos nos ensaios com pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário realizados por Brekailo *et al.* (2019).

Figura 30 – Índice de desempenho das argamassas: pó de vidro, pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário.



Notas: * (Brekailo *et al.*, 2019).

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

De acordo com os resultados obtidos pelo ensaio de índice de desempenho de materiais pozolânicos com o cimento Portland aos 28 dias, o pó de vidro não atingiu o índice de desempenho de 90% preconizado pela NBR 12653 (ABNT, 2015) como requisito físico para classificação de materiais pozolânicos.

Por outro lado, a norma americana ASTM C618/2019 estabelece que 75% é o índice de desempenho mínimo necessário para classificar um material como pozolânico. Nesse contexto, o vidro passante pela peneira #200 se enquadra no que é estabelecido. O comparativo entre as duas normas (brasileira e americana) também é apresentado por Cordeiro *et al.* (2008) em seu estudo acerca da atividade pozolânica e efeito fíler da cinza do bagaço da cana de açúcar.

A argamassa analisada com adição de pó de cerâmica vermelha (BREKAILO *et al.*, 2019) apresentou os melhores desempenhos com o cimento. O fíler calcário apresenta o desempenho mais baixo, demonstrando baixa atividade pozolânica.

Mesmo apresentando desempenho inferior, confirmando o caráter inerte do material, o fíler calcário apresenta resultado próximo ao limite da norma americana. Materiais inertes misturados com cimento podem ter um efeito significativo na hidratação das fases do clínquer, caracterizando o efeito fíler. Basicamente, sua superfície fina atua como locais de nucleação para os produtos de hidratação das fases do clínquer, que ocasiona um refinamento dos poros do compósito hidratado, potencializando a resistência final (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

3.1.6.2.3 Chapelle modificado

A determinação da atividade pozolânica do pó de vidro reciclado passante nas peneiras de malha #200 pelo método modificado de Chapelle foi realizada conforme diretrizes gerais da NBR 15895 (ABNT, 2010) e procedimento IPT123 – Revisão 01 de 23.11.2015 “Determinação de atividade pozolânica – Método Chapelle Modificado”.

A pozolanicidade é determinada pela capacidade do material em fixar o cálcio quando mantido em suspensão aquosa com óxido de cálcio durante 16 h a 90°C, sob agitação constante.

Para comparar os resultados obtidos nas amostras de pó de vidro, foi determinado um índice de desempenho em relação ao desempenho mínimo necessário do metacaulim (750 mg $Ca(OH)_2$ / g de metacaulim), conforme a Equação 10:

$$I_{chappelle} = \frac{C_{Ca(OH)_2 VD}}{750} * 100 \quad (10)$$

Onde:

$I_{chappelle}$ = índice de desempenho (%);

$C_{Ca(OH)_2 VD}$ = consumo de cal obtido no ensaio de Chapelle (mg $Ca(OH)_2$ /g de VD).

Além disso, a norma está baseada na metodologia francesa de Chapelle para o metacaulim e foi adotada no Brasil para todos os materiais pozolânicos. Essa metodologia consiste em verificar o consumo da fase vítrea contida no material pozolânico com 1g de CaO . Hoppe Filho (2008) realizou a metodologia para amostras de cinza volante, onde obteve um consumo médio de CaO/g diferente do consumo de metacaulim.

O método de investigação de atividade pozolânica pelo ensaio de Chapelle modificado foi proposto por Raverdy *et al.* (1980), e estabelece o valor mínimo para classificação da adição mineral como material pozolânico como sendo o consumo de 330 mg CaO/g de adição (equivalente, por cálculo estequiométrico a 436 mg $Ca(OH)_2/g$ de adição).

Conforme a norma NBR 15894-1 (ABNT, 2010) para o material “metacaulim destinado ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta”, o índice de atividade pozolânica Chapelle deverá ser maior ou igual a 750 mg de $Ca(OH)_2$ por grama de material.

Na Tabela 18 observam-se os resultados dos índices de desempenho, de acordo com a NBR 15894-1 (ABNT, 2010) e com o estabelecido por Raverdy *et al.* (1980), obtidos no ensaio de Chapelle modificado do pó de vidro reciclado comparados com os resultados para o pó de cerâmica estudado por Brekailo *et al.* (2019).

Para o cálculo do índice de desempenho pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010) foi utilizada a Equação 10.

Para o cálculo do índice de desempenho de acordo com Raverdy *et al.* (1980), também foi utilizada a Equação 10 substituindo-se o valor 750 por 436, que foi o limite estabelecido.

Tabela 18 – Resultados obtidos no ensaio de Chapelle modificado.

Materiais	Consumo de cal (mg $Ca(OH)_2$ /g amostra)	Índice de desempenho (%) – NBR 15894-1 (ABNT, 2010)	Índice de desempenho (%) – Raverdy <i>et al.</i> (1980)
Pó de vidro #200	654	87	150
Pó de cerâmica*	395	53	91

Notas: * (Brekailo *et al.*, 2019).

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O resultado do ensaio é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por miligrama de material pozzolânico. De acordo com o limite estabelecido por Raverdy *et al.* (1980), o consumo do pó de vidro encontra-se acima do consumo obtido pela metodologia do Chapelle modificado (50%), embora a quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por miligrama de material pozzolânico seja menor que o estabelecido pela norma brasileira.

Pesquisadores afirmam que grãos de sílica amorfa reagem com a cal, especialmente as partículas de dimensão inferior a 5 μ m. Com base nessa informação, considerou-se a quantidade de partículas com dimensão inferior a 5 μ m e o consumo de cal para a amostra de pó de vidro. A quantidade de partículas menores que 5 μ m foi de 21% com d90 de 88% para um consumo de cal de 654 mg $Ca(OH)_2$ /g.

3.1.6.2.4 Condutividade elétrica

Um método possível para determinar a pozzolanidade do material é pela condutividade elétrica. Essa metodologia foi pioneiramente produzida por Luxán, Madruga e Saavedra (1989).

Nessa pesquisa, o ensaio da condutividade elétrica em soluções contendo hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, água deionizada e pó de vidro reciclado passante nas peneiras de malha #200 foi realizado com as quantidades de cada material especificadas de acordo com o estudo de Fernandes *et al.* (2017). Adicionaram-se nas células 250 ml de água deionizada e a temperatura da água foi elevada a 80 °C. Em seguida acrescentaram-se 200 mg de $Ca(OH)_2$ para obter-se uma solução insaturada, sob agitação por 1 hora, para que o CH fosse totalmente dissolvido. A seguir adicionaram-se 5,25 g de pó de vidro, sendo então iniciadas as leituras de condutividade elétrica. As medidas foram feitas com um condutivímetro de bancada. As leituras de condutividade foram feitas por 86400 s.

Uma maneira de se avaliar os resultados é a partir das curvas da perda relativa de condutividade elétrica (P_r) versus tempo de acordo com a Equação 11, avaliando-se os valores de P_r para os períodos de 100 s, 1000 s, 10000 s e 86400 s.

$$P_r(\%) = [(C_0 - C_{pa})/C_0] * 100 \quad (11)$$

Sendo:

C_0 = valor de condutividade elétrica da solução insaturada de $Ca(OH)_2$ antes da adição da pozzolana;

C_{pa} = perda absoluta em condutividade para um dado tempo t (em s).

Outra maneira para a avaliação da atividade pozolânica é por meio da medida de condutividade elétrica proposto por Tavares (2019). Na Tabela 19 são apresentados os valores limites da condutividade elétrica definidos por Luxán, Madruga e Saavedra (1989) e por Tavares (2019).

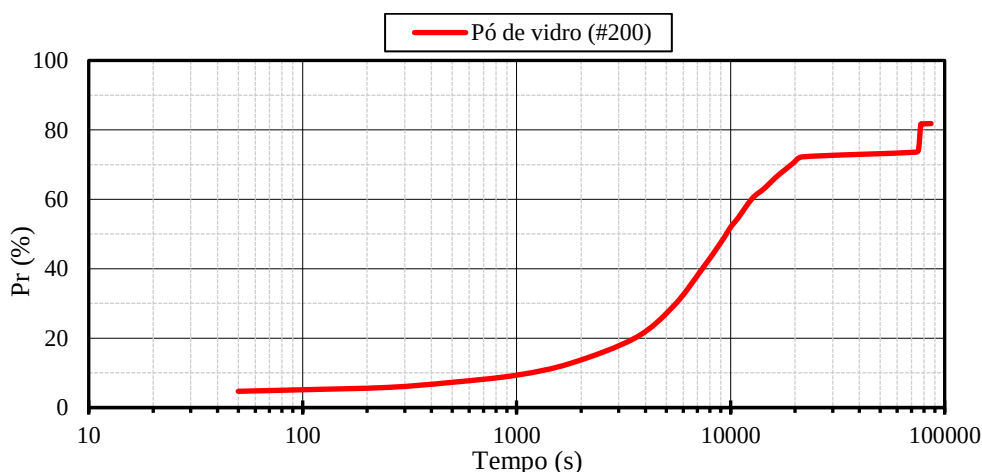
Tabela 19 – Avaliação da atividade pozolânica por medida de condutividade elétrica.

Classificação do material	Variação da condutividade de acordo com o método proposto (mS/cm)
Não pozolana	Menor que 0,4
Pozolana variável	Entre 0,4 e 1,2
Boa pozolana	Maior que 1,2

Fonte: Tavares (2019).

Os resultados da atividade pozolânica para o pó de vidro, indicados pela variação da condutividade elétrica, são apresentados na Figura 31, representados pela perda relativa de condutividade elétrica (P_r) em função do tempo de reação (s).

Figura 31 – Pozolanicidade do pó de vidro.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Observa-se uma variação da perda de condutividade ao longo do tempo, que está diretamente relacionada ao tipo de material. Ocorrem baixos valores iniciais de P_r do pó de vidro, pois no início das reações o material ainda está sendo dissolvido. A tendência de estabilização das curvas ocorre após os 20.000 s e indica que existe uma redução da atividade química, sendo o momento em que a reação praticamente é finalizada. Isso se deve, provavelmente, à reação entre a sílica amorfa e o cálcio, pela formação do silicato de cálcio hidratado. A reação entre o material pozolânico e o $Ca(OH)_2$ forma produtos insolúveis e por isso a concentração de $Ca(OH)_2$ na solução diminui (FERNANDES *et al.*, 2017).

O pó de vidro finamente moído reage rapidamente, tendo em vista uma maior afinidade química com o cálcio presente na solução de água deionizada e $Ca(OH)_2$. A P_r do pó de vidro, para o tempo de 1.000 s, foi de 9% devido ao caráter amorfo da sílica presente. Na Tabela 20 são apresentados os resultados da perda relativa de condutividade elétrica (P_r) em função do tempo de reação (s) com pó de vidro e comparados com os dados obtidos por Fernandes *et al.* (2017), que avaliou a pozolanicidade por condutividade elétrica do resíduo de porcelana (RP), em

relação a pozolanas já conhecidas e tradicionais em argamassas e concretos: metacaulim (MK) e sílica da casca do arroz (SCA).

Tabela 20 – Perda relativa de condutividade elétrica (%) em função do tempo (s) para diferentes adições.

Tempo (s)	Pó de vidro	RP*	MK*	SCA*
100	6	5	63	27
1.000	10	14	69	46
10.000	57	45	80	48
86.400	82	-	-	-
100.000	-	83	74	58

Notas: * (Fernandes *et al.*, 2017).

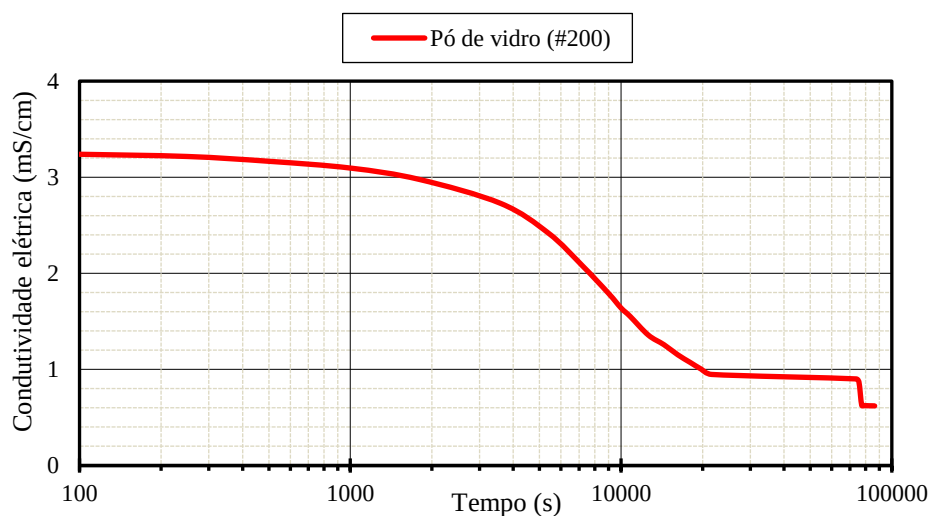
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Da Tabela 20 observa-se que o MK e a SCA tiveram uma perda mais elevada nas idades iniciais, atendendo para uma maior afinidade química com o cálcio presente na solução. Aos 1.000 s, o valor obtido pelo MK é o que mais se destaca em relação às outras adições analisadas. Vale ressaltar que este material possui alta pozolanicidade (FERNANDES *et al.*, 2017). Apesar de apresentarem uma reação mais lenta no início, após os 86.400 s, o pó de vidro atingiu o mesmo valor encontrado pelo metacaulim (80%).

Em relação à sílica da casca de arroz (SCA), Rodrigues (2012) identificou a perda de condutividade elétrica após período de 10.000 s entre 20% e 30%, e aos 85.000 s as soluções apresentaram valores próximos de 60% indicando reatividade do material. Para o mesmo período de tempo, Shiroma (2016) observou que a P_r da sílica da casca de arroz (SCA) foi de 75%. No presente trabalho, a P_r do pó de vidro foi de 52%, para o tempo de 10.000 s, atingindo a maior faixa de P_r entre 77.400 s e 86.400 s com valores praticamente constantes e iguais a 82%.

Nos primeiros 1.000 s a P_r do pó de vidro foi baixa, atingindo a maior faixa de perda relativa de condutividade elétrica após os 10.000 s e tendendo a estabilidade após os 77.400 s. Os dados são semelhantes àqueles obtidos por Shiroma (2016), que revelaram uma baixa taxa de reação inicial e o maior valor de P_r foi de 88,31% após 10.000 s. Ressalta-se que, apesar da reação do pó de vidro ser mais lenta, valor muito próximo do P_r do MK foi atingido (82%) num tempo de 77.400 s. Na Figura 32 observam-se os valores de condutividade para o pó de vidro reciclado.

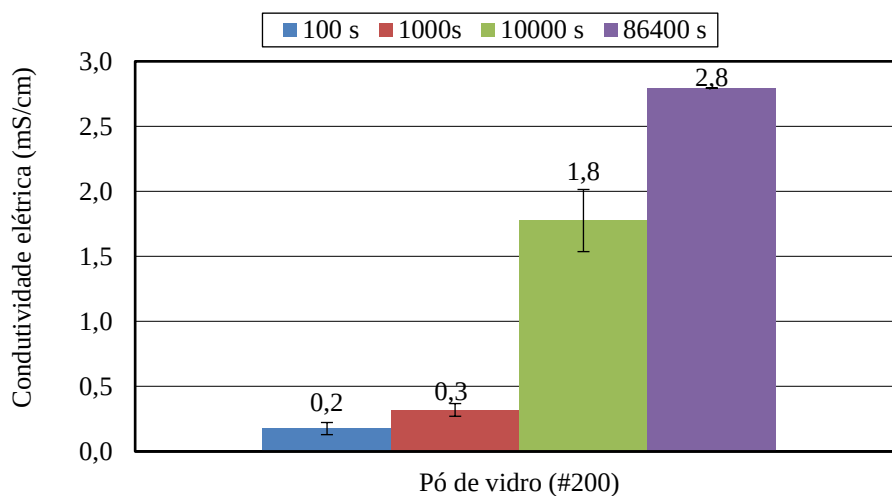
Figura 32 – Condutividade elétrica versus tempo.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 33 observam-se as diferenças entre as condutividades elétricas nos tempos de 100 s, 1.000 s, 10.000 s e 86.400 s e o valor inicial.

Figura 33 – Diferenças de condutividade elétrica.



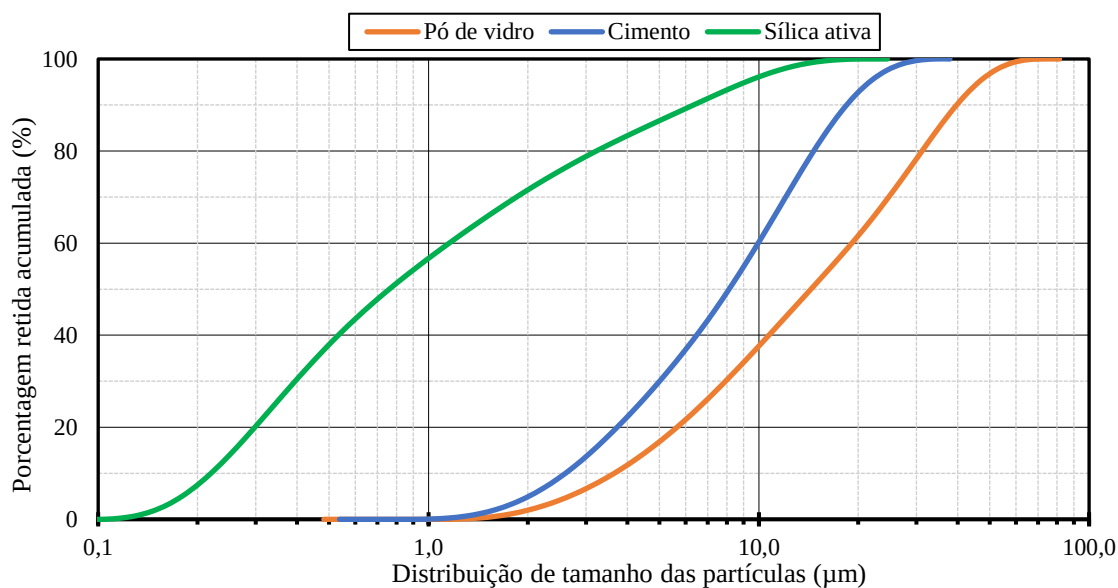
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Segundo a classificação apresentada (Tabela 19), o pó de vidro pode ser considerado uma pozolana, porém isso só acontece depois dos 10.000 s, quando a diferença de condutividade elétrica entre o tempo final e o inicial foi maior que 1,2 mS/cm (10.000 s e 86.400 s), que corresponde a uma boa pozolana.

3.1.7 Granulometria dos aglomerantes

Na Figura 34 podem ser observadas as curvas de distribuição granulométrica do cimento Portland, da sílica ativa e do pó de vidro reciclado.

Figura 34 – Curvas de distribuição granulométrica dos aglomerantes.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O d_{50} (mediana) da sílica ativa é de aproximadamente $0,8 \mu\text{m}$, o do cimento é de $8 \mu\text{m}$ e o do pó de vidro, $14 \mu\text{m}$. A granulometria do pó de vidro utilizado neste estudo aproxima-se da granulometria utilizada em várias pesquisas realizadas com esse tipo de material.

3.2 Estudos em pasta

Com base nos resultados dos ensaios de pozolanicidade definiu-se avaliar a compatibilidade entre os aglomerantes e o aditivo superplastificante com o pó de vidro reciclado moído passante na peneira de malha #200. A compatibilidade entre os aglomerantes utilizados (cimento, sílica ativa e pó de vidro) e o aditivo superplastificante foi determinada por meio dos ensaios Cone de Marsh, miniabatimento e tempos de pega.

3.2.1 Teor ótimo de aditivo superplastificante

O ponto de saturação do aditivo superplastificante ou teor ótimo do superplastificante é o teor a partir do qual o efeito do aditivo deixa de ser significativo. O teor ótimo de superplastificante foi determinado pelo ensaio do cone de Marsh desenvolvido de acordo com a NBR 7681 (ABNT, 2013), que avalia a fluidez das pastas com o decorrer do tempo.

Após umedecimento do funil e com sua saída obstruída, despejou-se cerca de 1 litro da pasta no mesmo; liberou-se a saída e cronometrou-se o tempo necessário para que 500 ml da mistura escoassem para a proveta. Realizou-se a leitura no tempo de 10 minutos após o contato do cimento com a água (Figura 35).

Figura 35 – Ensaio do cone de Marsh.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Para cada pasta, variou-se o teor de aditivo SP, e com os valores de tempo obtidos (t) foi possível a plotagem das curvas de $\log(t)$ versus teor de aditivo. A partir das curvas geradas encontrou-se o ponto de saturação que, de acordo com o método AFREM, é aquele em que uma reta com inclinação de 2:5 tangencia a curva obtida.

3.2.2 Compatibilidade entre aglomerantes e aditivos

A compatibilidade entre o aditivo superplastificante, cimento e pó de vidro foi determinada com o ensaio do mini-slump desenvolvido por Kantro¹ (1980 apud AİTCIN, 2000).

Foi utilizado um molde tronco-cônico sobre uma placa de vidro nivelada, o qual foi preenchido com a pasta de cimento e o molde foi levantado suave e verticalmente, permitindo que a mistura espalhasse sobre a placa. Após o espalhamento, foram determinados dois diâmetros perpendiculares com auxílio de um paquímetro, a partir dos quais pode-se obter o diâmetro médio e área de espalhamento correspondente (Figura 36).

Figura 36 – Realização do ensaio do miniabatimento e medição dos diâmetros de abertura da pasta.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

¹ KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980

A manutenção do abatimento foi verificada após 10, 30, 40 e 60 minutos do contato do cimento com a água.

3.2.3 Tempos de pega

A compatibilidade entre os materiais pode ser avaliada também, verificando a influência dos aditivos e adições no tempo de pega das pastas. Os tempos de pega foram determinados de acordo com a NBR 16607 (ABNT, 2018), que estabelece o método para determinação dos tempos de início e fim de pega da pasta de cimento Portland, utilizando o aparelho de Vicat. O tempo de fim de pega é contado a partir do momento da adição de água ao cimento até o momento em que a agulha estabiliza a 0,5 mm de penetração na pasta. O tempo de início de pega é atingido quando a distância entre a agulha e a placa de vidro for de (6 ± 2) mm.

Para a obtenção da pasta de consistência normal (Figura 37) a massa de água é determinada por tentativas até que a sonda do aparelho de Vicat pare a uma distância de (6 ± 1) mm da placa base após 30 segundos do instante em que a agulha é solta, de acordo com a NBR 16606 (ABNT, 2018).

Figura 37 – Determinação do índice de consistência da pasta referência.



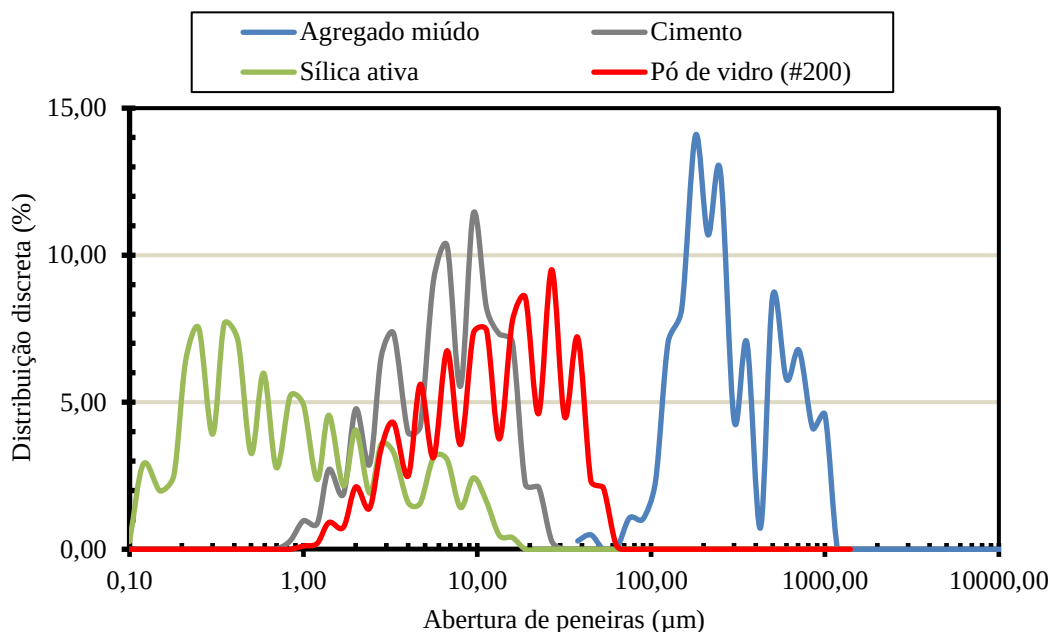
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As outras pastas foram moldadas com a mesma massa de água obtida para a pasta de consistência normal. As pastas foram preparadas preenchendo-se os moldes sobre placas de vidro e armazenadas em câmara úmida durante todo o ensaio, sendo removidas apenas para as medidas periódicas. Foram avaliadas pastas com cimento, cimento - sílica ativa, cimento - pó de vidro e cimento - pó de vidro - sílica ativa.

3.3 Definição dos traços

Nessa pesquisa a relação água/aglomerante adotada foi de 0,18 com a adição de 8% de sílica ativa em relação ao consumo de cimento (em massa) do traço referência. A incorporação de pó de vidro foi realizada nos teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 50% em substituição volumétrica parcial do cimento. A análise da distribuição granulométrica do traço com pó de vidro passante na peneira #200, de acordo com a Figura 38, mostra uma faixa de diâmetros, entre 40 μ m e 100 μ m, que não é preenchida por nenhum material.

Figura 38 – Distribuição granulométrica do cimento, sílica ativa, pó de vidro e agregado miúdo.



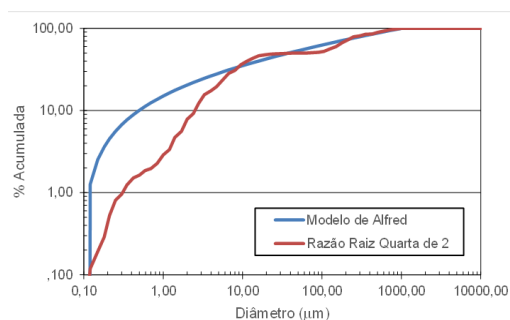
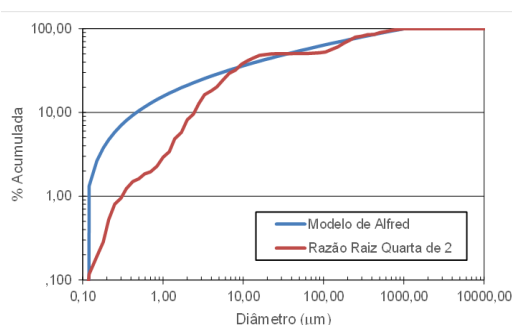
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Foi aplicado aos traços analisados, com 0%, 10%, 20%, 30% e 50% de pó de vidro reciclado em substituição volumétrica ao cimento Portland, o modelo de empacotamento de Alfred. Para isso, fez-se a caracterização granulométrica dos componentes utilizando a razão $\sqrt[4]{2}$ a fim de reduzir o intervalo entre as aberturas de malha de peneira, além de fornecer uma representação mais próxima da microestrutura do concreto. O modelo tem a finalidade de realizar uma avaliação da eficiência e determinação do coeficiente de empacotamento das misturas de concreto. Foram obtidas as curvas de distribuição granulométrica para cada mistura a partir das porcentagens acumuladas dos materiais, considerando a distribuição discreta de seus materiais constituintes, e aplicou-se a técnica de empacotamento (modelo de Alfred), resultando em curvas teóricas, a partir das quais determinaram-se os coeficientes de distribuição (q), conforme apresentado na Figura 39 (a) até (e).

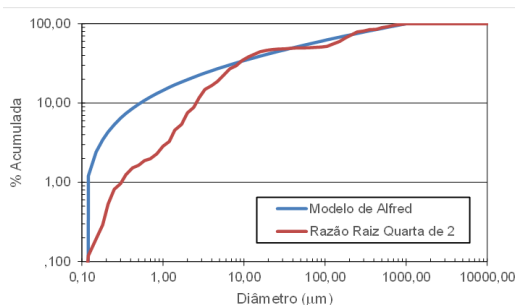
Figura 39 – Curvas de distribuição granulométrica para os compósitos cimentícios.

a) REF – Traço de referência
 $q = 0,127 / R^2 = 0,9856$

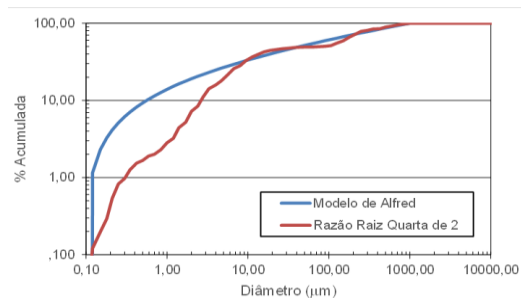
b) VD10 – Traço com 10% de pó de vidro
 $q = 0,135 / R^2 = 0,9870$



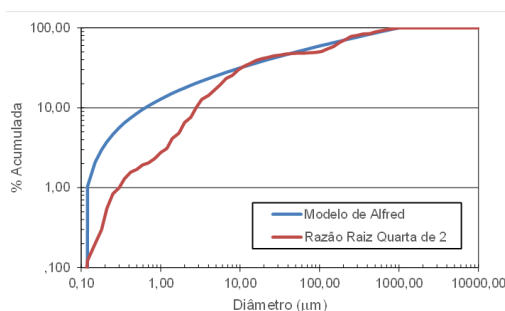
c) VD20 – Traço com 20% de pó de vidro
 $q = 0,144 / R^2 = 0,9883$



d) VD30 – Traço com 30% de pó de vidro
 $q = 0,152 / R^2 = 0,9894$



e) VD50 – Traço com 50% de pó de vidro $q = 0,170 / R^2 = 0,9913$



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os coeficientes de correlação não atingiram seu valor máximo ($R^2=1$) devido, provavelmente, à falta de materiais nas frações entre 40 μm e 120 μm da curva granulométrica.

O programa calcula, iterativamente, o diâmetro da maior e menor partícula da mistura fornecendo a curva granulométrica resultante do modelo teórico de Alfred. Simultaneamente, o teor de cada material é ajustado a fim de obter o máximo coeficiente de correlação entre as curvas experimentais e teóricas.

De acordo com Tai e El-Tawil (2020), a teoria do empacotamento é o método básico utilizado para o desenvolvimento de concretos densos usando partículas de tamanhos diferentes.

A aplicação adequada da teoria do empacotamento pode controlar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, porque o aprimoramento do empacotamento de partículas leva a mais água utilizável que pode ser usada no processo de hidratação.

O modelo de Andreasen e Andersen (A&A) é comumente utilizado para projetar CUAD com vários sólidos constituintes e alta fluidez.

Os valores dos coeficientes de distribuição (q) encontrados neste estudo variaram entre 0,127 para o REF e 0,17 para o VD50.

O modelo A&A mostra que quanto maior é o valor de q melhor é o empacotamento, portanto, neste trabalho a porosidade diminui com o aumento do teor de pó de vidro. A porosidade é

maior para a referência e vai diminuindo até o VD50. Vale ressaltar que a forma das partículas de vidro interfere no modelo de Alfred, que parte do princípio que todas as partículas são esféricas.

Segundo Andreasen e Andersen a densidade de empacotamento máxima é obtida quando $q = 0,37$. Acima deste valor haverá uma porosidade residual. Além disso, quanto menor o valor de q maior será a quantidade de finos presente na mistura, que é o caso do CCUAD. O valor de q é determinado experimentalmente e depende das características das partículas. No entanto, o modelo A&A falha em estabelecer o melhor empacotamento no caso de misturas granulares com uma grande quantidade de finos ($<250 \mu\text{m}$).

Portanto, para misturas com uma quantidade elevada de pós, recomenda-se um valor q menor (BROUWERS; RADIX, 2008).

Após a avaliação do empacotamento, os traços produzidos foram determinados a partir de um traço referência variando o teor de substituição do cimento pelo pó de vidro.

Os parâmetros que se mantiveram fixos ao longo do estudo foram: o tipo de cimento, o tipo e quantidade de sílica ativa, o agregado miúdo, a relação água/aglomerantes e o teor de aditivos. Como variáveis do estudo têm-se os teores de pó de vidro empregados em substituição ao volume de cimento e, conseqüentemente, o consumo de cimento das misturas.

No Quadro 3 são apresentadas e descritas as nomenclaturas utilizadas neste estudo.

Quadro 3 – Nomenclatura adotada para os traços estudados

Nomenclatura	Composição
REF	Traço referência com adição de sílica ativa e 0% de pó de vidro
VD10	Traço com adição de sílica ativa e substituição do cimento por 10% de pó de vidro (em volume)
VD20	Traço com adição de sílica ativa e substituição do cimento por 20% de pó de vidro (em volume)
VD30	Traço com adição de sílica ativa e substituição do cimento por 30% de pó de vidro (em volume)
VD50	Traço com adição de sílica ativa e substituição do cimento por 50% de pó de vidro (em volume)

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Tabela 21 observam-se os consumos de materiais de cada mistura dos compósitos cimentícios avaliados.

Tabela 21 – Consumo de cada material constituinte dos compósitos cimentícios estudados, em kg/m^3 .

Identificação	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	Água*	Redutor de retração	Superplastificante
REF	1000,00	80,00	0,00	1074,00	181,28	10,80	24,30
VD10	900,00	80,00	81,00	1074,00	181,28	10,80	24,30
VD20	800,00	80,00	161,00	1074,00	181,28	10,80	24,30
VD30	700,00	80,00	242,00	1074,00	181,28	10,80	24,30
VD50	500,00	80,00	403,00	1074,00	181,28	10,80	24,30

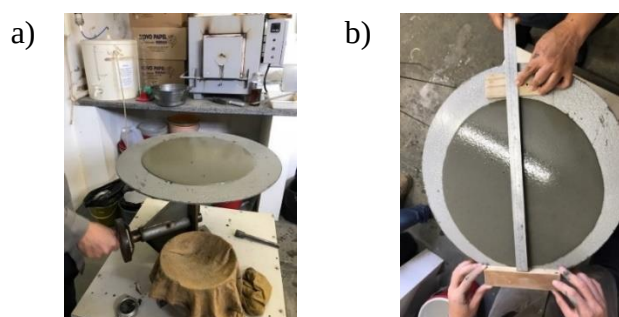
*Água corrigida pelo teor de sólidos do superplastificante.

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Foi feita a verificação da consistência dos compósitos cimentícios com o objetivo de manter a mesma trabalhabilidade para todos os traços, uma vez que uma das aplicações desse material pode ser como material de reparo de estruturas de concreto.

Para a realização do ensaio de consistência foi utilizada a NBR 13276 (ABNT, 2016). Para o ensaio utilizou-se: a mesa para índice de consistência (*flow table*), molde tronco cônico, paquímetro, soquete metálico e régua metálica (Figura 40 a). Foram colocadas três camadas da mistura no molde tronco cônico com alturas aproximadamente iguais, e foram aplicados em cada camada, respectivamente, quinze, dez e cinco golpes. Em seguida o molde foi retirado e a manivela da mesa foi acionada, onde foram aplicados 30 golpes em 30 s aproximadamente. Logo após foram realizadas duas aferições do diâmetro, (Figura 40 b), e o valor adotado foi uma média desses dois valores.

Figura 40 – a) Realização do espalhamento (*flow table*); b) Medição de dois diâmetros para espalhamento.

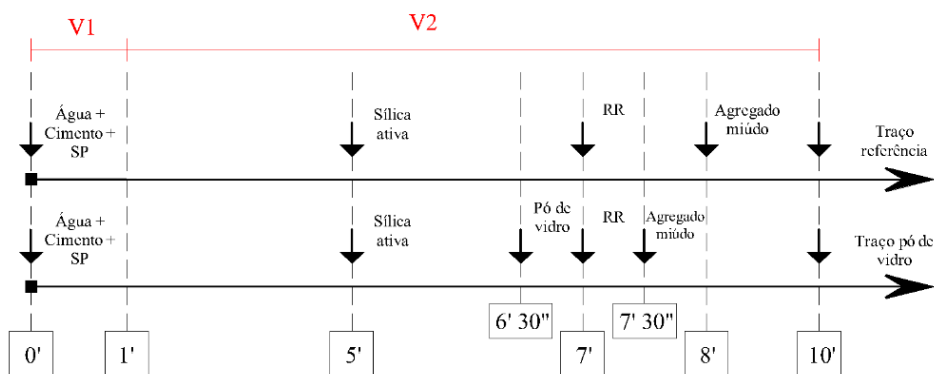


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A relação água/aglomerante não foi alterada para os traços estudados e a consistência não sofreu variações consideráveis com a incorporação do pó de vidro.

O procedimento de mistura adotado para os compósitos cimentícios de referência e com substituição do cimento Portland por pó de vidro foi testado de diversas maneiras e o que apresentou melhor resultado na mistura dos materiais é o apresentado na Figura 41. Destaca-se que V1 corresponde à velocidade baixa da argamassadeira e V2 à velocidade alta; RR corresponde ao redutor de retração e SP ao superplastificante.

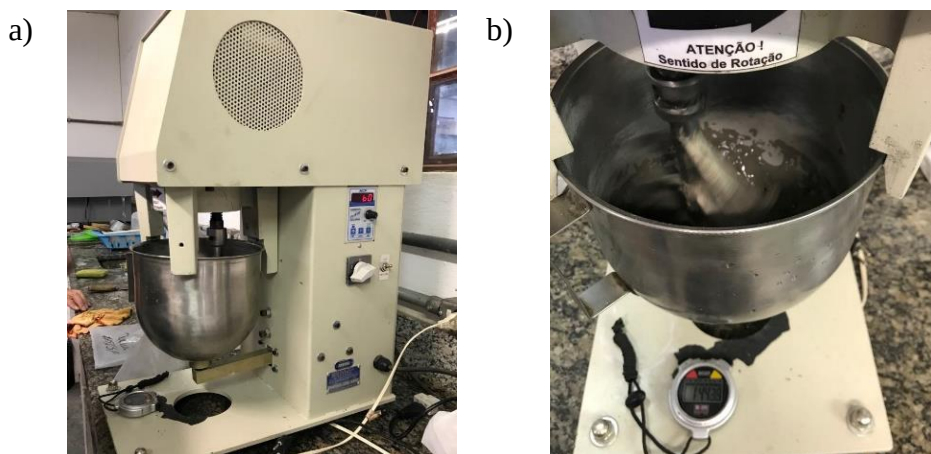
Figura 41 – Procedimento de mistura.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 42 observa-se a argamassadeira planetária da Solotest, com cuba em inox, capacidade para 5 litros, usada nos ensaios. Foram utilizadas duas velocidades da argamassadeira: a velocidade 1 corresponde a 180 rpm e a velocidade 2 corresponde a 240 rpm.

Figura 42 – a) Argamassadeira utilizada no procedimento de mistura dos materiais; b) Argamassadeira durante um ensaio realizado ([clique no hyperlink da figura para ser redirecionado ao vídeo](#)).



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

De acordo com Tai e El-Tawil (2020), o procedimento de mistura é mais complicado para CUAD do que para o concreto convencional. Ao preparar o CUAD deve-se considerar cuidadosamente o tempo de mistura, velocidade de mistura, temperatura e sequência de mistura para alcançar o desempenho esperado.

Vários protocolos de mistura para alcançar a homogeneização do CUAD no menor tempo possível foram propostos (WILLE *et al.*, 2012; HIREMATH; YARAGAL, 2017, LONG; WANG; XIE, 2002, TAFRAOUI *et al.*, 2009; ABDULKAREEM *et al.*, 2018).

Embora os detalhes específicos do processo geral de mistura tenham diferido entre os pesquisadores, todos afirmaram que os componentes do CUAD precisam ser misturados a seco antes de adicionar água e superplastificante.

Zhang *et al.* (2019) utilizaram o procedimento de misturar todo o material seco com 90% da emulsão de água com superplastificante. Após os 3 minutos de agitação, foi adicionado o restante da emulsão.

A maioria dos regimes de mistura preconizados eram para mistura de laboratório. No entanto, para a mistura em canteiro de obra, existem duas restrições que não se aplicam à mistura de laboratório: (1) grande capacidade dos misturadores usados para construção em obras geralmente têm velocidades de mistura inferiores aos alcançáveis em misturadores de laboratório menores e (2) os materiais em pó e as areias formam grumos que podem ser bastante grandes em mistura em canteiro de obra, o que dificulta o processo de mistura.

O procedimento utilizado por de Larrard e descrito em Larrard e Sedran (1994) tem as duas vantagens: (1) a adição de uma alta proporção de água na fase inicial da mistura facilita a

liberação de íons Ca^{2+} suficientes de partículas de cimento. Esses íons são posteriormente adsorvidos nas cadeias de superplastificante, alcançando assim uma viscosidade mais baixa da mistura (FERDOSIAN; CAMÕES, 2016) e (2) a mistura apenas do cimento reduz inicialmente a carga do misturador durante a fase inicial da mistura, quando a viscosidade é maior e a demanda no misturador é, portanto, maior.

Devido à presença de partículas ultrafinas (sílica ativa, cimento e outros materiais finos), força de cisalhamento suficiente é necessária para separar aglomerados durante o processo de mistura do CUAD. Como as areias contribuem para esse papel, acrescentando-as mais tarde para reduzir a carga inicial no misturador, é benéfico do ponto de vista prático.

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019).

Após a moldagem os corpos de prova foram colocados em câmara climatizada, onde permaneceram por período de aproximadamente 48 horas, até desmoldagem.

Os corpos de prova foram desmoldados com 48 horas porque os traços com 50% de pó de vidro não atingiram resistência suficiente para a desmoldagem antes desse período.

A cura úmida foi realizada de acordo com o indicado na NBR 7215 (ABNT, 2019), em que os corpos de prova foram mantidos inicialmente no molde em câmara úmida, com a face superior protegida por uma placa de vidro, como pode ser observado na Figura 43, por 48 horas.

Figura 43 – Corpos de prova em câmara úmida.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em seguida os corpos de prova foram retirados do molde e imersos em recipientes com água saturada de cal, onde permaneceram até a realização dos ensaios.

3.4 Caracterização dos compósitos cimentícios

Os ensaios realizados em compósitos cimentícios são mostrados no Quadro 4, bem como o estado, fresco ou endurecido, a metodologia, a quantidade, a dimensão dos corpos de prova e a idade dos ensaios.

Quadro 4 – Ensaios realizados para caracterização dos compósitos cimentícios.

Característica	Estado	Metodologia	CPs	Dimensão CPs	Idades
Densidade de massa (kg/m ³)	Fresco	NBR 13278 (ABNT, 2005)	2 verific.	Cilíndrico – 80x85 mm	
Teor de ar incorporado (%)	Fresco	NBR 13278 (ABNT, 2005)	2 verific.	Cilíndrico – 80x85 mm	
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	Endurecido	NBR 9779 (ABNT, 2012)	3	Cilíndrico – 50x100 mm	7, 28 e 180 dias
Resistência à compressão axial (MPa)	Endurecido	NBR 5739 (ABNT, 2007)	4	Cilíndrico – 50x100 mm	2, 7, 28, 91 e 365 dias
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Endurecido	NBR 7222 (ABNT, 2011)	3	Cilíndrico – 50x100 mm	28 e 180 dias
Resistência à tração na flexão (MPa)	Endurecido	NBR 13279 (ABNT, 2005)	3	Prismático – 40x40x160 mm	28 dias
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Endurecido	NBR 15630 (ABNT, 2008)	3	Cilíndrico – 50x100 mm	28 dias
Módulo de elasticidade estático (GPa)	Endurecido	NBR 8522 (ABNT, 2017)	5	Cilíndrico – 50x100 mm	28 dias
Porosidade aparente e densidade aparente	Endurecido	ASTM C20/2000	3	Cilíndrico – 50x100 mm	2, 7, 28, 91 e 180 dias
RAS	Endurecido	NBR 15577 (ABNT, 2018)	3	Prismático – 25x25x285 mm	
Profundidade de carbonatação natural e acelerada	Endurecido	-	4	Prismático – 40x40x160 mm	6, 12, 18 e 24 meses

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.4.1 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Foram realizados ensaios para determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005), para a mistura de referência e para os traços com substituição parcial do cimento Portland por pó de vidro (Figura 44).

Figura 44 – Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.4.2 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi analisada de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012) nas idades de 7 dias, 28 dias e 180 dias. Logo após a desmoldagem os corpos de prova foram

colocados em estufa à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$, até constância de massa. Em seguida, as laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas com silicone para garantir que a absorção de água ocorresse unicamente pela base do corpo de prova. Em seguida foram determinadas as massas secas de cada um dos corpos de prova e iniciado o ensaio em recipiente preenchido com água até a altura 5 ± 1 mm acima da face inferior da amostra. A massa saturada dos corpos de prova foi determinada após 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h do contato da amostra com a água.

Na Figura 45 pode ser observada a disposição dos corpos de prova em estufa e no recipiente com a camada especificada de água pela norma.

Figura 45 – Corpos de prova em estufa até constância de massa e corpos de prova em recipientes com água no ensaio de absorção de água.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A absorção de água por capilaridade foi calculada de acordo com a Equação 12.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{A} \quad (12)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade (g/cm^2);
 m_{sat} = massa do corpo de prova no período de tempo (g);
 m_s = massa seca do corpo de prova (g);
 A = área da amostra em contato com a água (cm^2).

Além da absorção de água por capilaridade, também foi calculada a sortividade dos compósitos cimentícios, conforme especificado na Equação 13.

O coeficiente de sortividade corresponde ao coeficiente angular da reta que é obtida ao plotar a raiz do tempo versus a absorção capilar.

$$i = St^{0,5} \quad (13)$$

i = absorção capilar por unidade de área (g/cm^2)
 S = sortividade ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$)
 t = tempo (min)

3.4.3 Resistência à compressão axial

Os ensaios para verificação da resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos de prova foram retificados (garantindo um mínimo de irregularidade dimensional) antes da ruptura para uma distribuição uniforme da carga. Em seguida, os corpos de prova foram ensaiados na Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade de carga de 600 kN.

3.4.4 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011) na Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade de carga de 600 kN.

3.4.5 Resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão (complementar) foram realizados de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Após a ruptura por flexão os corpos de prova rompidos serão usados no ensaio de resistência à compressão axial.

3.4.6 Módulo de elasticidade estático e dinâmico

O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade estático foi realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017). Para cada traço foram moldados cinco corpos de prova. Inicialmente foram rompidos dois corpos de prova à compressão axial e nos outros três corpos de prova foram colocados medidores de deformação nas faces da amostra, conforme a Figura 46, e em seguida o ensaio foi realizado na Máquina de ensaios EMIC.

Figura 46 – Ensaio de módulo de elasticidade estático.



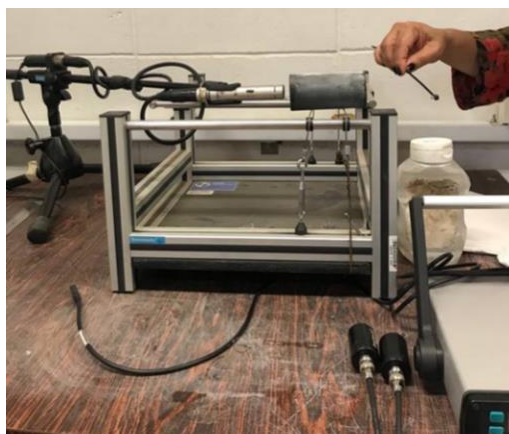
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico é um ensaio não destrutivo, realizado através da propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos. Foram

moldados quatro corpos de prova para a mistura de referência e para cada teor de substituição de pó de vidro, e a leitura foi feita na idade de 28 dias, seguindo as recomendações da NBR 15630 (ABNT, 2009).

Primeiramente as amostras foram pesadas, em seguida posicionadas no pórtico de ensaio de acordo com a Figura 47 e foi acionado o microfone para captura da frequência. O corpo de prova é excitado por uma haste de forma longitudinal (onde o impulso é aplicado em uma extremidade e captado do outro lado do corpo de prova) e flexional (onde o impulso é captado no centro do corpo de prova), obtendo-se assim a frequência fundamental. O módulo de elasticidade foi obtido através do modo de vibração. Um programa de computador calcula os módulos de elasticidade dinâmicos.

Figura 47 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.4.7 Porosidade aparente e densidade aparente

Foram realizados os ensaios de porosidade e densidade aparentes, baseados no princípio de Arquimedes, aos 2 dias, 7 dias, 28 dias, 91 dias e 180 dias. O método se baseia na norma ASTM C20/2000.

3.4.8 Reação álcali-sílica

A determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado foi realizada de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT, 2018), que estabelece o método de ensaio acelerado para determinar, por meio da variação de comprimento de barras de argamassa, a possibilidade de um agregado participar da reação expansiva álcali-sílica na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis sódio e potássio.

Para esta pesquisa utilizou-se o cimento padrão e o cimento Portland CP V ARI, sendo este último passado na peneira de malha 850 μm para remover eventuais grumos.

Foram moldados três prismas de argamassa de seção quadrada de 25 x 25 mm de lado e comprimento de 285 mm, para cada composição estudada.

Na Figura 48 podem ser observados os prismas moldados para o ensaio.

Figura 48 – Corpos de prova prismáticos para o ensaio de RAS.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Cada fração do agregado, a areia natural utilizada na produção dos compósitos, foi lavada com água corrente para remover o pó aderido e partículas finas do agregado, e as frações retidas nas várias peneiras foram secas e armazenadas individualmente em um recipiente limpo e fechado.

O material seco foi proporcionado utilizando-se uma parte de cimento para 2,25 partes em massa de agregado classificado. Foi utilizada relação água/cimento igual a 0,47 em massa.

Na Tabela 22 estão apresentados os agregados separados em frações de acordo com as porcentagens mostradas.

Tabela 22 – Quantidades de agregado.

Peneiras		Quantidade	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	0	0,00
2,36 mm	1,18 mm	0	0,00
1,18 mm	600 μ m	60	594,00
600 μ m	300 μ m	25	247,50
300 μ m	150 μ m	15	148,50

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As barras foram moldadas e mantidas nos moldes por 24 horas. Posteriormente foram desmoldadas e mantidas em um recipiente com água deionizada por mais 24 horas na estufa ventilada com temperatura de $(80 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, o aquecimento do recipiente é realizado de maneira gradativa em (6 ± 2) h até atingir os 80°C .

As barras foram removidas da água uma a uma e foi tomada a leitura zero de cada barra de argamassa em relógio comparador. Em seguida, as barras de argamassa foram colocadas em um recipiente com solução suficiente de NaOH a $(80 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, para que ficassem totalmente imersas.

Após a leitura zero, foram efetuadas leituras nas idades de 16 dias e 30 dias, contados a partir da moldagem, e pelo menos três leituras intermediárias em cada período, aproximadamente na

mesma hora da leitura zero. Na Figura 49 podem-se observar parte do procedimento de moldagem dos corpos de prova e o relógio comparador utilizado.

Figura 49 – Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de RAS e relógio comparador para medida da variação dimensional dos corpos de prova.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O limite da NBR 15577-1 (ABNT, 2018) para que o agregado seja considerado potencialmente reativo é de 0,19% de variação dimensional, sendo esse limite adotado somente para os traços confeccionados de acordo com a norma.

O agregado foi analisado pelo método preconizado pela NBR 15577-5 (ABNT, 2018) em combinação com o cimento CP V com incorporação de pó de vidro nos teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 50% com adição de sílica ativa no teor de 8%. A NBR 15577-5 (ABNT, 2018) tem o mesmo princípio da parte 4, porém é indicada para avaliar a eficiência de cimentos, com adições de materiais pozolânicos ou escórias de alto-forno, em inibir a expansão decorrente da reação álcali-agregado ou se uma combinação cimento de obra e agregados pode provocar expansões deletérias

3.4.9 Profundidade de carbonatação natural e acelerada

Para os ensaios de carbonatação foram utilizados quatro corpos de prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm para os traços com incorporação de pó de vidro moído para os teores 0%, 10%, 20%, 30% e 50%. Os ensaios de carbonatação acelerada foram realizados na outra metade dos corpos de prova moldados, sendo levados para a câmara de carbonatação: temperatura de $(27 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, umidade relativa equivalente a 70% a 80% e concentração de CO_2 de $(15\% \pm 2)\%$, em volume.

Após a moldagem e cura úmida por 28 dias, os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório por cinco dias e depois foram levados à estufa numa temperatura de $(50 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ por três horas até constância de massa para a ocorrência da estabilização de umidade interna.

Posteriormente, metade dos corpos de prova foram colocados na estação meteorológica da UFSCar em São Carlos/SP para determinação da profundidade de carbonatação natural e a outra

metade dos corpos de prova foram levados para a câmara de carbonatação acelerada, onde permaneceram em exposição por dois anos.

Para realizar as medições da profundidade da frente de carbonatação, um corpo de prova foi fracionado na máquina de ensaio de tração por flexão a cada seis meses para cada traço.

Para realizar as leituras da frente de carbonatação (natural e acelerada) foi aspergida em cada face uma solução de fenolftaleína a 1% (indicadora de pH).

Com a utilização de um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm, foram realizadas sete leituras em cada lateral da face exposta, totalizando 28 leituras por corpo de prova, sendo o resultado final a média destes valores.

A umidade da câmara de carbonatação foi controlada através da utilização de sílica gel no interior da câmara de carbonatação.

Na Figura 50 está apresentada a câmara de carbonatação utilizada no ensaio com corpos de prova expostos à carbonatação acelerada.

Figura 50 – Câmara utilizada para acelerar o processo de carbonatação dos corpos de prova.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A fenolftaleína apresenta coloração róseo-avermelhada com valores de pH iguais ou superiores a 9,5 aproximadamente e incolor abaixo desse valor, sendo possível identificar a profundidade de carbonatação pela diferença na coloração do material.

3.5 Ensaios relacionados à durabilidade frente à ação de cloretos

Os ensaios realizados em compósitos cimentícios para análise da durabilidade frente à ação de cloretos são mostrados no Quadro 5, bem como a metodologia, a quantidade, a dimensão dos corpos de prova e a idade dos ensaios.

Quadro 5 – Ensaios realizados para avaliar durabilidade frente à ação de cloretos em compósitos cimentícios.

Característica	Metodologia	CPs	Dimensão CPs	Idades
Frente de penetração de cloretos	Aspersão de Nitrato de prata	1	Cilíndrico – 50x100 mm	6, 12, 18 e 24 meses
Teor total de cloretos	Método de Volhard	1	Material em pó	311 dias
Migração de cloretos	ASTM C1202/2019	4	Cilíndrico – 50x100 mm	28 dias
Difusão de cloretos	NT BUILD 492:2011	4	Cilíndrico – 100x200 mm	28 dias
Efeito combinado de difusão de cloretos com carbonatação acelerada	-	4	Cilíndrico – 100x200 mm	1 ano
Resistividade elétrica	AASHTO TP 119:2018	3	Cilíndrico – 100x200 mm	2, 7, 28, 91 e 180 dias
Condutividade elétrica e pH dos compósitos cimentícios	-	3	Cilíndrico – 50x100 mm	365 dias
Potencial de corrosão	ASTM C876/2015	4	Prismático – 40x40x80 mm	322 dias
Condutividade elétrica e pH das soluções de água nos poros	-	3	Cilíndrico – 50x100 mm	-

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

3.5.1 Frente de penetração de cloretos

A medida da profundidade de penetração dos cloretos foi determinada por meio da aspersão de uma solução de nitrato de prata com concentração de 0,1 M.

O nitrato de prata gera o cloreto de prata em presença de cloretos livres e o óxido de prata na ausência de cloretos, cujas colorações são contrastantes, sendo possível identificar a profundidade de penetração dos cloretos.

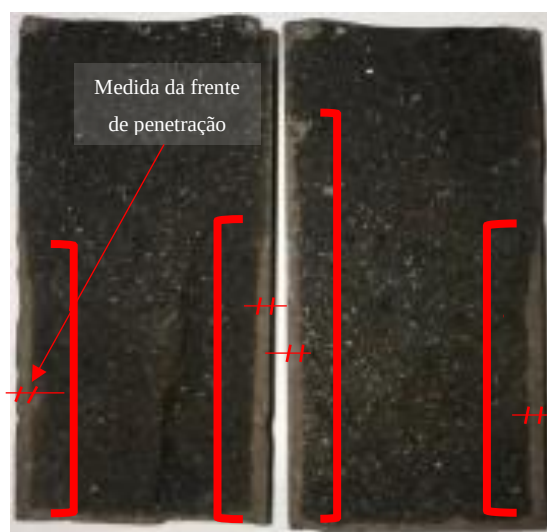
A leitura da frente de penetração será feita após a realização de ciclos de secagem e molhagem das amostras de compósitos cimentícios de diâmetro de 50 mm por 100 mm de comprimento em solução de *NaCl*. Os ciclos consistem nos corpos de prova ficarem quatro dias imersos em solução até uma altura de 50 mm e três dias expostos em ambiente de laboratório.

No presente trabalho foram utilizados dois corpos de prova para cada uma das idades avaliadas (3 meses, 6 meses, 1 ano e 2 anos), que estiveram submetidos a um ambiente saturado por CO_2 .

Foram feitas três leituras em cada lateral e nas duas faces dos corpos de prova, onde ocorreu a penetração de cloretos, totalizando 12 leituras por corpo de prova.

Na Figura 51 observam-se as faixas onde foram feitas as medições em todos os corpos de prova analisados, onde em cada faixa indicada foram realizadas três medidas.

Figura 51 – Medida da frente de penetração de cloretos.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Vale considerar que a princípio as medidas seriam feitas a cada três meses e seriam abertos dois corpos de prova por traço e por idade. Como não ocorreu penetração de cloretos nas primeiras idades, optou-se por aumentar o número de idades mais avançadas e diminuir o número de corpos de prova em cada idade.

3.5.2 Teor total de cloretos

A determinação do teor de cloretos dos compósitos cimentícios foi feita pelo método de Volhard, após completar 6, 12, 18 e 24 meses de imersão e emersão parcial em solução de *NaCl*. Para obtenção das amostras foi realizada a ruptura dos corpos de prova à tração por compressão diametral, sendo uma parte usada para determinar a profundidade da penetração de cloretos pelo método colorimétrico e a outra, para retirada das amostras para o ensaio.

3.5.3 Migração de cloretos

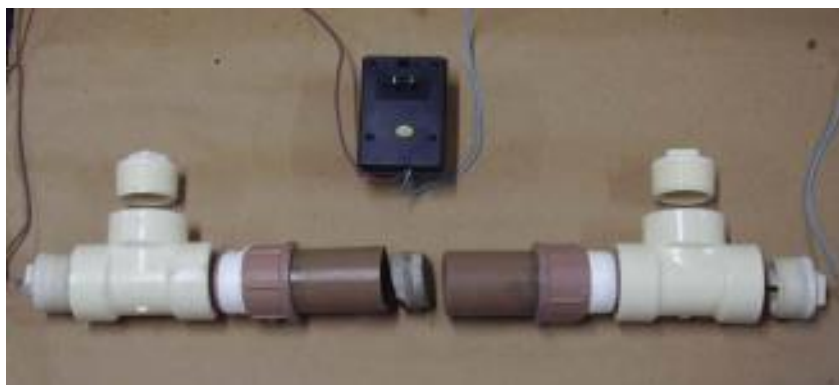
O ensaio de migração de cloretos é uma técnica que permite avaliar a capacidade do concreto em proteger a armadura dos agentes agressivos. Nesse ensaio estão envolvidos os quatro mecanismos principais de transporte dos agentes agressivos, ou seja, a permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração iônica. Como é um experimento realizado de forma acelerada e com fluxo “forçado” por uma corrente elétrica, a absorção capilar tem menor relevância em comparação ao fenômeno natural. Amostras representativas tiveram sua capacidade de retardar a migração dos cloretos mensurada.

Foram utilizadas células de PVC constituídas por um flange de 100 mm de comprimento por 50 mm de diâmetro, um “T” rosqueável, de 100 mm com uma tampa superior para realização de medidas, e uma lateral, contendo o eletrodo e selada para evitar a perda das soluções.

Os corpos de prova foram colocados na interface das duas células, sendo também colados com adesivo à base de silicone. Assim, a troca iônica entre as células deu-se somente através da área exposta da superfície do corpo de prova.

Na Figura 52 é apresentado o esquema da realização do ensaio. Foi aplicada uma tensão de 12 Volts por meio de eletrodos posicionados nas extremidades do sistema, que estavam conectados a fios de cobre provenientes de uma fonte de tensão controlada.

Figura 52 – Esquema e montagem do aparato para a realização do ensaio de migração de cloretos.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 53 está apresentada a realização do ensaio com as quatro amostras utilizadas para cada traço ensaiado.

Figura 53 – Realização do ensaio de migração de cloretos.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

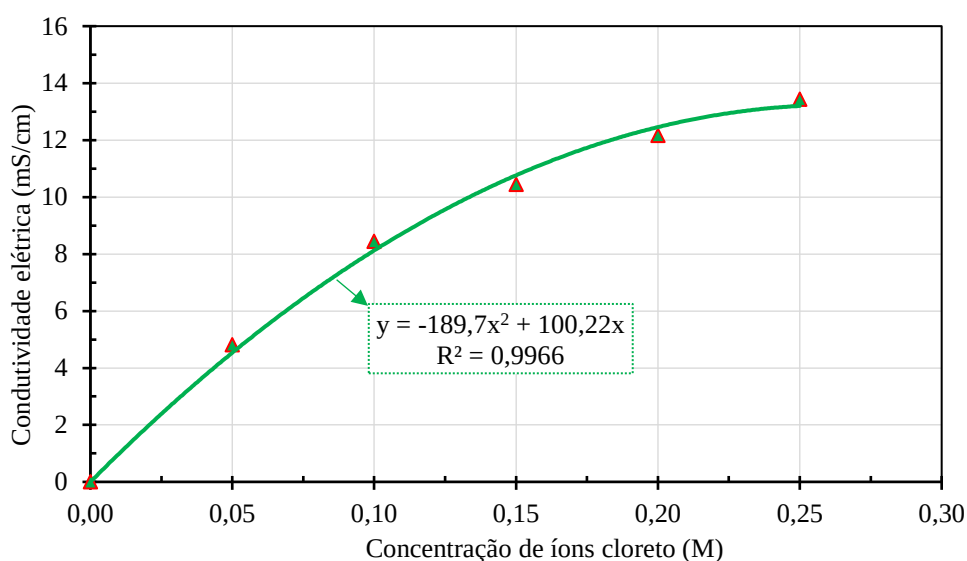
A norma americana ASTM C1202/2019 orienta no sentido da utilização do processo de saturação a vácuo das amostras antes da execução dos ensaios de migração.

Castellote, Andrade e Alonso (2001) utilizaram esse procedimento para garantir que o ingresso de cloretos na amostra se dê predominantemente por difusão. Inicialmente os corpos de prova foram cortados em fatias de 15 mm e aproveitadas as fatias centrais de cada corpo de prova. As fatias

foram colocadas no vácuo por duas horas e depois foram saturadas mantendo o vácuo ligado por mais (20 ± 2) horas.

Durante todo o ensaio a condutividade elétrica da solução da célula anódica, inicialmente sem cloretos, foi analisada diariamente. Assim, obteve-se a evolução da condutividade elétrica da solução utilizando o condutivímetro digital portátil tipo caneta modelo CD-880 da marca *Instrutemp*. Fez-se uma estimativa da concentração de cloretos empregando a correlação obtida experimentalmente entre a concentração de íons cloreto (Cl^-) e a condutividade elétrica (Figura 54).

Figura 54 – Correlação entre a condutividade elétrica e a concentração de íons cloreto, obtida experimentalmente.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

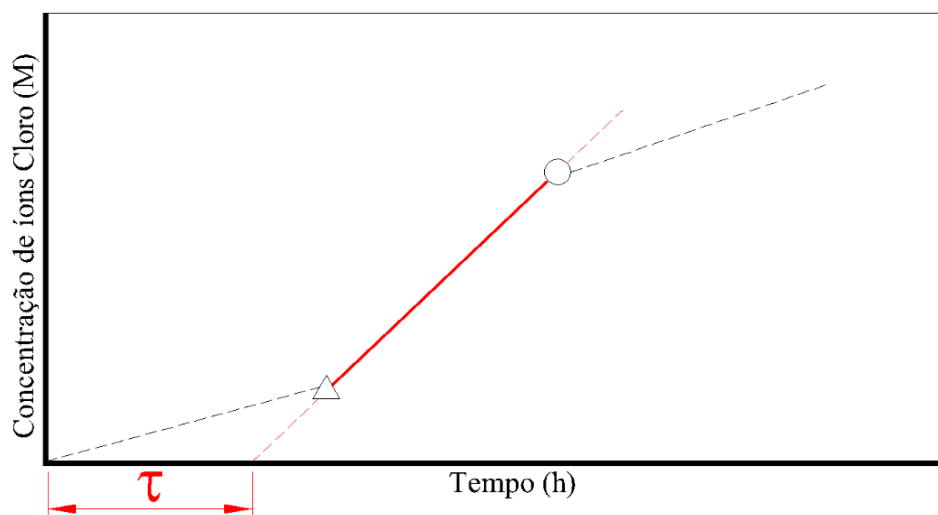
Neste estudo foram utilizados quatro corpos de prova para cada traço analisado, aos 28 dias de idade. As amostras tinham uma espessura de 20 mm, considerando que foi utilizado somente agregado miúdo na execução dos compósitos cimentícios.

De acordo com Castellote, Andrade e Alonso (2001), inicialmente há um período em que a quantidade de cloretos que passa para a célula anódica com água destilada é insignificante. Esse período, chamado de *time lag*, é o tempo necessário para que os cloretos atravessem a amostra, saturando-a.

Esse valor é importante para a determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário. Após esse período, o fluxo de íons cloreto através da amostra se torna constante, o que corresponde ao período estacionário.

O *time lag* (τ) é obtido por meio da interseção entre o prolongamento da reta que caracteriza o regime estacionário e o eixo do tempo, como mostrado no esquema da Figura 55.

Figura 55 – Esquema do gráfico obtido no ensaio de migração de cloretos, bem como a determinação do *time lag* (τ); início (Δ) e fim ($\circ$) do estado estacionário de difusão.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O cálculo do coeficiente de difusão no estado estacionário, também denominado de coeficiente de difusão efetivo, a partir de ensaios de migração, é efetuado através da equação de Nerst-Plank modificada (Equação 14):

$$D_s = \frac{J_{cl}RTl}{zFC_{cl}Y\Delta\Phi} \quad (14)$$

Sendo:

D_s = coeficiente de difusão no estado estacionário (cm^2/s);
 J_{cl} = fluxo de íons ($\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$);
 R = constante de gases ($1,9872 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$);
 T = temperatura (K);
 l = espessura do corpo de prova (cm);
 z = valência dos íons (para cloretos = 1);
 F = constante de Faraday ($23063 \text{ cal}/(\text{volt} \cdot \text{eq})$);
 C_{cl} = concentração de íons cloreto na célula catódica (mol/cm^3);
 Y = coeficiente de atividade da solução da célula catódica (0,657 para o Cl^-);
 $\Delta\Phi$ = média da tensão que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado estacionário (V).

O fluxo dos íons cloreto (J_{cl}) é calculado utilizando a inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos na célula anódica versus tempo, obtido a partir do ensaio de migração (Figura 55), e é representado pela Equação 15 (CALLISTER JR, 2010).

$$J_{cl} = \frac{1}{A} * \frac{dC}{dt} \quad (15)$$

Sendo:

A = área da seção do corpo de prova exposta (cm²);

$\frac{dC}{dt}$ = inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos versus tempo.

É necessário converter os resultados obtidos para valores equivalentes aos obtidos em ensaios de difusão natural, para calcular o coeficiente de difusão no estado não estacionário, a partir de ensaios de migração (RIBEIRO, 2010).

O tempo que os íons cloreto teriam levado para atingir, durante o ensaio de difusão natural, a mesma profundidade alcançada durante o ensaio de migração acelerada, t_{dif} , pode ser calculado pela Equação 16, proposta por Castellote, Andrade e Alonso (2001).

$$\frac{1}{t_{dif}} = \frac{6}{\tau v^2} \cdot \left[v \cdot \coth \frac{v}{2} - 2 \right] \quad (16)$$

Sendo:

t_{dif} = tempo equivalente na difusão (s);

τ = *time lag* do ensaio de migração (s);

$v = \frac{ze\Delta\Phi}{kT}$;

k = constante de Boltzmann (1,38.10⁻²³ J/K);

T = temperatura (K);

e = carga do elétron (1,6.10⁻¹⁹ C);

z = valência dos íons (para cloretos = 1);

$\Delta\Phi$ = média da tensão que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado não estacionário (V).

O coeficiente de difusão do estado não estacionário, D_{ns} , é calculado a partir da Equação 17.

$$D_{ns} = \frac{l^2}{3t_{dif}} \quad (17)$$

Com a combinação entre as duas equações apresentadas acima (16 e 17), chega-se à equação direta (Equação 18):

$$D_{ns} = \frac{2l^2}{\tau v^2} \cdot \left[v \cdot \coth \frac{v}{2} - 2 \right] \quad (18)$$

3.5.4 Difusão de cloretos

A obtenção do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário baseia-se no ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário realizado conforme a NT BUILD 492:2011.

Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm, que foram posteriormente cortados em quatro partes iguais de 10 x 5 cm, utilizando-se as duas amostras centrais para o ensaio.

As amostras passaram por um processo de limpeza em água corrente e, com as superfícies secas, passaram pelo processo de condicionamento, conforme apresentado na Figura 56.

As amostras foram colocadas em um recipiente a vácuo com as suas faces expostas a uma pressão interna entre 1 e 5 KPa. O vácuo foi mantido por três horas e, posteriormente, o recipiente contendo as amostras foi preenchido com uma solução de $Ca(OH)_2$ (hidróxido de cálcio dissolvido em água destilada), até que as amostras ficassem totalmente imersas. O vácuo foi mantido no recipiente por mais (20 ± 2) h, buscando garantir a saturação dos poros do compósito com a solução.

Figura 56 – Precondicionamento das amostras.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em seguida as amostras foram posicionadas na base de um aparato (Figura 57) e vedou-se a parte inferior e superior das mesmas em contato com o aparato com um selante de silicone a fim de evitar vazamentos das soluções pelas bordas da amostra.

Figura 57 – Amostras posicionadas nos aparatos.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Foram posicionadas duas placas de aço inox nas extremidades da amostra para proporcionar a aplicação da diferença de potencial necessária à execução do ensaio. A placa de aço inox superior apresenta perfurações ao longo da seção para permitir o contato da solução com o compósito cimentício. A placa de aço inox inferior conta com suportes de plástico aderidos, buscando, assim, garantir um espaço suficiente para a solução catódica entrar em contato com a amostra. O conjunto formado por aparato/amostra foi posicionado sobre um suporte com inclinação de 30° e levados a um recipiente plástico. Na Figura 58 está apresentado o conjunto aparato/amostra posicionado sobre o suporte com inclinação de 30° .

Figura 58 – Aparato/amostra posicionado sobre o suporte com inclinação de 30°.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Cada procedimento de ensaio de difusão de cloretos foi composto por quatro amostras de um mesmo traço simultaneamente. Os quatro aparatos foram posicionados em um recipiente plástico contendo solução catódica de 10% de cloreto de sódio em massa de água (100 g de *NaCl* para cada 900 g de água), e cada aparato contendo a amostra foi preenchido com uma solução anódica de hidróxido de sódio em água destilada (1,2 g de *NaOH* para cada 100 g de água).

Em seguida foi feita a conexão em paralelo de todos os aparatos, ou seja, os cátodos foram ligados ao polo negativo e os ânodos ao polo positivo da fonte de corrente contínua, a qual foi ajustada inicialmente para 30 Volts. A fonte de corrente contínua utilizada nesse ensaio é da marca Icel, modelo *Regulated DC Power Supply PS – 5000*. Com o uso de um multímetro digital, foi medida a corrente inicial em cada amostra, e, em função dessa corrente inicial, o valor da tensão foi ajustado, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Tensões e correntes de referência para o ensaio de difusão de cloretos no estado não estacionário.

Corrente inicial 130V (com 30V) (mA)	Tensão aplicada U (depois do ajuste) (V)	Provável nova corrente inicial (mA)	Duração de ensaio (h)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: Adaptada de NT BUILD 492:2011.

O valor da nova corrente (corrente inicial) para todas as amostras e a temperatura inicial da solução anódica foi medida. Ao final do período de ensaio, conforme a Tabela 23, foi medida novamente a corrente elétrica (corrente final) e a temperatura final da solução. Na Figura 59 está apresentada uma foto do ensaio em andamento.

Figura 59 – Ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário em andamento.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Após o processo de difusão de cloretos (período de ensaio conforme a Tabela 23), as amostras foram rompidas à tração por compressão diametral, e foi aspergida na superfície fraturada da amostra uma solução de nitrato de prata ($AgNO_3$) 0,1 M. A aspersão de nitrato de prata foi realizada para possibilitar a medição da frente de penetração de cloretos, pois, ao entrar em contato com o cloreto impregnado no compósito cimentício, esse produto reage quimicamente formando o cloreto de prata ($AgCl$). Foi medida a frente de penetração de cloretos pelo contraste visual formado na superfície da amostra, em que a parte que contém cloretos se torna mais clara. Na Figura 60 está apresentado um corpo de prova submetido ao processo de leitura da frente de penetração de cloretos.

Figura 60 – Frente de penetração de cloretos nas amostras.



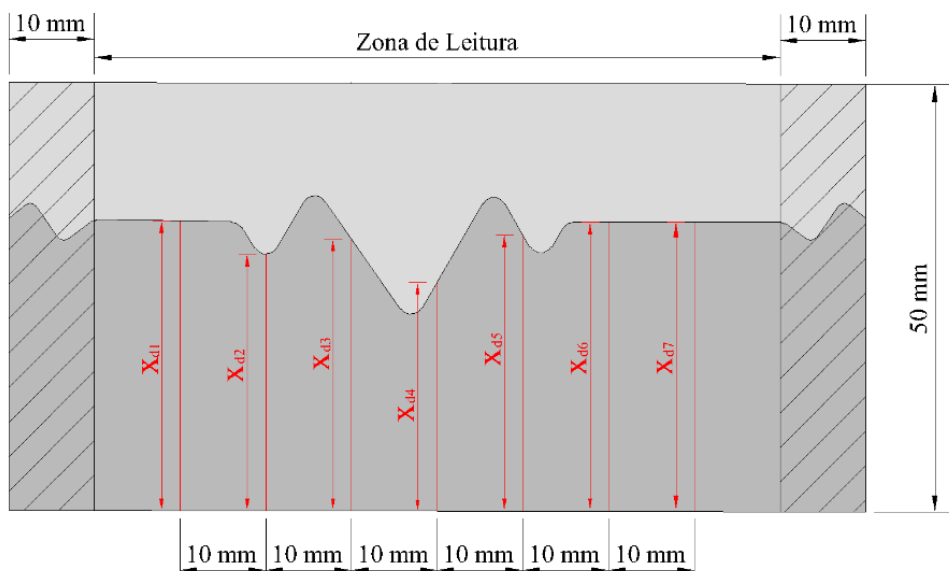
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

De acordo com o preconizado na NT BUILD 492:2011, as leituras da frente de penetração de cloretos devem ser realizadas do centro para ambas as extremidades em intervalos de 10 mm, sendo realizadas sete medições. A norma destaca ainda que não se deve fazer medição na zona

de aproximadamente 10 mm da borda devido a um grau não homogêneo de saturação, ou possível vazamento.

Na Figura 61 está apresentado o esquema do procedimento indicado pela NT BUILD 492:2011 para a realização da medição da frente de penetração de cloretos.

Figura 61 – Procedimento indicado para a medição da frente de penetração de cloretos.



Fonte: Adaptada de NT BUILD 492:2011.

Com os dados obtidos na realização do ensaio foi possível calcular o coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário, de acordo com a Equação 19.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(Xd - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)LXd}{U-2}} \right) \quad (19)$$

Sendo:

D_{nssm} = coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);

U = valor da tensão (V);

T = média entre as temperaturas finais e iniciais ($^{\circ}\text{C}$);

t = duração do ensaio (h);

L = espessura do corpo de prova (mm);

Xd = média da frente de penetração de cloretos (mm).

Com base nos coeficientes de migração de cloretos das amostras e os critérios fornecidos na Tabela 24, uma classificação sistemática dos diferentes compósitos cimentícios pode ser feita.

Tabela 24 – Resistência à penetração de cloretos de vários tipos de compósitos cimentícios baseada na difusão de cloretos aos 28 dias de idade.

Difusão de cloretos ($D_{ns,28} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Classificação da resistência à penetração de cloretos
> 15	Baixo
10 a 15	Moderado
5 a 10	Alto
2,5 a 5	Muito alto

Tabela 24 – Resistência à penetração de cloretos de vários tipos de compósitos cimentícios baseada na difusão de cloretos aos 28 dias de idade (continuação).

Difusão de cloretos ($D_{ns,28} \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	Classificação da resistência à penetração de cloretos
< 2,5	Extremamente alto

Fonte: Nilsson² (1998 apud Teng, Afroughsabet e Ostertag, 2018).

3.5.5 Efeito combinado de difusão de cloretos com carbonatação acelerada

O estudo do efeito combinado de carbonatação acelerada e difusão de cloretos foi realizado através desses dois ensaios individualmente, seguido um do outro. Ou seja, primeiramente as amostras passaram pelo ensaio de difusão de cloretos (de acordo com o item 3.5.4) e posteriormente foram submetidas à exposição de CO_2 (conforme o item 3.4.9).

Foram moldados dois corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para cada traço e após 28 dias de cura estes foram cortados em quatro partes iguais de 10 cm de diâmetro por 5 cm de altura, utilizando-se para os ensaios as duas amostras centrais.

As amostras foram submetidas ao ensaio de difusão de cloretos (ou migração de cloretos no estado não estacionário). Em seguida as amostras foram condicionadas até ocorrer a estabilização da umidade interna. Posteriormente, foram levadas à câmara de carbonatação acelerada onde permaneceram até a idade do ensaio (365 dias).

3.5.6 Resistividade elétrica

A durabilidade do compósito cimentício pode ser associada com parâmetro de resistividade elétrica. A resistividade elétrica juntamente com a disponibilidade de oxigênio controla o processo eletroquímico de corrosão das armaduras no concreto (SILVA, 2019).

A resistividade é função direta da umidade, permeabilidade e propriedades eletroquímicas do concreto (RIBEIRO *et al.*, 2014).

A condução da corrente elétrica através do concreto ocorre por meio de poros contínuos e microfissuras presentes no compósito e preenchidas com água.

Na Tabela 25 estão apresentados os valores de resistividade elétrica indicativos da probabilidade de corrosão nas estruturas de concreto, baseados na norma CEB – 192 e no boletim europeu CE – COST 509.

Tabela 25 – Valores de resistividade elétrica com indicativos da probabilidade de corrosão do concreto, segundo CEB – 192 e o boletim europeu COST 509.

Resistividade ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$)		Risco de corrosão
CEB – 192	COST 509	
> 20	> 100	Desprezível
10 a 20	50 a 100	Baixo
-	10 a 50	Moderado

² NILSSON, L.; NGO, M. H.; GJØRV, O. E. High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg. In: **Second international conference on concrete under severe conditions: environment and loading**. 1998. p. 1193-1198.

Tabela 25 – Valores de resistividade elétrica com indicativos da probabilidade de corrosão do concreto, segundo CEB – 192 e o boletim europeu COST 509 (continuação).

Resistividade (k Ω .cm)		Risco de corrosão
CEB – 192	COST 509	
5 a 10	< 10	Alto
< 5	-	Muito alto

Fonte: Ribeiro *et al.*, 2014.

A resistividade elétrica dos compósitos cimentícios foi determinada por meio do método da resistividade elétrica volumétrica (método de dois eletrodos). Proporcionou-se uma corrente contínua de 12 Volts. Através de multímetros digitais mediu-se a corrente elétrica e a diferença de potencial elétrico produzidos. Foram ensaiados três corpos de prova para cada traço, sendo realizadas duas leituras por corpo de prova, totalizando seis leituras por traço. Os ensaios foram realizados aos 2 dias, 7 dias, 28 dias, 91 dias, 180 dias e 230 dias de idade.

O ensaio foi executado de acordo com a AASHTO TP 119:2018. Nesse método de ensaio, um conjunto de placas de aço inoxidável foi utilizado como eletrodos, entre os quais a amostra de compósito cimentício foi colocada. Em seguida, uma corrente elétrica foi aplicada às placas e a diferença de potencial elétrico correspondente foi medida. Sendo assim, a corrente elétrica passou por toda a extensão do corpo de prova, ou seja, da base ao topo. Na Figura 62 está apresentado o ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento.

Figura 62 – Ensaio de resistividade elétrica volumétrica em andamento.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os corpos de prova foram retificados antes da realização do ensaio, buscando proporcionar um maior contato entre a amostra de compósito cimentício e os eletrodos. As amostras estavam na condição saturada com superfície seca, pois permaneceram imersas numa solução de cal hidratada até o momento do ensaio. Além disso, almejando um bom contato elétrico entre os eletrodos e o corpo de prova foi utilizado um papel filtro saturado na mesma solução de cal hidratada. Conforme recomendado pela norma AASHTO TP 119:2018, a resistividade elétrica do papel filtro também foi medida, no entanto se tornou desprezível por ser muito menor do que a obtida pelas amostras de compósitos cimentícios.

Com os dados de corrente elétrica e tensão obtidos no ensaio, e através da lei de Ohm, foi possível obter o valor da resistência elétrica, conforme a Equação 20.

$$R = \frac{V}{i} \quad (20)$$

Sendo:

R = resistência elétrica (Ω);

V = diferença de potencial elétrico (V);

i = corrente elétrica (A).

Já o valor da resistividade elétrica volumétrica foi obtido através da Equação 21.

$$\rho = R_{cilindro} \frac{A}{L} \quad (21)$$

Sendo:

ρ = resistividade elétrica volumétrica do compósito cimentício ($\Omega \cdot \text{cm}$);

$R_{cilindro}$ = resistência elétrica (Ω);

$\frac{A}{L}$ = fator referente à geometria do corpo de prova de compósito cimentício, no caso desta pesquisa equivale ao valor 4;

A = área da seção transversal (cm^2);

L = comprimento do corpo de prova (cm).

A AASHTO TP 119:2018 estabeleceu uma classificação quanto à penetração de íons cloreto baseada nos valores da resistividade elétrica volumétrica, cujos valores estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Classificação dos valores de resistividade elétrica volumétrica quanto à penetração de íons cloreto.

Classificação quanto à penetração de íons cloreto	Resistividade uniaxial ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$)
Alta	< 5,2
Moderada	5,2 – 10,4
Baixa	10,4 – 20,8
Muito baixa	20,8 – 207
Insignificante	> 207

Fonte: AASHTO TP 119:2018.

3.5.7 Condutividade elétrica e pH dos compósitos cimentícios

A condutividade elétrica determina a facilidade de um material em conduzir a corrente elétrica, ou seja, é a propriedade inversa da resistividade elétrica. A condutividade elétrica é influenciada grandemente pela composição da solução de água de poros, a qual depende da composição química dos materiais constituintes do compósito cimentício, como, por exemplo, do tipo de cimento, das adições, dos agregados e aditivos (MORETTI, 2018).

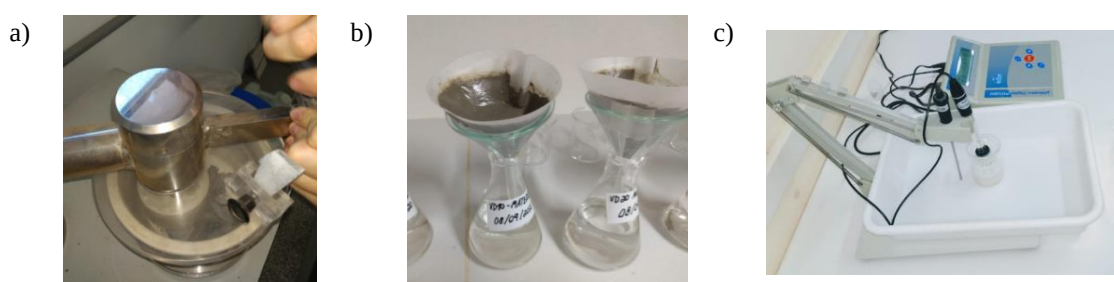
O pH da solução de água de poros dos materiais cimentícios é altamente alcalino (cerca de 12,5) e essa elevada alcalinidade é responsável por passivar e manter a proteção do aço no interior do concreto. A utilização de novos materiais na composição de matrizes cimentícias pode alterar essas propriedades. Dentro desse contexto, nesse trabalho verificou-se a influência da utilização do pó de vidro na condutividade elétrica e no pH dos compósitos cimentícios.

Após um período de cura de 180 dias, corpos de prova foram secos em estufa a temperatura de 100°C, e com o auxílio de um moinho de bolas (Figura 63a) foi transformado em pó.

O material extraído foi peneirado (malha 0,075 mm), homogeneizado e as soluções foram preparadas a partir de uma proporção de 3:10 (massa de material: massa de água deionizada).

As soluções foram mantidas em agitação constante por 2 horas e filtradas em seguida (Figura 63b). Após a obtenção das soluções, determinou-se a condutividade elétrica e o pH das soluções (Figura 63c).

Figura 63 – Extração do pó dos compósitos cimentícios (a), filtragem da solução (b), medida de pH (c).



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Foi utilizado um pHmetro digital microprocessado modelo PG1800 do fabricante GEHAKA e um condutivímetro digital portátil tipo caneta modelo CD-880 da marca *Instrutemp*.

Foram avaliados os traços REF (0% de pó de vidro) e VD50 (50% de substituição de cimento Portland por pó de vidro).

3.5.8 Condutividade elétrica e pH das soluções da água de poro

Para preparar soluções que simulam a composição da água de poro dos compósitos cimentícios utilizou-se o procedimento para a extração dos compostos solúveis da fase argamassa (SCHRÖFL; SNOECK; MECHTCHERINE, 2017).

Realizou-se a mistura dos materiais secos (cimento, sílica ativa, pó de vidro e agregado miúdo) correspondentes aos traços de referência e os traços VD10, VD20, VD30 e VD50 na proporção de 3:10 (materiais secos: água).

Na Tabela 27 as quantidades de materiais utilizados podem ser visualizadas.

Tabela 27 – Proporção de materiais utilizados para a obtenção das soluções de água de poro.

Traços	Água (g)	Cimento (g)	Sílica ativa (g)	Pó de vidro (g)	Agregado miúdo (g)
REF	107,7	15,0	1,2	0,0	16,1
VD10	106,9	13,5	1,2	1,2	16,1
VD20	105,9	12,0	1,2	2,4	16,1
VD30	105,0	10,5	1,2	3,6	16,1
VD50	103,2	7,5	1,2	6,1	16,2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As soluções foram mantidas em agitação constante por 2 horas e filtradas em seguida. Após a obtenção das soluções, foram determinados a condutividade elétrica e o pH.

O potencial hidrogeniônico das soluções foi determinado utilizando um pHmetro da DENVER INSTRUMENT (UB-10) e a condutividade iônica das soluções foi determinada com o auxílio de um condutivímetro da ANALION (C708).

3.5.9 Potencial de corrosão do aço em compósito cimentício

A técnica do potencial de corrosão é bastante utilizada em pesquisas que avaliam o processo corrosivo em concreto armado.

A técnica indica se é ou não possível e quais as possibilidades de ocorrência da corrosão. Essa técnica está relacionada, principalmente, à difusividade de íons através dos poros do concreto.

As barras de aço utilizadas no ensaio de potencial de corrosão foram do tipo CA-60 com 5 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, submetidas a um processo de limpeza para retirada do filme de óxidos presente em sua superfície.

Esse procedimento foi desenvolvido conforme o recomendado pela norma ASTM G1/2003 conforme segue:

- Imersão da barra em uma solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/l de hexametenotetramina por 10 minutos para a remoção dos óxidos presentes, sem atacar o metal;
- Lavagem e escovação das barras em água corrente com a utilização de uma escova com cerdas plásticas para remoção final dos óxidos;
- Imersão das barras em acetona por dois minutos para retirada de elementos gordurosos e facilitar a evaporação da água e;
- Secagem das barras.

Na Figura 64 observa-se o processo de limpeza das barras utilizadas.

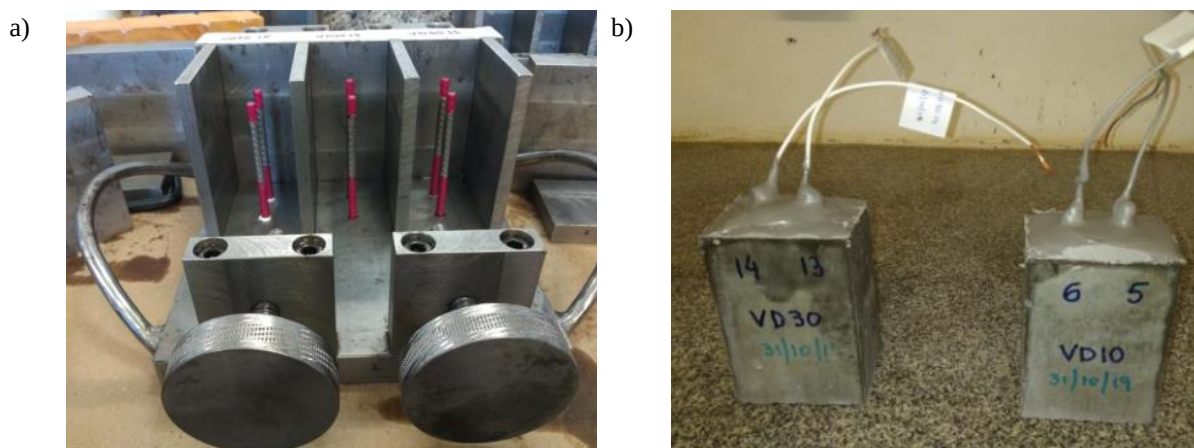
Figura 64 – Barras em solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/l de hexametenotetramina.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As barras foram pesadas em uma balança analítica com precisão de 0,01g. Em seguida, fez-se a delimitação com esmalte (para unhas) da área na barra a ser exposta ao ataque do agente agressivo, como pode ser visto na Figura 65a. As barras foram posicionadas de forma que a área exposta estivesse localizada na região central dos corpos de prova, como pode ser visto na Figura 65b.

Figura 65 – a) Delimitação da área de exposição da barra; b) Posicionamento da barra no corpo de prova.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os corpos de prova foram moldados em duas camadas e adensados com o uso da mesa vibratória. Após 48 horas, os corpos de prova foram desmoldados e fios flexíveis foram conectados às barras e envolvidos em fita isolante para a realização das medidas eletroquímicas. Em seguida, a face superior dos corpos de prova foi revestida com resina epóxi para garantir a proteção da parte externa das barras e para a delimitação da superfície de exposição do compósito cimentício.

Após desmoldagem, os corpos de prova prismáticos (5 x 7 x 9 cm) foram submetidos a um período de cura em água, que durou 28 dias.

A verificação do potencial de corrosão consiste, basicamente, em um ensaio acelerado de corrosão pela ação de cloretos.

Na presente pesquisa foi utilizada uma técnica que consistiu em ciclos de imersão parcial e secagem, metodologia adotada por Santos (2006) e por Ribeiro (2010), sendo chamada de “método de envelhecimento por ciclos”.

A célula eletroquímica utilizada para as medidas do potencial de corrosão foi composta pelo eletrodo de trabalho, a barra de aço do corpo de prova prismático e o eletrodo de Hg/HgO , utilizado como eletrodo de referência.

Antes da realização das medidas, os corpos de prova tiveram a face de leitura umidificada por meio de uma esponja molhada com uma solução de $NaCl$ a 3,5%. Para a realização das medidas o eletrodo de referência foi posicionado sobre a barra que estava sendo analisada, aproximadamente no centro da área de exposição da barra.

O contato entre o eletrodo de referência e o corpo de prova foi feito por meio de uma esponja umedecida (Figura 66).

Figura 66 – Célula eletroquímica para a medida do potencial de corrosão das barras com a colocação da esponja para umedecimento superficial, medida do potencial de corrosão da armadura no compósito cimentício, utilizando uma esponja umedecida como contato.

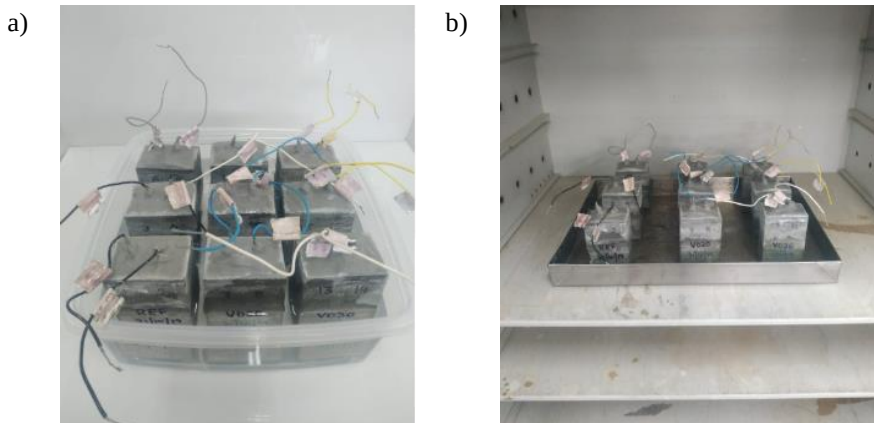


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os corpos de prova foram submetidos a semiciclos de imersão parcial em solução com 3,5% de cloreto de sódio (*NaCl*) com duração de três dias (Figura 67a) e posteriores semiciclos de secagem em estufa ventilada a 50 °C com duração de quatro dias (Figura 67b). Durante o semiciclo de imersão parcial, o nível da solução de imersão foi mantido em uma altura correspondente à metade da área exposta da barra. Nessa condição, o ingresso de cloretos ocorre inicialmente por absorção capilar, já que os corpos de prova estão inicialmente secos, e por difusão após a saturação dos poros que é acelerada devido à evaporação da água através da parte exposta do compósito cimentício (RIBEIRO, 2010).

A concentração de 3,5% de *NaCl* foi adotada por ser uma concentração próxima à apresentada pela água do mar, além de ser a concentração crítica, de acordo com o mostrado anteriormente (item 2.3.2). A concentração da solução de imersão era medida antes de iniciar cada semiciclo de umedecimento e ajustada sempre que necessário. Além disso, essa solução utilizada foi trocada por uma nova com a mesma concentração a cada quatro ciclos.

Figura 67 – Ciclo de medida do ensaio de potencial de corrosão: a) Corpos de prova parcialmente imersos em solução de *NaCl* (3,5%) durante 3 dias; b) Corpos de prova em estufa a 50 °C durante quatro dias.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao final de cada semiciclo, estufa ou imersão parcial em solução, foram medidos o potencial de corrosão (E_{corr}) e a massa dos corpos de prova.

Por meio da análise dos resultados obtidos de potencial de corrosão (E_{corr}), observa-se se a barra está em estado ativo ($E_{corr} < -132 \text{ mV}$) ou passivo ($E_{corr} > 18 \text{ mV}$) de corrosão, utilizando como referência o eletrodo de Hg/HgO .

Após a finalização do ensaio, as barras foram extraídas dos corpos de prova, limpas de acordo com procedimento descrito anteriormente e pesadas para observar a perda de massa e comparar com o valor verificado antes do início do ensaio.

A taxa de corrosão (TC) pode ser calculada, de acordo com a equação 22.

$$TC = \frac{K \cdot W}{A \cdot T \cdot D} \quad (22)$$

Sendo:

K = constante (para $TC(\mu\text{m/ano})$, $K = 8,76 \cdot 10^7$; para $TC(\text{g/m}^2 \cdot \text{ano})$, $K = 8,76 \cdot 10^7 \cdot D$);

W = perda de massa (g);

A = área de exposição (cm^2);

T = tempo de exposição (h);

D = densidade (para o aço CA-60, $D = 7,85 \text{ g/cm}^3$).

Obs.: No presente estudo, $A = 15,83 \text{ cm}^2$ e $T = 7680$ horas (320 dias).

3.6 Estudos microestruturais

3.6.1 Difratometria de raios X

Os ensaios de difratometria de raios X foram realizados de acordo com o procedimento descrito no item 3.2 para os traços REF e VD50 aos 28 dias, 91 dias e 180 dias.

3.6.2 Termogravimetria

As medidas de análise termogravimétrica foram realizadas em um STA modelo 409 Cell (Netzsch) de 25°C a 1.025°C em atmosfera de argônio, usando uma taxa de aquecimento de 10°C/min . As análises foram realizadas no LIEC da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

A variação de massa de uma amostra é monitorada durante um período de aquecimento a uma taxa controlada. A variação de massa ocorre devido às reações químicas ou alterações físicas do material. Os resultados de variação de massa e temperatura são expressos por uma curva, denominada TG. A derivada da curva TG em relação à temperatura gera a curva DTG, onde é possível identificar as temperaturas limites das reações e pode-se extrair informações sobre a estabilidade térmica dos materiais.

A análise termogravimétrica foi realizada com base nas diretrizes gerais da ASTM E794/2006. Os ensaios foram realizados para os traços REF e VD50 aos 28 dias.

3.6.3 Microscopia eletrônica de varredura

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas de acordo com procedimento descrito no item 3.2 para as amostras REF e VD50 aos 28 dias e 91 dias.

3.6.4 Tomografia computadorizada

O grande desafio para o monitoramento de estruturas de concreto por meio de testes ultrassônicos e análise de imagens consiste em coletar, organizar e extrair dados dos testes para apoiar uma correta percepção desse tipo de estrutura. Os métodos podem ser considerados como uma das abordagens mais promissoras para avaliação de estruturas de concreto, uma vez que torna possível um exame da homogeneidade do material (LORENZI, 2020).

A técnica de microtomografia permite a reconstrução tridimensional de diferentes amostras, com o intuito de revelar detalhes sobre forma e composição das estruturas internas do material, em escala micrométrica ou submicrométrica. O ensaio de tomografia foi realizado no Centro Nacional de Pesquisas em Energia e Materiais (CNPEM) – LNNano em Campinas em um microtomógrafo de raios X, MicroCT SkyScan (Bruker) 1272 que pode ser visualizado na Figura 68.

Figura 68 – Equipamento utilizado no ensaio de tomografia computadorizada de raios X.

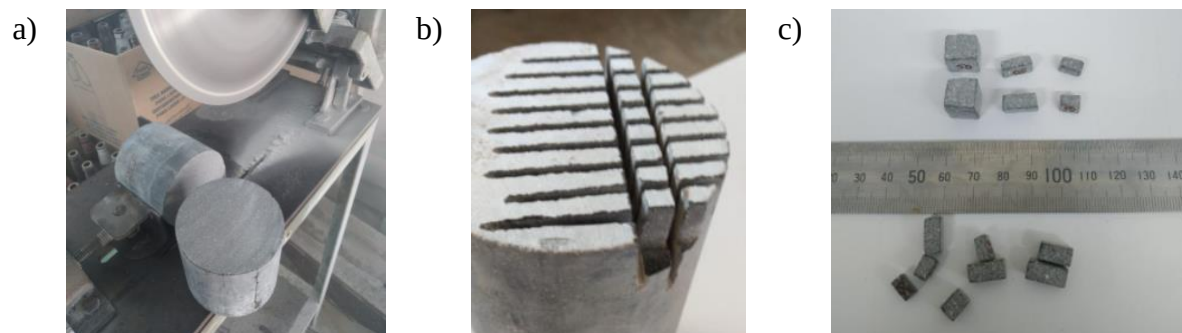


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O equipamento possui uma fonte de raios X de 20 a 100 kV e um detector de 16 *megapixels* (4904×3280 *pixels*). Utilizando a resolução máxima da câmera, é possível resolver estruturas de até 350 nm (nanômetros). As dimensões da amostra podem chegar a 75 mm de diâmetro e 70 mm de comprimento. É ideal para a análise de amostras biológicas, geológicas, componentes e dispositivos eletrônicos, materiais compósitos, produtos industriais, entre outros.

A medição foi realizada em ambiente com temperatura controlada na faixa de $(20 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$. Após 365 dias de cura as amostras de compósitos cimentícios foram secas em estufa à temperatura de $(50 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ até constância de massa. Após a secagem, o ensaio de tomografia foi realizado nas amostras cúbicas obtidas a partir da amostra cilíndrica (Figura 69).

Figura 69 – Corpos de prova utilizados no ensaio de tomografia de raios X; a) Amostra cilíndrica; b) Obtenção das amostras prismáticas; c) Amostras cúbicas e prismáticas.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os parâmetros utilizados no ensaio de tomografia estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Parâmetros utilizados no ensaio de tomografia.

Parâmetros	Amostras cúbicas
Corrente elétrica aplicada	166 μA
Faixa de resolução	10-900 μm
Incremento angular	0,400°
Tempo de exposição	2,2s
Tensão elétrica aplicada	60 kV

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Após o ensaio de tomografia, os dados gerados foram exportados para o software *VGStudio MAX 3.4.3* onde o volume virtual de pontos foi alinhado nos eixos x, y e z e os limites de superfície foram delimitados, para cálculo da porosidade (licença *trial* para uso). A detecção foi realizada com um mínimo de 4 voxels e máximo de 1.000.000 voxels. Dessa forma, foram identificados os vazios no interior da amostra, e então foram obtidos os dados referentes à contagem desses vazios e suas respectivas dimensões.

Por meio da tomografia foi possível realizar uma análise semi-quantitativa e qualitativa dos compósitos cimentícios produzidos com diferentes teores de pó de vidro. Também foi possível verificar a diferença de densidade das amostras e detectar anomalias.

3.7 Análise estatística dos resultados

Os dados dos ensaios em compósitos cimentícios foram analisados utilizando-se a Análise de Variância (ANOVA), metodologia utilizada para comparar três ou mais tratamentos. Os dados que apresentaram diferença significativa foram submetidos ao teste de Tukey.

O método da ANOVA realiza um teste estatístico para verificar se há diferença na distribuição de um valor entre três ou mais grupos. Realiza-se através da decomposição da soma dos quadrados para cada fonte de variação no modelo. A partir do teste F de Fisher-Snedecor, testa-se a hipótese de que não há fonte de variação entre as amostras.

As hipóteses são as seguintes:

H_0 – Não existe diferença estatisticamente significativa;

H_1 – Há pelo menos um valor estatisticamente diferente.

Compara-se também o valor-p com o α (adotado neste trabalho como sendo de 5%):

Se valor-p $\geq \alpha$, aceita-se H_0 (não existem diferenças estatísticas significativas);

Se valor-p $< \alpha$, rejeita-se H_0 (há diferenças estatísticas significativas).

Para os casos onde H_0 foi rejeitado realizou-se o teste de Tukey utilizando o software de análises estatísticas Past.

Os resultados completos da análise estatística estão apresentados nos Apêndices.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

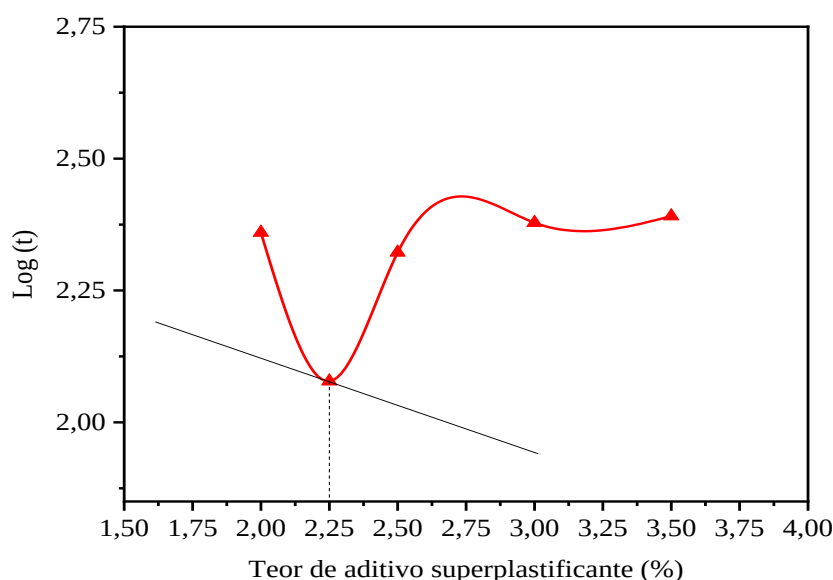
Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos em pasta, definição dos traços, estudos em compósitos cimentícios, estudos relacionados à durabilidade frente à ação de cloretos, estudos microestruturais, incluindo as devidas análises estatísticas, obtidos nesta pesquisa.

4.1 Estudos em pasta

4.1.1 Cone de Marsh

Na Figura 70 observa-se a curva resultante do ensaio do cone de Marsh, avaliando o conteúdo do superplastificante entre 2,0% e 3,5%. De acordo com o ensaio realizado, o conteúdo de superplastificante de 2,25% foi considerado ideal.

Figura 70 – Teor ótimo de superplastificante.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O teor de 2,25% de superplastificante foi utilizado em todos os traços estudados (REF, VD10, VD20, VD30 e VD50) proporcionando o mesmo espalhamento para todos os traços, como verificado no item 4.2.

4.1.2 Mini abatimento

O ensaio de mini abatimento foi realizado para cada uma das pastas com incorporação de pó de vidro, utilizando o teor de 2,25% de SP adotado. Para este ensaio consideraram-se os traços com o teor de sílica ativa de 8% em relação à massa de cimento para referência: REF, VD10, VD20, VD30 e VD50. Mediram-se as áreas de espalhamento aos 10, 30, 40 e 60 minutos. Os resultados podem ser observados na Tabela 29.

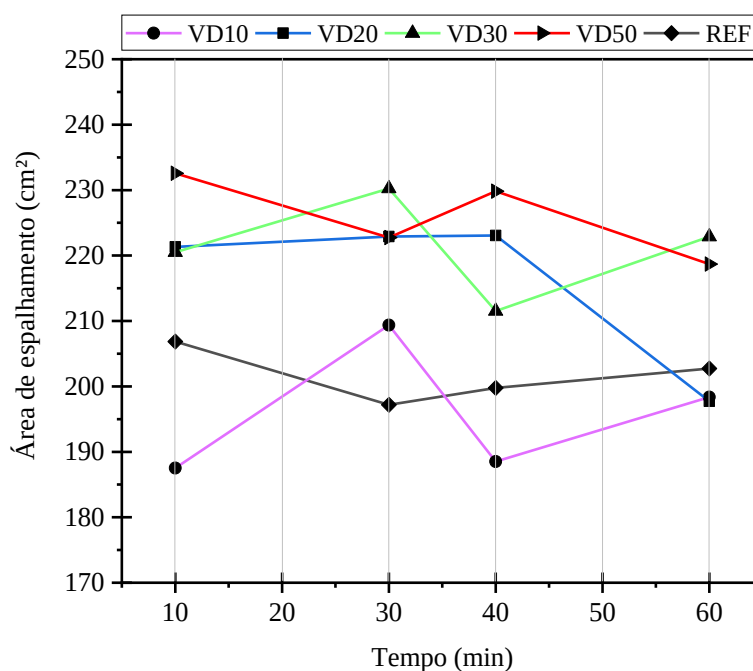
Tabela 29 – Miniabatimento dos traços com 2,25% de SP.

Pastas	Área de espalhamento (cm ²)			
	10'	30'	40'	60'
REF	206,86	197,20	199,77	202,74
VD10	187,51	209,36	188,51	198,36
VD20	221,33	222,90	223,06	197,73
VD30	220,50	230,24	211,51	222,87
VD50	232,57	222,74	229,82	218,69

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Figura 71 apresenta o gráfico com as curvas das áreas de espalhamento por tempo para cada pasta analisada.

Figura 71 – Área de espalhamento da pasta de referência e com incorporação de pó de vidro, com teor de 2,25% de superplastificante.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As pastas VD10, VD20 e VD30 apresentaram aumento na área de espalhamento nos primeiros 30 minutos após mistura de 10,4%, 0,7% e 4,2%, respectivamente. Já as pastas REF e VD50 apresentaram diminuição na área de espalhamento de 4,7% e 4,2%, respectivamente. Observando os 60 minutos de ensaio a pasta que apresentou maior queda no espalhamento foi a VD20, chegando a diminuir 10,7% na sua área da medida inicial até a última aferição.

A incorporação do pó de vidro não interferiu na trabalhabilidade do compósito cimentício estudado. As pastas VD10, VD20 e VD30 apresentaram comportamento semelhante, e a pasta VD50 semelhante à REF.

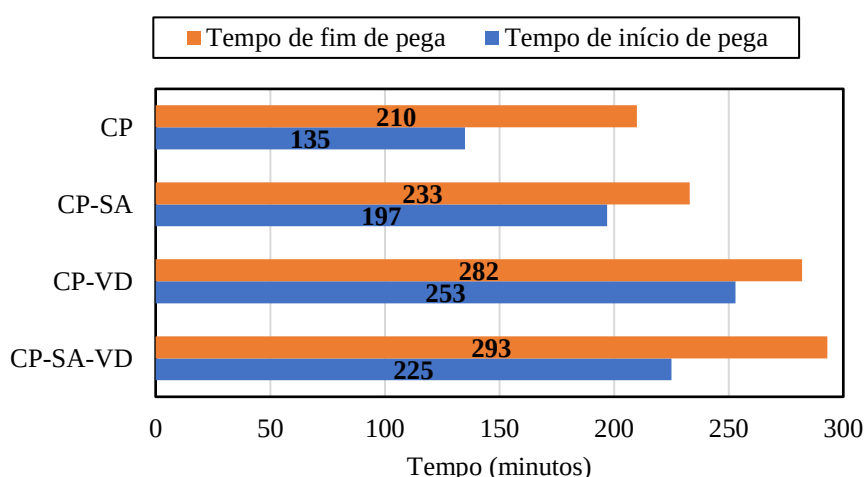
Os valores encontrados nas áreas de espalhamento não apresentaram grandes discrepâncias. Nos primeiros 30 minutos de mistura o teor que perdeu mais trabalhabilidade foi a REF, sendo a perda de 4,7%, demonstrando a compatibilidade entre cimento, pó de vidro e superplastificante.

Pan *et al.* (2017) identificaram uma significativa queda no espalhamento com o aumento do teor de pó de vidro, com substituições de 20% do cimento pelo vidro, reduzindo mais de 85% do espalhamento em relação à referência. Esse efeito foi atribuído à elevada superfície específica do pó de vidro, que retém a água por adsorção, não ficando a mesma disponível para fluidificação da pasta de cimento.

4.1.3 Tempos de pega

O ensaio de tempo de pega foi realizado para quatro pastas: CP-SA-VD (cimento CP V + 8% de sílica ativa + 50% de pó de vidro), CP-VD (cimento CP V + 50% de pó de vidro), CP-SA (cimento CP V + 8% de sílica ativa) e CP (cimento CP V). Na Figura 72, observam-se os resultados dos ensaios.

Figura 72 – Determinação dos tempos de início e fim de pega.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em relação à pasta CP, todas as outras pastas tiveram um aumento no tempo de início e de fim de pega, sendo a pasta CP-VD a que teve o maior aumento em relação à pasta de referência no tempo de início de pega, aumentando esse tempo em 118 minutos, e a que teve o maior aumento de valor para o tempo de fim de pega foi a CP-SA-VD, em 83 minutos.

Segundo Sharifi, Afshoon e Firoozjaie (2015), o aumento nos tempos de início e fim de pega pode ser atribuído ao aumento da água livre nos poros, à textura mais lisa do pó de vidro em relação ao cimento e à baixa absorção de água pelo pó de vidro.

Destaca-se que nos traços estudados nesta pesquisa, a relação água/aglomerante utilizada na mistura é muito baixa e a água livre nos poros é diminuída, sendo a água disponível utilizada nas reações de hidratação dos aglomerantes.

4.2 Definição dos traços

Na Tabela 30 os traços unitários e os índices de consistência dos compósitos cimentícios podem ser observados.

Tabela 30 – Traço unitário e índice de consistência dos compósitos cimentícios estudados.

Traços	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	Água	Superplastificante	Redutor de retração	Consistência (mm)
REF	1	0,080	0,000	1,070	0,194	0,020	0,010	380,000
VD10	1	0,089	0,090	1,193	0,216	0,027	0,012	377,000
VD20	1	0,100	0,201	1,343	0,243	0,030	0,014	375,500
VD30	1	0,114	0,346	1,535	0,278	0,035	0,015	381,500
VD50	1	0,160	0,810	2,150	0,389	0,049	0,022	384,500

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Analisando-se os resultados, é possível observar que todas as consistências ficaram acima do mínimo adotado de (310 ± 10) mm. A diferença entre os traços com incorporação de pó de vidro e o traço referência variou de 0,9% a 3,2%.

A incorporação de pó de vidro e a manutenção da sílica ativa em 8% (em massa): traços VD10, VD20, VD30 e VD50 não alteraram de maneira significativa a consistência da mistura, quando comparada com a referência, resultado que foi confirmado nos estudos de Salvador Filho *et al.* (2017).

Em geral, pode-se concluir que a incorporação de pó de vidro melhora a trabalhabilidade da mistura, principalmente devido a um aumento na eficiência da relação água/cimento, devido à diminuição da quantidade de cimento com o aumento do teor de pó de vidro e a insignificante absorção de água pelo pó de vidro (SHARIFI; AFSHOON; FIROOZJAIE, 2015).

Quando o cimento que tem superfície específica de $665 \text{ m}^2/\text{kg}$ é substituído por pó de vidro com superfície específica de $393 \text{ m}^2/\text{kg}$, a superfície específica total da mistura diminui. Para 10% e 20% de incorporação de pó de vidro a diminuição na superfície específica é de 5,3% e 11,9%, respectivamente. Para 30% e 50% a diminuição é de 20,5% e 47,6%, respectivamente. Consequentemente, a quantidade de água necessária para hidratar as superfícies das partículas diminui, tanto mais quanto maiores são os teores de incorporação de pó de vidro, levando a um aumento da trabalhabilidade para uma mesma relação água/aglomerante.

Esse aumento de fluidez fica bastante evidente no estudo de Soliman e Tagnit-Hamou (2017), que substituíram sílica ativa ($22.000 \text{ m}^2/\text{kg}$) por pó de vidro fino ($10.000 \text{ m}^2/\text{kg}$), com d_{50} igual a $3,8 \mu\text{m}$, em CUAD. Outra explicação para o aumento da trabalhabilidade com o aumento do teor de pó de vidro é a diluição do cimento, que tende a reduzir a formação de produtos de hidratação do cimento nos primeiros minutos de mistura (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016).

Lee *et al.* (2018b) substituíram cimento por 20% de pó de vidro e observaram o aumento da trabalhabilidade da mistura, atribuindo esse comportamento à menor superfície específica e ao formato das partículas de pó de vidro.

A pequena variação da consistência observada neste trabalho pode ser atribuída à superfície específica e à baixa absorção de água pelas partículas de pó de vidro. A água antes absorvida pelas partículas mais porosas de cimento com a substituição fica disponível para fluidificação da mistura. Entretanto, a superfície lisa das partículas de pó de vidro pode assimilar a água da mistura por adsorção, retardando a distribuição da água entre as partículas. A combinação desses efeitos faz com que as misturas contendo pó de vidro comportem-se de maneira semelhante à mistura de referência.

4.3 Estudo em compósitos cimentícios

4.3.1 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados de densidade de massa e do teor de ar incorporado no compósito cimentício no estado fresco podem ser observados na Tabela 31.

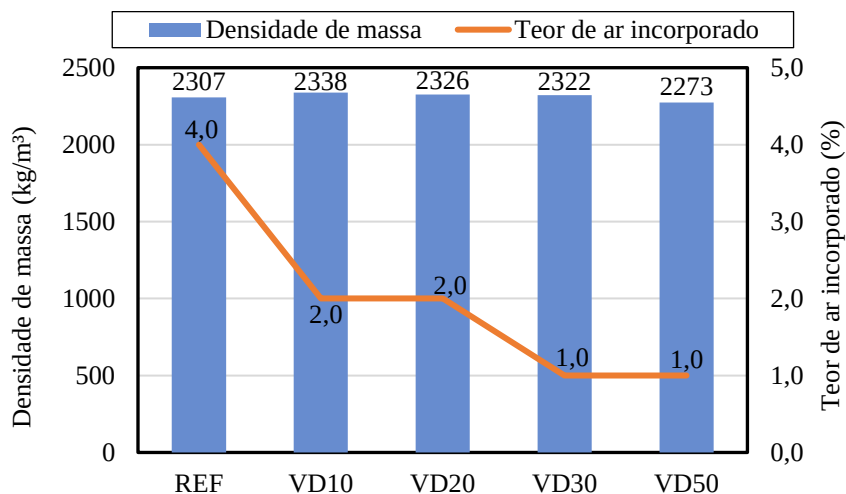
Tabela 31 – Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.

Traço	Densidade de massa (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
REF	2307,28	4,0
VD10	2337,93	2,0
VD20	2325,67	2,0
VD30	2322,48	1,0
VD50	2273,44	1,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 73 podem-se observar os valores de densidade de massa e teor de ar incorporado, para os traços avaliados.

Figura 73 – Gráfico com os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os valores de densidade de massa dos compósitos cimentícios VD10, VD20 e VD30 são maiores que o valor para REF, diferença em torno de 1%. A densidade do compósito com substituição de 50% de cimento Portland por pó de vidro diminuiu em relação à referência (1,47%).

Em relação ao teor de ar incorporado, pode ser observada a diminuição do teor de ar incorporado com o aumento do teor de pó de vidro na mistura. Isso pode ser atribuído ao aumento no teor de água livre na mistura, devido à baixa absorção de água pelo pó de vidro e também ao efeito fíler, que representa a melhor capacidade de preenchimento das partículas de vidro na mistura (SHARIFI; AFSHOON; FIROOZJAIE, 2015).

4.3.2 Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos de absorção de água por capilaridade para 7 dias, 28 dias e 180 dias ao final das 72 horas de ensaio podem ser observados na Tabela 32 para corpos de prova submetidos à cura úmida.

Tabela 32 – Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios (g/cm²).

Período		Traços				
		REF	VD10	VD20	VD30	VD50
7 dias	Média (g/cm ²)	0,099	0,108	0,121	0,141	0,134
	DP (g/cm ²)	0,01	0,008	0,011	0,007	0,005
	CV (%)	10,29	7,41	9,31	5,07	3,84
	Diferença significativa em relação ao REF	NÃO	NÃO	SIM	SIM	
28 dias	Média (g/cm ²)	0,079	0,077	0,092	0,091	0,088
	DP (g/cm ²)	0,008	0,007	0,007	0,003	0,02
	CV (%)	10,4	8,86	7,83	2,92	23,06
	Diferença significativa em relação ao REF	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	
180 dias	Média (g/cm ²)	0,126	0,149	0,143	0,163	0,158
	DP (g/cm ²)	0,006	0,011	0,006	0,005	0,006
	CV (%)	4,68	7,18	4,34	3,2	3,91
	Diferença significativa em relação ao REF	SIM	NÃO	SIM	SIM	

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

É de se esperar que partículas finas preencham fisicamente os poros capilares, reduzindo a absorção capilar. No entanto, esse comportamento não foi observado nos compósitos cimentícios com idade de sete dias submetidos à cura úmida, onde a absorção de água de VD50 ao final do ensaio foi maior que o REF em 35%, devido ao menor teor de cimento na mistura. Outro fato importante é que a altura de ascensão da lâmina de água foi menor que 1 mm para todos os traços.

Matos e Sousa-Coutinho (2012) consideram que quanto maior o teor de pó de vidro menor seria a absorção de água. Mesmo com uma pequena diferença na absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios estudados em relação ao esperado em sete dias, devido a uma velocidade de hidratação mais lenta dos compósitos cimentícios com a incorporação de pó de vidro, esse comportamento não foi observado. A absorção por capilaridade apresentou valores

muito baixos, chegando em sete dias ao valor máximo de coeficiente de absorção de água por capilaridade de 0,141 g/cm² após 72 horas de ensaio para o compósito cimentício VD30. Da análise estatística observa-se que REF é estatisticamente diferente de VD30 e VD50, o mesmo acontecendo para o VD10 em relação a VD30 e VD50 aos sete dias.

Observa-se que todos os compósitos cimentícios estudados apresentaram valores menores de absorção de água por capilaridade aos 28 dias de idade, quando comparados aos resultados de sete dias de idade, como era esperado. Não há diferença estatística entre os traços avaliados, o que significa que para 28 dias de cura a substituição de cimento por pó de vidro não alterou a absorção de água por capilaridade. A absorção de água foi muito baixa com o maior valor igual a 0,092 g/cm² para o VD20.

No entanto, esperava-se uma absorção de água por capilaridade na idade de 180 dias menor que aos sete dias e 28 dias, o que não aconteceu. Todavia, comparando o VD30 que teve a maior absorção de água por capilaridade aos 180 dias, houve um aumento de 15% na absorção de água quando comparado com sete dias e, fazendo-se a comparação com o resultado obtido aos 28 dias, houve um aumento de 79%.

Mesmo com o aumento da absorção de água aos 180 dias, os valores de absorção de água por capilaridade continuaram baixos, sendo o maior valor obtido igual a 0,163 g/cm² (VD30).

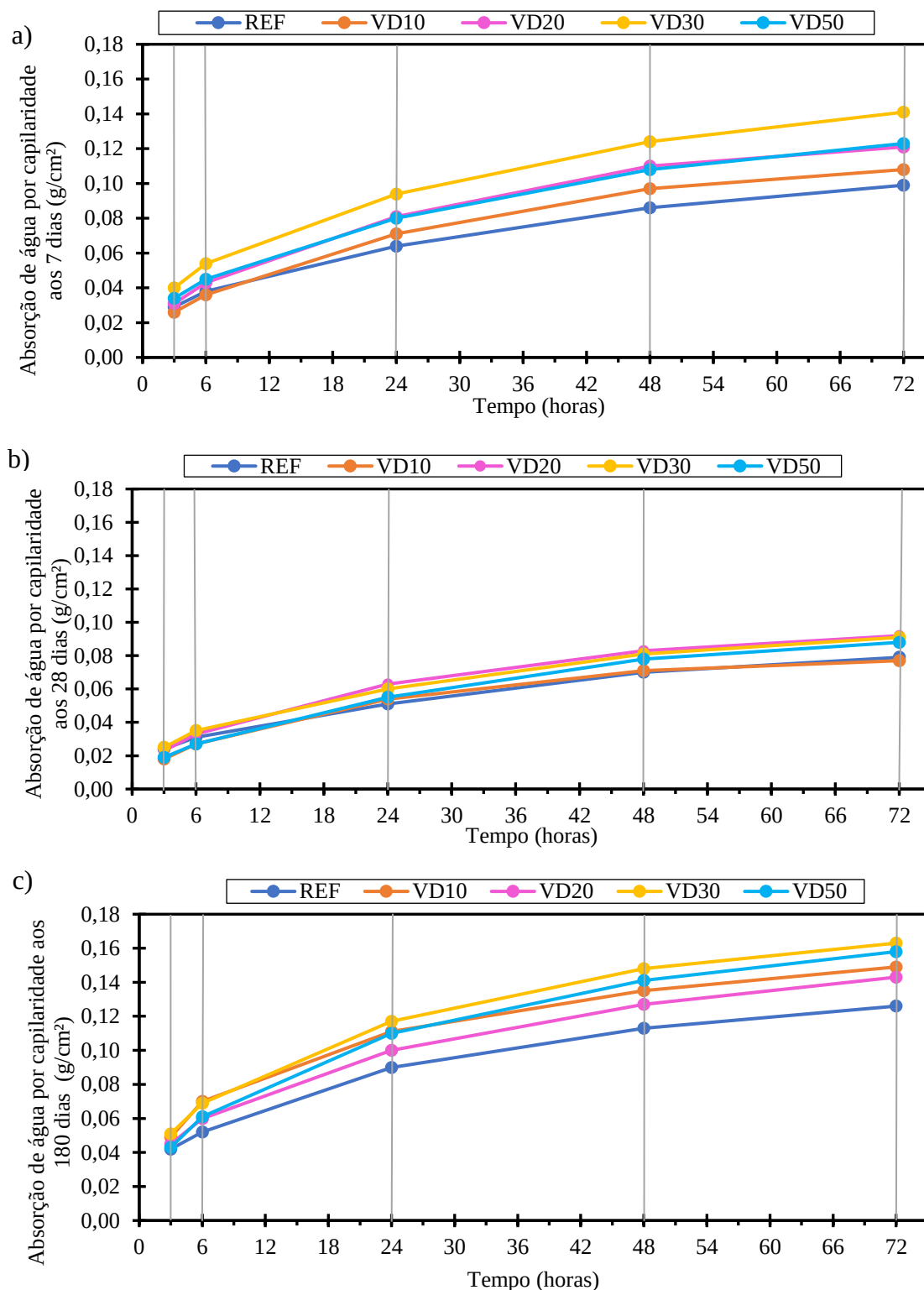
Aos 180 dias a ascensão capilar máxima foi de 4,3 mm para o VD50 e existe diferença estatística entre REF e VD10, VD30 e VD50 e entre VD20 e VD30. O traço com 50% de pó de vidro é estatisticamente equivalente aos VD10, VD20 e VD30 com relação à absorção de água por capilaridade.

De acordo com Li *et al.* (2020), a alta permeabilidade do concreto à água pode dar a substâncias químicas, como íons cloreto, a possibilidade de permear o concreto e, eventualmente, resultar em corrosão das armaduras de aço e/ou reforço com fibras.

Comparado ao concreto convencional e ao concreto de alto desempenho, o concreto de ultra alto desempenho é caracterizado por uma porosidade muito baixa e microestrutura mais densa, o que garante sua resistência superior à permeabilidade.

Na Figura 74 são apresentados gráficos comparando o comportamento dos diferentes compósitos cimentícios estudados ao longo do ensaio nas idades de 7 dias, 28 dias e 180 dias.

Figura 74 – a) Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 7 dias; b) Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 28 dias; c) Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 180 dias.



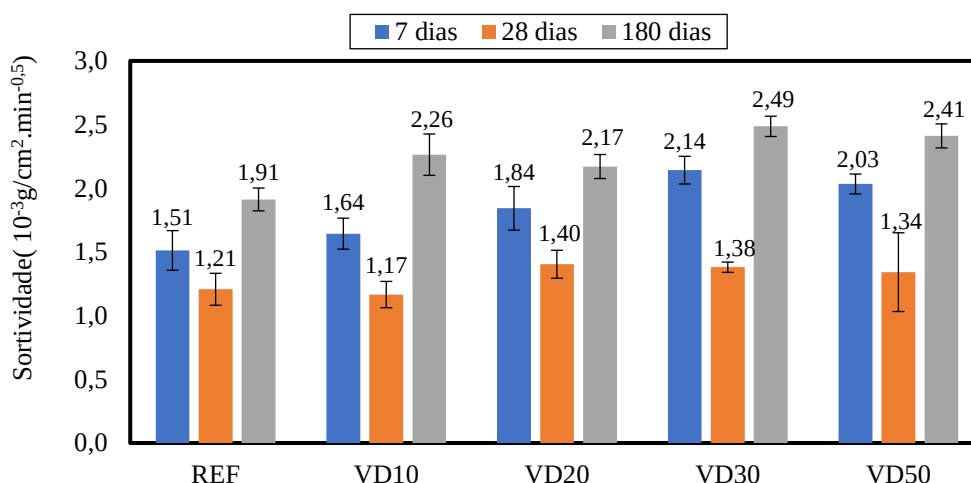
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os resultados de absorção de água por capilaridade de cada amostra e a análise estatística estão apresentados no Apêndice C.

Foi possível obter a sortividade do material visto que os resultados de absorção capilar apresentaram uma correlação com o tempo^{1/2} de $R^2 \geq 0,90$.

Na Figura 75 apresentam-se os resultados de sortividade dos compósitos cimentícios aos 7 dias, 28 dias e 180 dias para os compósitos cimentícios de referência e com incorporação de pó de vidro.

Figura 75 – Sortividade dos compósitos cimentícios aos 7 dias, 28 dias e 180 dias.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Todos os traços com incorporação de pó de vidro apresentaram valores de sortividade maiores que o traço referência para as três idades avaliadas.

Da análise estatística observa-se que a REF é estatisticamente diferente de VD30 e VD50, o mesmo acontecendo para o VD10 em relação a VD30 e VD50 aos sete dias. Não há diferença estatística entre os traços avaliados aos 28 dias, o que significa que a substituição de cimento por pó de vidro não alterou a sortividade. Existe diferença estatística entre REF e VD10, VD30 e VD50 e entre VD20 e VD30. O traço com 50% de pó de vidro é estatisticamente equivalente aos VD10, VD20 e VD30 com relação à sortividade.

Acompanhando o comportamento da absorção de água por capilaridade a sortividade aos 28 dias foi menor que aos sete dias e 180 dias para todos os traços.

Quanto menor o coeficiente de sortividade menor a capacidade do material de absorver e transmitir água por capilaridade, ou seja, menor a suscetibilidade do material ao ingresso dos agentes que causam degradação.

Dobias, Pernicova e Mandlik (2016) encontraram o valor da sortividade para um concreto de ultra alto desempenho (CUAD) aproximadamente cinco vezes menor do que o de um concreto convencional (CC). Nas Tabelas 33 e 34 podem ser observadas as composições dos concretos analisados e comparados os valores relativos à absorção de água dos concretos estudados por Dobias, Pernicova e Mandlik (2016) e os compósitos cimentícios REF e VD50 aos 28 dias de cura imersa desenvolvidos neste estudo.

Tabela 33 – Composição dos concretos.

Composição do concreto		REF	VD50	CUAD ⁽¹⁾	CC ⁽¹⁾
Cimento+microsílica+escória	kg	-		950	495
Cimento+sílica ativa	kg	1080	580	-	-
Pó de vidro	kg	-	403	-	-
Agregado (0-12 mm)	kg	1074	1074	-	-
Agregado (0-2 mm)	kg	-	-	1160	760
Agregado (4-16 mm)	kg	-	-	-	935
Água	l	194,4	194,4	160	160
Superplastificante	l	24,3	24,3	60	6
Fibras	kg	-	-	120	-
Relação água/cimento		0,19	0,39	0,23	0,33

Notas: ⁽¹⁾ Dobias, Pernicova e Mandlik (2016).

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 34 – Comparação entre compósitos cimentícios de ultra alto desempenho e concreto convencional.

		REF	VD50	CUAD ⁽¹⁾	CC ⁽¹⁾
Densidade de massa	kg/m ³	2307,00	2273,00	2340,00	2295,00
Densidade aparente	kg/m ³	2390,00	2286,00	2420,00	2520,00
Porosidade	%	2,30	3,51	5,09	9,52
Resistência à flexão (28 dias)	MPa	23,12	18,72	23,40	8,60
Resistência à compressão (28 dias)	MPa	115,58	88,37	149,70	56,60
Absorção de água (28 dias)	kg/m ²	0,079	0,088	0,60	3,28
Sortividade	kg.m ⁻² s ^{-1/2}	1,21E-03	1,34E-03	2,60E-03	1,30E-02

Notas: ⁽¹⁾ Dobias, Pernicova e Mandlik (2016).

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tanto REF quanto VD50 apresentaram valores de sortividade da mesma ordem de grandeza do CUAD, estudado pelo pesquisador citado, utilizado para comparação com uma diferença de 40% e 55,5%, respectivamente.

4.3.3 Resistência à compressão axial

As resistências à compressão axial dos compósitos cimentícios podem ser observadas a seguir. A análise estatística para a resistência à compressão em todas as idades avaliadas está apresentada no Apêndice D. Nas Tabelas 35 a 39 são apresentadas as resistências à compressão axial com 2 dias, 7 dias, 28 dias, 91 dias e 365 dias para os corpos de prova submetidos à cura imersa.

Tabela 35 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 2 dias.

	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	84,43	3,03	3,58	
VD10	79,43	1,48	1,86	NÃO
VD20	74,23	5,44	7,32	SIM
VD30	44,91	0,86	1,91	SIM
VD50	44,46	1,31	2,94	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A comparação entre os traços REF/VD10, VD10/VD20 e VD30/VD50 não apresentou diferença estatística entre eles. Em todas as outras comparações a incorporação de pó de vidro

altera o comportamento com relação à resistência à compressão aos 2 dias.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 7 dias.

	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	90,10	3,33	3,69	
VD10	84,84	2,28	2,69	NÃO
VD20	79,23	4,03	5,09	SIM
VD30	74,79	2,84	3,80	SIM
VD50	58,81	3,66	6,22	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 37 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias.

	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	115,58	12,77	11,05	
VD10	119,40	2,76	2,31	NÃO
VD20	113,57	6,84	6,02	NÃO
VD30	110,66	6,13	5,54	NÃO
VD50	88,37	6,83	7,72	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 38 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 91 dias.

	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	137,16	4,15	3,03	
VD10	140,53	11,73	8,34	NÃO
VD20	144,95	7,79	5,38	NÃO
VD30	143,37	7,32	5,11	NÃO
VD50	122,05	11,73	9,61	NÃO

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 39 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 365 dias.

	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	167,93	8,52	5,07	
VD10	154,33	5,81	3,77	NÃO
VD20	160,09	4,21	2,63	NÃO
VD30	155,60	5,52	3,55	NÃO
VD50	138,40	1,62	1,17	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 76 podem ser observados os modos de ruptura dos corpos de prova ensaiados à compressão axial.

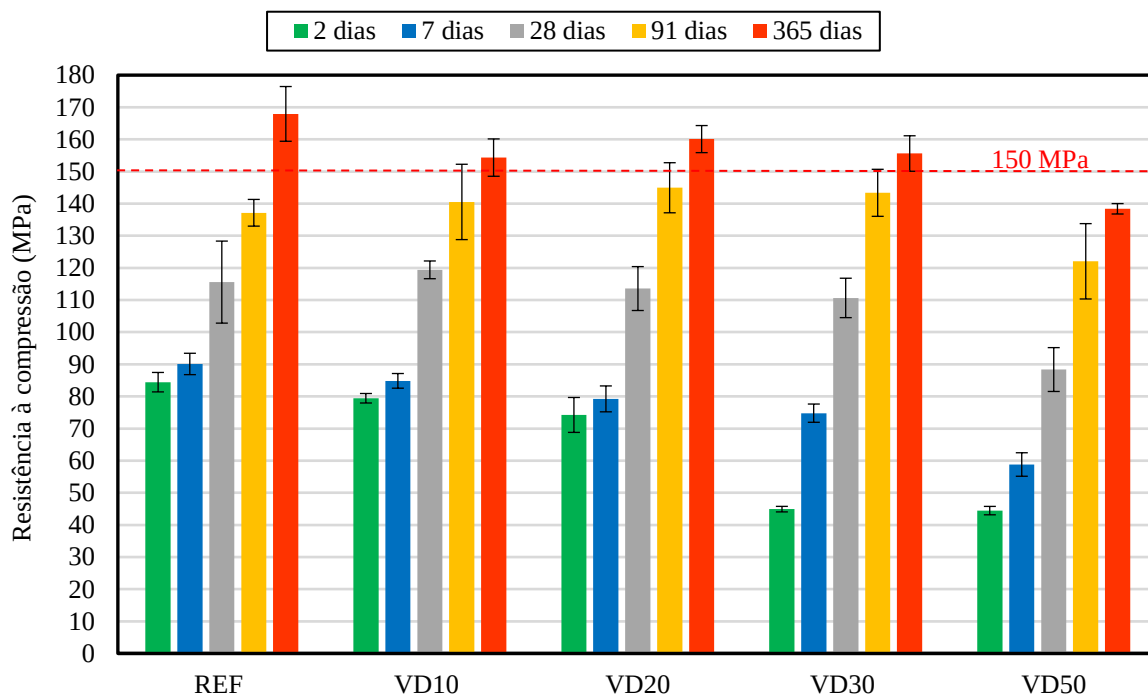
Figura 76 – Modos de ruptura à compressão axial.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os modos de ruptura foram compatíveis com os tipos A – cônica e cônica afastada em 25 mm do capeamento. Na Figura 77 é apresentada uma comparação dos resultados de compressão axial para as misturas referência e com pó de vidro em todas as idades analisadas.

Figura 77 – Comparação dos valores dos resultados à compressão axial dos compósitos cimentícios.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Todos os traços apresentaram uma resistência à compressão axial de 150 MPa aos 365 dias, com exceção do VD50, que tem 50% de substituição do cimento Portland por pó de vidro. Aos 28 dias, o VD50 tem uma redução de 23,5% de resistência à compressão em relação ao REF e aos 365 dias essa redução é de 17,6%.

Observa-se na Figura 77 que o incremento de carga foi gradual conforme o aumento das idades de ruptura.

O melhor desenvolvimento da resistência à compressão em idades mais avançadas pode ser atribuído à formação de $C - S - H$ pelo efeito pozolânico, que promove a densificação do compósito. A incorporação de maior quantidade de pó de vidro como substituto do cimento altera diretamente a relação a/c , disponibilizando mais água para uma menor proporção de cimento, intensificando a formação de $Ca(OH)_2$ que reage naturalmente com maior quantidade de material pozolânico disponível em pó de vidro (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016).

As diferenças observadas na idade de sete dias podem ser explicadas pela incorporação de maiores quantidades de pó de vidro nas amostras VD30 e VD50, que em uma idade tão precoce ainda não adensaram o compósito cimentício completamente. Durante 28 dias, a hidratação da matriz com pó de vidro foi mais bem desenvolvida, refinando os poros e absorvendo menos água pelos poros capilares.

Para as amostras com sete dias de idade não há diferença estatística entre as amostras REF/VD10, além de VD10/VD20 e VD20/VD30. A substituição de 50% de cimento Portland por pó de vidro altera a resistência do compósito cimentício aos sete dias em relação a todas as outras combinações de traços.

Aos 28 dias de idade todos os resultados para as amostras são estatisticamente equivalentes entre si, exceto VD50, que é diferente estatisticamente de todas as amostras.

Aos 91 dias todas as amostras são estatisticamente equivalentes. A exceção é entre VD20 e VD50, que apresentam diferença estatística entre si. A resistência à compressão de VD50 corresponde a 84,20% da resistência de VD20.

Os resultados da análise estatística aos 365 dias de idade das amostras não apresentaram diferenças estatísticas entre os valores obtidos nos ensaios, com exceção do VD50, que é estatisticamente diferente de todos os outros traços.

Houve maior uniformidade nos valores e o maior valor de resistência à compressão aos 365 dias foi de REF com 167,93 MPa.

Segundo Li *et al.* (2019) e Lee *et al.* (2008), quando o pó de vidro foi adicionado à pasta de cimento, com os teores variando de 0% a 25% e $a/c=0,41$, a resistência à compressão diminuiu com o aumento da quantidade de pó de vidro. Com a adição de 25% de pó de vidro, a resistência à compressão da pasta de cimento diminuiu 23%. A diminuição da resistência à compressão da pasta de cimento com pó de vidro pode ser explicada pelo efeito de diluição. O efeito de diluição do pó de vidro reduz o teor de cimento e aumenta a relação água/cimento efetiva, de modo a diminuir a formação de produtos de hidratação e, finalmente, reduzir a resistência à compressão da pasta de cimento (DU *et al.*, 2021). Isso também é observado em outros estudos.

De acordo com Du e Tan (2017), em comparação com a hidratação do cimento, a reação pozolânica do pó de vidro é relativamente mais lenta e, portanto, a resistência nas primeiras idades do concreto é reduzida. No entanto, com uma idade de cura mais longa, os benefícios da reação pozolânica do pó de vidro começam a aparecer. Esse comportamento pode ser observado nos valores obtidos dos ensaios.

O mecanismo é explicado devido à sílica dissolvida do pó de vidro reagir com a solução dos poros formando $C - S - H$ ao longo do tempo. A microestrutura do compósito cimentício torna-se mais densa quanto maior o tempo de cura, e isso ocorre devido à reação pozolânica tardia do pó de vidro (DU; TAN, 2017).

Nos ensaios realizados por Du e Tan (2017) enquanto o concreto simples apresentou maior resistência à compressão aos sete dias, teve a menor resistência aos 365 dias. Devido à baixa taxa de reação pozolânica do pó de vidro, a substituição de cimento reduziria a resistência à compressão em idades precoces. Com tempo de cura mais longo, a sílica amorfa do pó de vidro dissolveu-se lentamente no meio alcalino e reagiu com Ca^{2+} para formar $C - S - H$. Com esse processo, a porosidade do concreto diminuiria e poderia aumentar a resistência à compressão.

Na idade de um ano, as misturas com 15% e 30% de pó de vidro exibiram a maior resistência à compressão, cerca de 27% superior à mistura de concreto de referência. Concreto com 60% de pó de vidro, que ganhou 65% da resistência em relação ao concreto de referência aos sete dias, excedeu em 12% a mistura de referência em 365 dias.

Ibrahim e Meawad (2018) utilizando pó de vidro sodocálcico com partículas de 20 μm e 20% de pó de vidro em substituição ao cimento obtiveram em seu estudo após 90 dias de cura uma resistência à compressão somente 2% menor em relação ao compósito de controle. Os autores afirmam que o pó de vidro soda-cal é um material pozzolânico promissor na substituição do cimento nos compósitos cimentícios não afetando propriedades mecânicas.

Nos estudos de Matos e Sousa-Coutinho (2012), nos quais as pesquisadoras realizaram ensaios até aos 90 dias de resistência à compressão axial, utilizando pó de vidro com d_{50} de 11 μm , em substituição ao cimento nos teores de 10% e 20%, foi possível observar um decréscimo na resistência à compressão, para todas as idades, comparando com o material de referência. A resistência da argamassa com pó de vidro foi menor que o controle aos sete dias e 28 dias, diminuindo com o teor de substituição, mas aos 90 dias atingindo o valor do controle, embora abaixo dos níveis da argamassa com sílica ativa. A argamassa com 20% de pó de vidro ganhou resistência significativa entre 28 dias e 90 dias, mostrando reação pozzolânica nesse período.

Comportamento observado também neste estudo, onde as resistências à compressão axial aos 365 dias foram maiores que nas outras idades e o valor das resistências foi equivalente à REF, estatisticamente, com exceção do VD50.

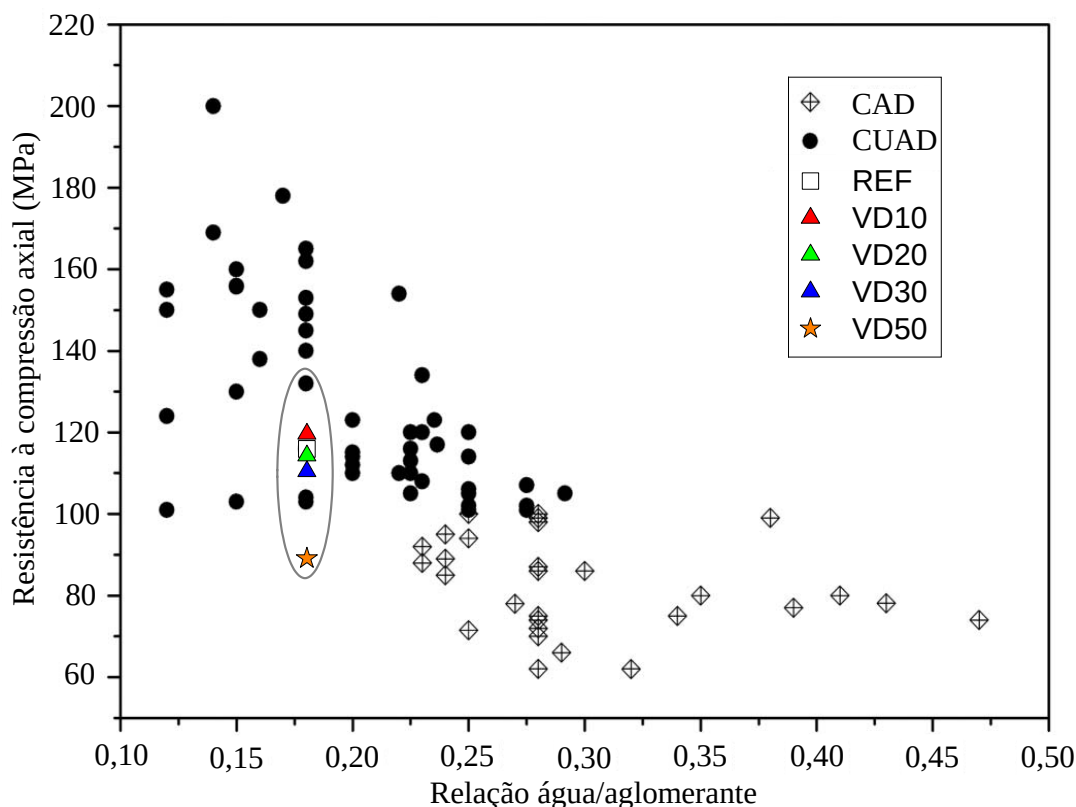
Segundo Sobuz *et al.* (2016), um decréscimo na resistência devido à formação de microfissuras provocadas por retração entre os 56 dias e 90 dias foi observado para misturas com e sem agregado graúdo.

Diferentemente dos estudos citados acima, nesta pesquisa observou-se um acréscimo de resistência de 45,3% aos 365 dias em relação aos 28 dias para o traço REF. Com a substituição do cimento Portland por pó de vidro o acréscimo de resistência variou de 29,3% para o VD10 até 56,6% para o VD50.

Diante disso sugere-se que para compósitos cimentícios com alto teor de cimento a resistência aos 28 dias pode não ser uma representação adequada da resistência para uso em projeto estrutural.

No artigo de revisão de Sohail *et al.* (2018), várias pesquisas relacionando resistência à compressão com a relação água/aglomerante foram plotadas em um gráfico. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias dos compósitos cimentícios de referência e com substituição de cimento Portland por pó de vidro encontrados na presente pesquisa foram incorporados ao mesmo gráfico (Figura 78).

Figura 78 – Efeito da relação água/aglomerante sobre a resistência à compressão de CAD e CUAD aos 28 dias.



Fonte: Adaptado de Sohail *et al.* (2018).

Observou-se que ao reduzir a relação água/aglomerante a resistência à compressão aumenta; no entanto, observou-se que os dados estavam dispersos. Para misturas de CCUAD na mesma relação água/aglomerante, diferentes resistências à compressão foram alcançadas devido a outros fatores, como a quantidade e o tipo de cimento ou sílica ativa.

O efeito de superplastificante também deve ser considerado, porque a redução da relação água/aglomerante sem o uso de superplastificante resulta em um concreto com menor resistência porque menos água estaria disponível para a hidratação do cimento.

Como um exemplo, Willey (2013) relatou dois valores de resistência à compressão diferentes, 103 MPa e 149 MPa, para uma relação a/agl de 0,18, provavelmente pelo uso de fibras de aço na mistura com maior resistência.

Akhnoukh e Xie (2010) alcançaram uma resistência à compressão de 103 MPa para uma relação a/agl de 0,18, principalmente devido ao uso de cinza volante e menos sílica ativa e cimento.

Na Tabela 40 observam-se os valores da eficiência energética dos compósitos cimentícios em relação ao cimento e aos aglomerantes para todos os traços desenvolvidos neste trabalho, comparados com compósitos produzidos por outros autores, na idade de 28 dias.

Tabela 40 – Eficiência energética dos compósitos cimentícios.

Traço	Cimento (kg/m ³)	MCS (kg/m ³)	Sílica ativa (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Eficiência cimento (kg/m ³ .MPa ⁻¹)	Eficiência aglomerantes (kg/m ³ .MPa ⁻¹)
REF	1000,0	-	80,0	115,6	8,7	9,3
VD10	900,0	81,0*	80,0	119,4	7,5	8,9
VD20	800,0	161,0*	80,0	113,6	7,0	9,2
VD30	700,0	242,0*	80,0	110,7	6,3	9,2
VD50	500,0	403,0*	80,0	88,4	5,7	11,1
Pelisser, Vieira e Bernardin (2018)	472,0	52,0**	-	67,2	7,0	7,8
Nepomuceno, Pereira-de-Oliveira e Lopes (2014)	472,0	92,0**	-	56,8	8,3	9,9
Corinaldesi e Moriconi (2011)	440,0	100,0**	-	45,0	9,8	12,0
Li <i>et al.</i> (2019)	625,7	-	41,7	113,0	5,5	5,9
	426,1	-	28,4	116,2	3,7	3,9
	341,5	-	22,8	121,1	2,8	3,0

Notas: * Referente ao pó de vidro

** Referente a cinza volante

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Embora os compósitos cimentícios estudados possuam alto consumo de cimento, observa-se alta eficiência energética em seu uso em comparação aos tradicionais compósitos cimentícios.

Os compósitos cimentícios analisados apresentaram a mesma ordem de magnitude de eficiência dos compósitos com consumo de cimento em torno de 450 kg/m³. De acordo com Li *et al.* (2019), a alta eficiência em relação aos aglomerantes do compósito desenvolvido por eles é atribuída a um teor muito baixo de água, adição pozolânica e agregados de basalto de alta resistência.

4.3.4 Resistência à tração por compressão diametral e por flexão

Na Tabela 41 podem ser observados os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias e aos 180 dias de idade dos compósitos cimentícios submetidos à cura imersa dos traços referência e com substituição parcial do cimento Portland por pó de vidro.

Tabela 41 – Resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 28 dias e 180 dias de idade.

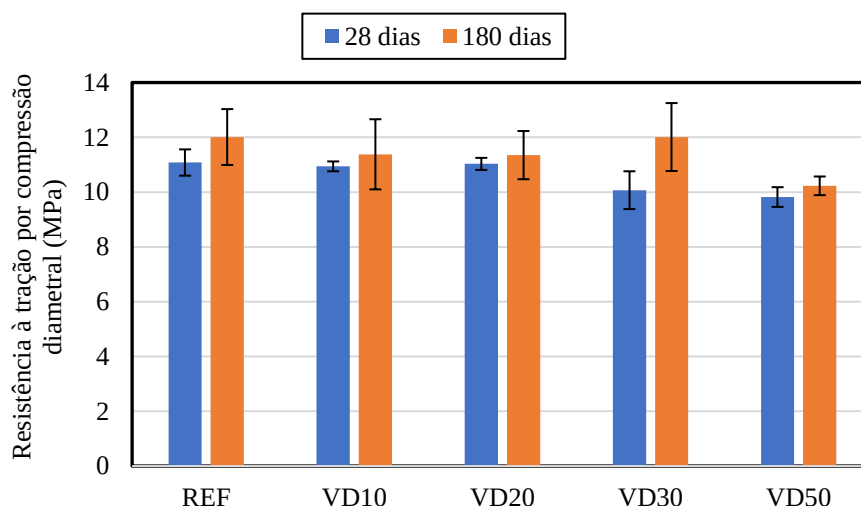
Traço	28 dias				180 dias			
	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	11,08	0,48	4,33		12,01	1,02	8,49	
VD10	10,94	0,18	1,68	NÃO	11,38	1,28	11,25	NÃO
VD20	11,03	0,22	2,03	NÃO	11,35	0,88	7,76	NÃO
VD30	10,07	0,69	6,87	NÃO	12,01	1,24	10,34	NÃO
VD50	9,82	0,36	3,64	SIM	10,23	0,34	3,30	NÃO

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Aos 28 dias os valores das amostras VD50 apresentaram diferença estatística com REF e VD20. Aos 180 dias não houve diferença estatística entre os valores de resistência à tração por compressão diametral dentro da amostra. A análise estatística dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral é apresentada no apêndice E.

Na Figura 79 é possível comparar os resultados obtidos para os traços estudados nas idades de 28 dias e 180 dias.

Figura 79 – Resultados de tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios.



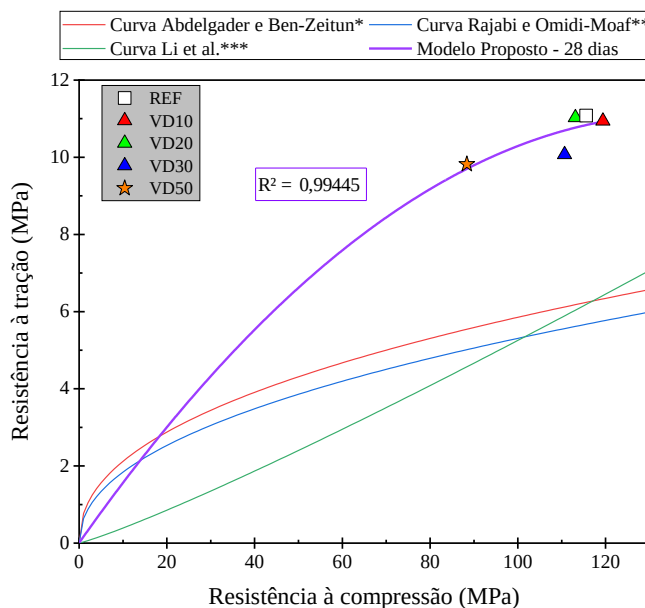
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os maiores valores de resistência à tração por compressão diametral foram de REF e VD30, ambos com 12,01 MPa aos 180 dias e com um acréscimo de resistência, comparando com 28 dias, de 8% e 16%, respectivamente.

O concreto dois estágios (CDE) é uma forma eficaz para a utilização de agregados graúdos, que são colocados previamente em uma forma com a subsequente injeção da argamassa. Li *et al.* (2019) desenvolveram um concreto dois estágios de ultra alto desempenho que apresenta maior resistência à compressão e tem maior resistência à tração. Várias equações empíricas foram estabelecidas para apresentar a correlação entre a resistência à compressão (σ_c) e a resistência à tração (σ_t) de um CDE. As fórmulas empíricas geralmente seguem o tipo de $\sigma_t = k(\sigma_c)^n$, onde k e n são coeficientes. O valor de n para concreto normal geralmente é abaixo de 0,75 e a razão σ_t/σ_c diminui com um aumento da resistência à compressão. Contudo, esses modelos de previsão empíricos não foram apropriados para os compósitos cimentícios desenvolvidos neste estudo.

Na Figura 80 observam-se três curvas de modelos empíricos (ABDELGADER; BEN-ZEITUN, 2005)* e (RAJABI; OMIDI-MOAF, 2017)** para CDE e (LI *et al.*, 2019)*** para CDE de ultra alto desempenho e um novo modelo que segue o formato de uma equação polinomial, proposto para descrever a correlação entre resistência à compressão e resistência à tração dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho avaliados na presente pesquisa.

Figura 80 – Resistência à tração por compressão diametral versus resistência à compressão axial para CCUAD.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A previsão de formato polinomial apresenta um R^2 cujo valor é 0,99 e pode-se observar que os resultados experimentais do CCUAD estão acima das curvas empíricas.

O CCUAD possui uma relação σ_t/σ_c maior em comparação com outros compósitos, indicando um maior potencial de aplicação em engenharia devido à maior resistência à tração.

Na Tabela 42 podem ser analisados os resultados obtidos para a resistência à tração por flexão aos 28 dias. A análise estatística dos resultados obtidos para a resistência à tração por flexão está apresentada no apêndice F.

Tabela 42 – Resultados de resistência à tração por flexão.

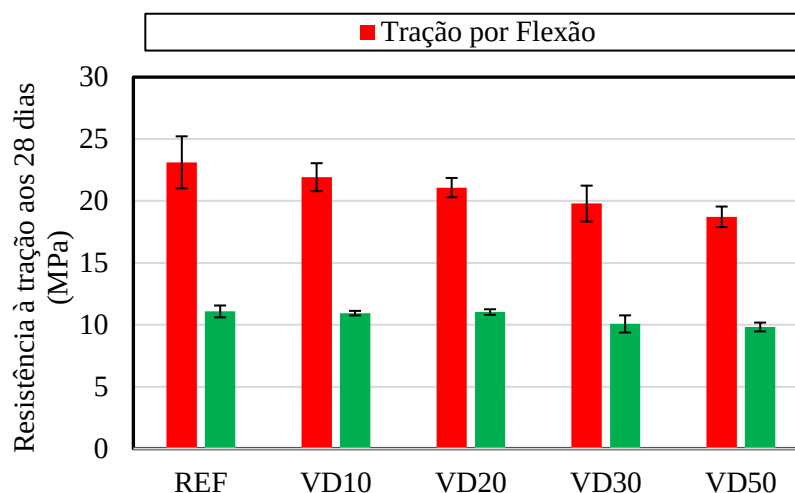
Traço	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	23,12	2,10	9,10	
VD10	21,92	1,13	5,18	NÃO
VD20	21,08	0,78	3,69	NÃO
VD30	19,79	1,45	7,33	NÃO
VD50	18,72	0,83	4,42	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A análise estatística dos resultados mostra que o único traço diferente estatisticamente é o REF quando comparado com VD50, sendo o VD50 inferior ao traço referência em 19% para essa propriedade. No entanto, a diferença foi observada somente para o compósito com maior incorporação de pó de vidro e aos 28 dias, sendo a hidratação desse compósito mais lenta em relação às outras.

Na Figura 81 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos para tração por compressão diametral e tração por flexão aos 28 dias.

Figura 81 – Tração por compressão diametral e tração por flexão aos 28 dias.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os resultados obtidos na tração por flexão apresentaram valores em torno de 50% maiores do que os valores de tração por compressão diametral, resultado já esperado. As resistências à tração por compressão diametral seguem a mesma tendência dos corpos de prova rompidos por compressão axial, que é de desenvolver uma maior resistência em idades mais avançadas.

De acordo com Shen *et al.* (2019), para concreto normal a relação entre resistência à flexão e resistência à compressão depende, em certa medida, do nível de resistência à compressão, e a relação geralmente diminui à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta e pode ser usada para indicar a fragilidade do concreto.

Aos 28 dias todos os resultados de resistência à compressão são estatisticamente equivalentes entre si com exceção do VD50, que é estatisticamente diferente de todos os traços e, portanto, também foi verificada diferença nas relações entre as resistências à flexão e à compressão de VD50 em relação aos outros traços.

4.3.5 Módulo de elasticidade estático e dinâmico

Na Tabela 43 são apresentados os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias de traços referência e com substituição de cimento Portland por pó de vidro submetidos à cura imersa.

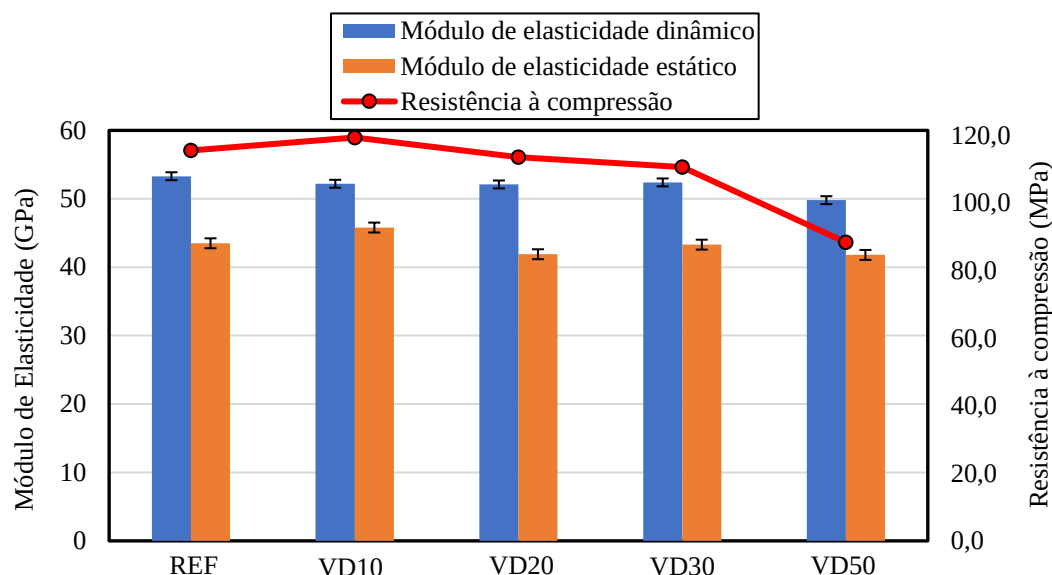
Tabela 43 – Módulos de elasticidade dinâmico e estático aos 28 dias de idade.

Traço	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)				Módulo de elasticidade estático (GPa)			
	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	53,31	1,26	2,36		43,09	1,81	4,21	
VD10	52,15	0,93	1,78	SIM	45,51	3,35	7,36	NÃO
VD20	52,10	0,88	1,69	SIM	41,67	3,54	8,50	NÃO
VD30	52,37	0,91	1,74	NÃO	42,94	2,73	6,36	NÃO
VD50	49,75	0,67	1,35	SIM	41,51	0,80	1,92	NÃO

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os resultados obtidos nos ensaios do módulo de elasticidade dinâmico e estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias podem ser observados na Figura 82, para cura imersa.

Figura 82 – Comparação dos valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático para os compósitos cimentícios aos 28 dias.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os módulos de elasticidade obtidos das amostras apresentaram resultados em torno de 50 GPa no módulo de elasticidade dinâmico e 45 GPa no módulo de elasticidade estático, para compósitos cimentícios com resistência à compressão em torno de 100 MPa. Esse comportamento pode ser explicado pela baixa relação água/aglomerante utilizada nas misturas e pela incorporação de sílica ativa e pó de vidro, que proporcionam alteração da microestrutura dos compósitos cimentícios, pelo efeito fíler e pozolânico das adições, densificando a matriz. Vale ressaltar que o empacotamento das partículas também leva à densificação das matrizes com a aumento do pó de vidro.

A análise estatística para os resultados dos módulos de resistência dinâmico e estático está apresentada no Apêndice G.

Para o módulo de elasticidade dinâmico, o compósito cimentício de referência apresentou diferença estatística em relação ao VD10, VD20 e VD50. A incorporação de 50% de pó de vidro representa diferença significativa em relação a todas as amostras. Com relação ao módulo de elasticidade estático não ocorreu diferença estatística entre as amostras. As misturas com substituição de cimento por pó de vidro tiveram valores de módulo de elasticidade menores que a referência, sendo que a maior diferença foi para a mistura com 50% de vidro (7,16% e 3,84% para módulo de elasticidade dinâmico e estático, respectivamente).

Os valores dos módulos de elasticidade estão próximos aos valores obtidos por Soliman e Tagnit-Hamou (2016), que realizaram em seus estudos substituição de até 50% de cimento pelo pó de vidro em concretos de ultra alto desempenho e obtiveram módulos de elasticidade estáticos em torno de 50 GPa.

O estudo de Shen *et al.* (2019) mostra que o módulo de elasticidade dos produtos de hidratação é significativamente influenciado pelos regimes de cura. Amostras curadas em autoclave fornecem os melhores resultados, seguidas por amostras curadas termicamente e, em seguida, amostras curadas a 20°C. O módulo de elasticidade dos hidratos em amostras submetidas ao regime de cura padrão varia entre 17,1 GPa e 51,0 GPa, e o valor médio é de 28,7 GPa. O módulo médio de elasticidade dos espécimes curados a 60 °C é 43,4 GPa. Para amostras curadas a 90°C, o módulo de elasticidade varia entre 37,1 GPa e 64,6 GPa, com um valor médio de 51,7 GPa.

Módulos de elasticidade médios semelhantes foram obtidos por Garas, Kurtis e Kahn (2012) e Sorelli *et al.* (2008), onde os módulos médios de elasticidade são 47,6 GPa e 48,4 GPa, respectivamente.

No presente estudo os módulos médios de elasticidade aos 28 dias das amostras REF, VD10, VD20, VD30 e VD50 foram de 43,1 GPa, 45,5 GPa, 41,7 GPa, 42,9 GPa e 41,5 GPa, respectivamente, com uma média de 42,9 GPa.

4.3.6 Porosidade aparente e densidade aparente

Nas Tabelas 44 e 45 apresentam-se os resultados dos ensaios de porosidade aparente e de densidade aparente nas idades de 7 dias, 28 dias, 91 dias, 180 dias e 365 dias.

Tabela 44 – Porosidade aparente dos compósitos cimentícios estudados (%).

Período		Traços				
		REF	VD10	VD20	VD30	VD50
7 dias	Média (%)	1,91	4,16	2,72	3,47	4,91
	DP (%)	0,53	0,09	0,06	0,09	0,13
	CV (%)	27,74	2,2	2,06	2,69	2,66
	Diferença significativa em relação ao REF		SIM	SIM	SIM	SIM
28 dias	Média (%)	2,3	2,44	2,64	3,27	3,51
	DP (%)	0,15	0,17	0,16	0,22	0,07
	CV (%)	6,52	6,77	6,13	6,72	1,87
	Diferença significativa em relação ao REF		NÃO	NÃO	SIM	SIM
91 dias	Média (%)	3,46	3,93	4,06	4,68	4,81
	DP (%)	0,15	0,3	0,22	0,08	0,1
	CV (%)	4,27	7,57	5,47	1,62	1,98
	Diferença significativa em relação ao REF		NÃO	SIM	SIM	SIM
180 dias	Média (%)	4,71	4,85	5,16	5,73	6,26
	DP (%)	0,19	0,26	0,22	0,06	0,03
	CV (%)	4,08	5,35	4,17	1,05	0,55
	Diferença significativa em relação ao REF		NÃO	NÃO	SIM	SIM
365 dias	Média (%)	4,91	5,2	5,5	6,29	6,41
	DP (%)	0,08	0,15	0,19	0,22	0,18
	CV (%)	1,71	2,94	3,39	3,5	2,76
	Diferença significativa em relação ao REF		NÃO	SIM	SIM	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

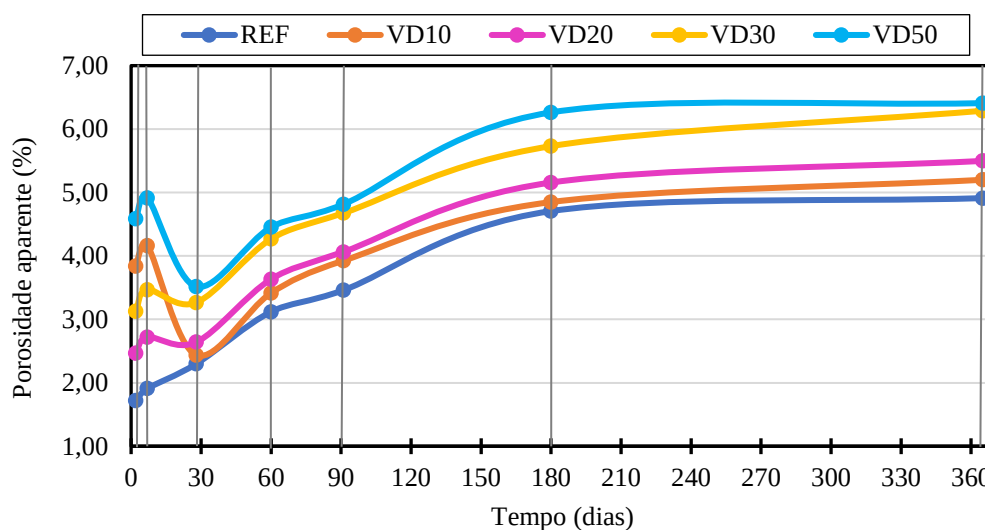
Tabela 45 – Densidade aparente dos compósitos cimentícios estudados (g/cm³).

Período		Traços				
		REF	VD10	VD20	VD30	VD50
7 dias	Média (g/cm ³)	2,40	2,36	2,36	2,33	2,28
	DP (g/cm ³)	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	CV (%)	0,26	0,02	0,02	0,10	0,05
28 dias	Média (g/cm ³)	2,39	2,37	2,35	2,32	2,29
	DP (g/cm ³)	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
	CV (%)	0,17	0,15	0,19	0,22	0,15
	Diferença significativa em relação ao REF	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
91 dias	Média (g/cm ³)	2,39	2,36	2,34	2,32	2,29
	DP (g/cm ³)	0,00	0,01	0,00	0,00	0,05
	CV (%)	0,18	0,22	0,18	0,06	2,35
180 dias	Média (g/cm ³)	2,37	2,35	2,33	2,31	2,27
	DP (g/cm ³)	0,01	0,01	0,01	0,00	0,06
	CV (%)	0,21	0,22	0,25	0,04	2,41
365 dias	Média (g/cm ³)	2,38	2,36	2,34	2,31	2,28
	DP (g/cm ³)	0,01	0,00	0,01	0,01	0,05
	CV (%)	0,21	0,09	0,24	0,21	2,27

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Nas Figuras 83 e 84 pode-se observar a evolução da porosidade aparente e da densidade aparente, respectivamente, em função do teor de pó de vidro adicionado em substituição ao cimento Portland ao longo do tempo. A trabalhabilidade das misturas não sofre variações significativas embora ocorra também um aumento na porosidade aparente, conforme aumenta o teor de pó de vidro. Até os 365 dias ainda ocorre variação na porosidade aparente e na densidade aparente, que embora pouco significativa, pode representar uma variação no ganho de resistência, mas também pode significar a inadequação do ensaio ao material.

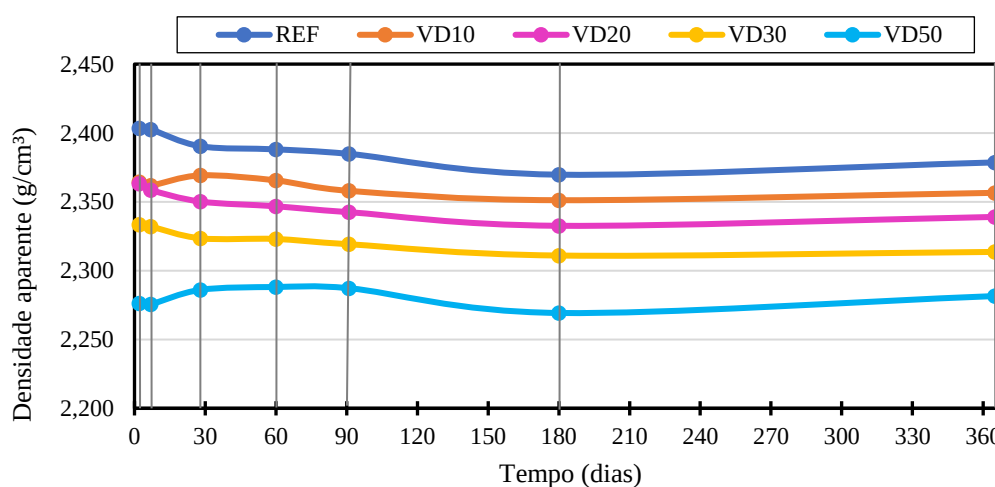
Figura 83 – Porosidade aparente.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

De acordo com a análise estatística (Apêndice H) realizada com os resultados do ensaio de porosidade aparente, aos sete dias todas as amostras apresentam diferenças estatísticas entre si. Aos 28 dias REF é estatisticamente equivalente a VD10 e VD20 e VD10 é equivalente a VD20. As amostras VD30 e VD50 apresentam diferenças estatísticas com relação a todas as amostras. Para a idade de 91 dias não há diferença estatística entre as amostras REF e VD10, VD10 e VD20 e VD30 e VD50. Todas as outras relações apresentam diferenças estatísticas. Aos 180 dias não há diferença estatística entre REF e VD10, REF e VD20 e entre VD10 e VD20. Para 365 dias, não há diferença estatística entre REF e VD10, VD10 e VD20 e entre VD30 e VD50.

Figura 84 – Densidade aparente.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A análise estatística (Apêndice I) para os resultados do ensaio de densidade aparente aos 28 dias mostra que existe diferença significativa entre todas as amostras analisadas.

De acordo com Li *et al.* (2020), pode-se observar que a porosidade do CUAD varia de acordo com a relação água/cimento e com o aumento da temperatura de cura. Segundo Cwirzen (2007) e Heinz e Ludwig (2004), a porosidade varia de acordo com o tipo de cura.

De acordo com Yang *et al.* (2000), Liu, Xie e Li (2005) e Cheyrezy, Maret e Frouin (1995), a redução na porosidade pode efetivamente densificar e homogeneizar a microestrutura, melhorar a qualidade da interface da matriz com os agregados e, eventualmente, levar a uma grande melhoria da permeabilidade.

Segundo Du e Tan (2017), concretos com relação a/agl igual a 0,5 e substituição de cimento por pó de vidro de 15% e 45% apresentaram as maiores resistências e ao mesmo tempo exibiram porosidade maior que a referência.

Sohail *et al.* (2021) utilizaram um CUAD de 150 MPa com adição de cinza volante aos 28 dias e compararam com um CAD de 100 MPa aos 28 dias e obtiveram porosidade de 1,43% e 2,5%, respectivamente. Nesta pesquisa os valores de porosidade obtidos aos 28 dias variaram de 2,30% para a referência, que resultou em maior resistência à compressão, até 3,51% para o VD50, com resistência à compressão menor.

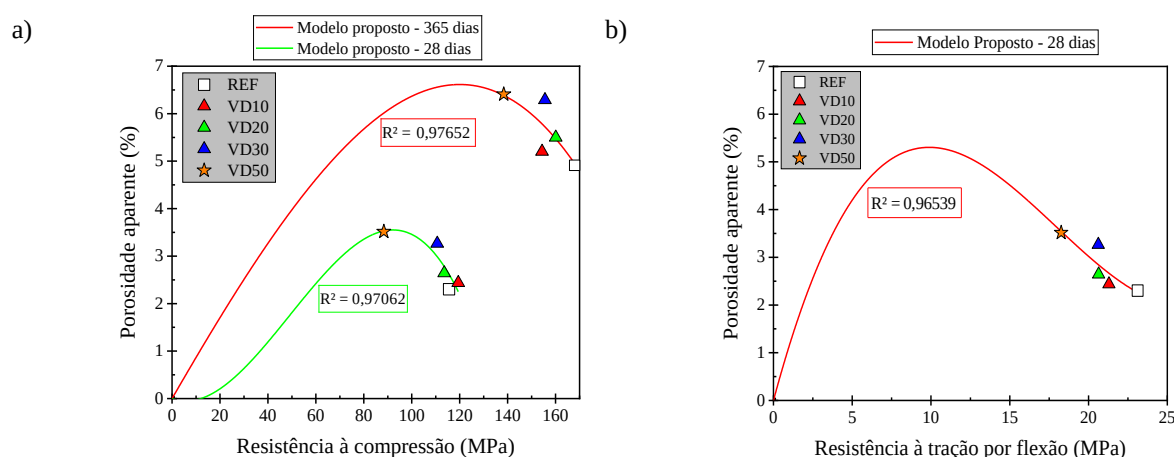
Segundo Nassar e Soroushian (2012), a absorção de água e a porosidade são indicadores importantes da durabilidade do concreto endurecido.

Redução da absorção de água e do volume de poros podem melhorar muito o desempenho a longo prazo e a vida útil do concreto em ambientes agressivos.

A porosidade reduzida também beneficia a compressão e a flexão que são pontos fortes do concreto, pois existe uma relação inversa fundamental entre a porosidade e a resistência mecânica dos sólidos.

Na Figura 85 observam-se as relações entre porosidade aparente e resistência à compressão axial e resistência à tração por flexão, respectivamente, na idade de 28 dias.

Figura 85 – a) Relação entre porosidade aparente e resistência à compressão axial; b) Relação entre porosidade aparente e resistência à tração por flexão.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As correlações confirmam a relação inversa existente entre a porosidade e a resistência à compressão e à tração na flexão, ou seja, quanto maior a resistência menor a porosidade.

No artigo de revisão de Sohail *et al.* (2018) os autores concluíram que baixa porosidade e uma densidade de empacotamento mais alta são essenciais para alcançar alta resistência, fluidez aceitável e segregação mínima.

Para materiais cimentícios, aumentos na porosidade de até 10% podem reduzir a resistência em 50%.

4.3.7 Reações álcali-sílica

Ensaio complementares foram realizados com objetivo de avaliar se o pó de vidro é reativo do ponto de vista de RAS. O material foi ensaiado na Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP) em São Paulo/SP com um agregado inócuo substituindo-se 50% do agregado por pó

de vidro e outro ensaio substituindo 50% do cimento padrão pelo pó de vidro. No Quadro 6 está apresentada a nomenclatura adotada para cada traço estudado.

Quadro 6 – Nomenclatura adotada para cada traço estudado.

Nomenclatura do traço	Composição
CP	Cimento padrão + agregado miúdo
CP V	CP V + agregado miúdo
REF	CP V + agregado miúdo + sílica ativa
VD10	CP V + agregado miúdo + sílica ativa + pó de vidro (10%)
VD20	CP V + agregado miúdo + sílica ativa + pó de vidro (20%)
VD30	CP V + agregado miúdo + sílica ativa + pó de vidro (30%)
VD50	CP V + agregado miúdo + sílica ativa + pó de vidro (50%)
ABCP 1	Agregado inócuo (50%) + pó de vidro (50%) + cimento padrão
ABCP 2	Agregado inócuo + cimento padrão (50%) + pó de vidro (50%)

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Foram realizados testes para avaliar uma possível reação álcali-sílica e na Tabela 46 são apresentadas as médias dos resultados obtidos.

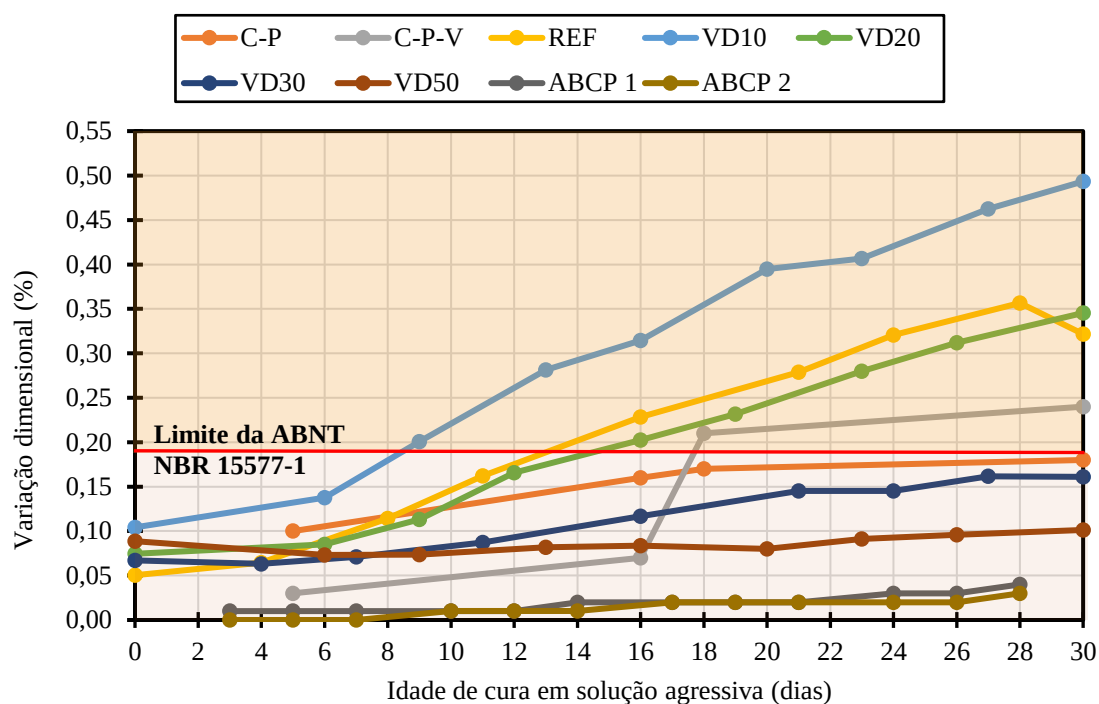
Tabela 46 – Expansão média das amostras.

Dias	CP	CP V	REF	VD10	VD20	VD30	VD50	ABCP 1	ABCP 2
0	-	-	0,05	0,10	0,07	0,07	0,09	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,00
4	-	-	0,06	-	-	0,06	-	-	-
5	0,10	0,03	-	-	-	-	-	0,01	0,00
6	-	-	-	0,14	0,09	-	0,07	-	-
7	-	-	-	-	-	0,07	-	0,01	0,00
8	-	-	0,11	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	0,20	0,11	-	0,07	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,01
11	-	-	0,16	-	-	0,09	-	-	-
12	-	-	-	-	0,17	-	-	0,01	0,01
13	-	-	-	0,28	-	-	0,08	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	0,02	0,01
16	0,16	0,07	0,23	0,31	0,20	0,12	0,08	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02
18	0,17	0,21	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	0,23	-	-	0,02	0,02
20	-	-	-	0,39	-	-	0,08	-	-
21	-	-	0,28	-	-	0,15	-	0,02	0,02
23	-	-	-	0,41	0,28	-	0,09	-	-
24	-	-	0,32	-	-	0,15	-	0,03	0,02
26	-	-	-	-	0,31	-	0,10	0,03	0,02
27	-	-	-	0,46	-	0,16	-	-	-
28	-	-	0,36	-	-	-	-	0,04	0,03
30	0,18	0,24	0,32	0,49	0,35	0,16	0,10	-	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 86 são apresentadas as curvas de expansão dos compósitos cimentícios de referência e dos compósitos contendo pó de vidro em substituição ao cimento Portland, para verificação da reação álcali-sílica, além dos traços complementares.

Figura 86 – Curvas de expansão dos compósitos cimentícios contendo pó de vidro em substituição ao cimento, para verificação da reação álcali-sílica.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As amostras de referência (0%, sem pó de vidro) apresentaram uma expansão média igual a 0,23% aos 16 dias, chegando a 0,36% aos 28 dias. Essa expansão da amostra de referência já é bastante acima do valor limite estabelecido pela norma brasileira (0,19%). A substituição de 10% de cimento Portland por pó de vidro também promoveu uma expansão média igual a 0,20% em nove dias, chegando a 0,49 nos 30 dias.

Substituições acima de 20% de cimento por pó de vidro diminuíram a expansão ocasionada pela reação álcali-sílica em relação às amostras de referência. As amostras VD20 apresentaram uma expansão média igual a 0,2% aos 16 dias chegando a 0,35% aos 30 dias, valores acima do valor mínimo admitido. As amostras VD30 e VD50 não atingiram o valor mínimo, ou seja, a substituição de 30% e 50% de cimento por pó de vidro reduziu a expansibilidade dos compósitos, provocada pela RAS.

As amostras produzidas com o cimento padrão e sem adição de sílica ativa apresentaram baixa variação dimensional. As amostras produzidas com o CP V (utilizado na presente pesquisa) e sem adição de sílica ativa apresentaram expansão média igual a 0,21% aos 18 dias chegando a 0,24% aos 30 dias. As amostras com agregado inócuo e utilização de pó de vidro, ABCP 1 e ABCP 2, não apresentaram expansão em função do desenvolvimento da reação álcali-sílica.

Observa-se na Figura 86 que inicialmente (primeiros seis dias) a expansão dos corpos de prova contendo pó de vidro foi mais acentuada do que as amostras de referência. A partir desse tempo a expansão da REF só não superou a expansão de VD10.

Munhoz (2008) e Garcia-Lodeiro, Palomo e Fernandez-Jimenez (2007) demonstraram que entre as alternativas para reduzir a reação álcali-sílica está a adição de materiais pozolânicos ativos. Assim a reatividade do pó de vidro com o cimento pode ter sido mais relevante positivamente do que a presença de álcalis, que contribui negativamente.

O fato de o pó de vidro conter sódio pode ser pouco relevante neste ensaio, já que a solução de contato ($NaOH$ 1N) fornece sódio em quantidade suficiente para a ocorrência da RAS. Assim, as amostras têm expansão superior ao limite dos 0,10% antes dos 12 dias, pois a quantidade de álcalis do material pode ser consumida pela sílica reativa nas primeiras 48 horas antes da argamassa ser imersa na soda. Nas amostras com 30% e 50% de pó de vidro, pode ser que a quantidade de álcalis seja insuficiente para o desenvolvimento da reação álcali-sílica.

Soliman e Tagnit-Hamou (2017) desenvolveram um CUAD utilizando areia de vidro com diâmetro máximo de partículas menor que 1 mm (630 μm) que apresentou uma expansão bem menor que o limite especificando o “comportamento inócuo” (0,10%).

A baixa expansão do CUAD contendo areia de vidro pode ser atribuída ao fato de que o diâmetro máximo das partículas, sendo menor, produz $C - S - H$ por reação pozolânica em vez de gel por RAS. Na verdade, quando as partículas são ligeiramente menores que 1 mm elas formam um gel ASR local não expansivo em torno das partículas, o que leva a uma melhor ligação entre as partículas e a pasta de cimento (IDIR e TAGNIT-HAMOU, 2009).

Matos e Sousa-Coutinho (2012) também obtiveram resultados positivos na utilização de pó de vidro com tamanho de partículas inferiores a 100 μm em argamassas, incorporado a partir da substituição parcial do cimento em massa. As autoras obtiveram resultados onde o pó de vidro contribuiu na diminuição da expansão por reação álcali-agregado, inclusive observando a diminuição da penetração de íons cloretos em argamassas com essa incorporação. Elas observaram também uma maior frente de carbonatação, provavelmente explicada pela diminuição da reserva alcalina, promovida pelo consumo da portlandita pela reação pozolânica.

Matos e Sousa-Coutinho (2012) também explicaram a baixa expansão, mesmo com o uso de pasta com alto teor de álcalis, pelo consumo desses álcalis na estrutura do gel $C - S - H$ durante a reação pozolânica que ocorre antes da RAS.

4.3.8 Frente de carbonatação

Em dois anos de exposição, não foi verificada frente de carbonatação em nenhum dos compósitos cimentícios estudados. Observa-se que a substituição de cimento Portland por pó de vidro não prejudica a resistência à carbonatação do compósito cimentício mesmo em idades avançadas.

Matos e Sousa-Coutinho (2012) verificaram que a profundidade de carbonatação aumentou com o aumento no teor de pó de vidro, que é consistente com a tendência observada no concreto para vários materiais pozolânicos e provavelmente devido à redução de portlandita. Embora seja um material menos reativo, maior substituição de pó de vidro e menos cimento na mistura contribuem para a redução de portlandita.

De acordo com Li *et al.* (2020), amostras de CCUAD submetidas a 56 dias e 90 dias de carbonatação não apresentaram sinais de carbonatação. A profundidade de carbonatação da CCUAD após seis meses de exposição foi de 0,5 mm e aumentou para 1,5-2,0 mm após uma exposição de um ano a 1% de atmosfera de CO_2 .

Confirmando os resultados da presente pesquisa, após três anos de exposição a profundidade de carbonatação de CCUAD foi de apenas 1,5 a 1,7 mm e corresponde a 2,5 a 4,5 vezes inferiores aos de CCAD e CC, de acordo com Schmidt e Fehling (2005) e Alonso *et al.* (2006).

4.4 Ensaios de durabilidade frente à penetração de cloretos

4.4.1 Frente de penetração de cloretos

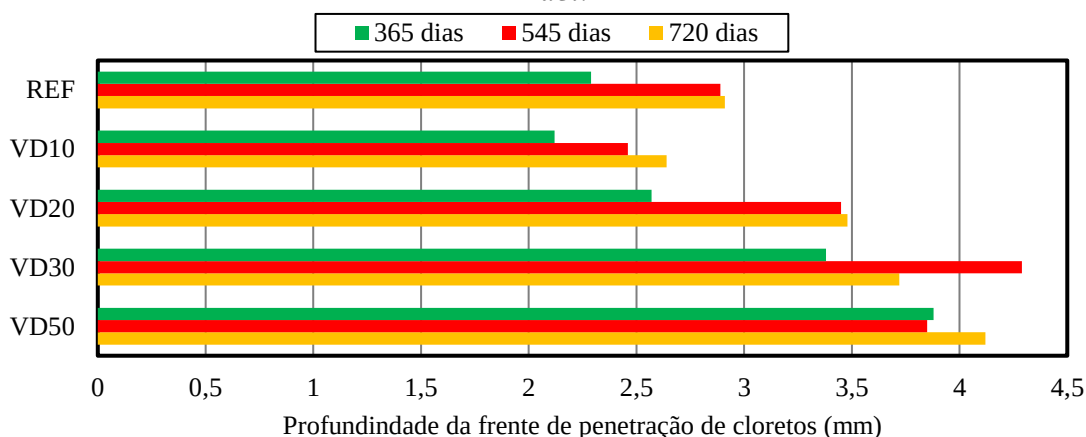
Após aspersão da solução de nitrato de prata com concentração de 0,1 M a profundidade de penetração de íons cloreto foi determinada em amostras de compósitos cimentícios fraturadas. Na Tabela 47 são mostrados os resultados médios de penetração de íons cloreto obtidos para os compósitos cimentícios com e sem substituição de cimento Portland por pó de vidro e a Figura 87 é apresentada para melhor visualização e comparação dos resultados.

Tabela 47 – Frente de penetração dos íons cloreto dos corpos de prova expostos a uma solução de 3,5% de NaCl.

Período	Traços – Frente de penetração de cloretos (mm)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
365 dias	2,29	2,12	2,57	3,38	3,88
545 dias	2,89	2,46	3,45	4,29	3,85
720 dias	2,91	2,64	3,48	3,72	4,12

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 87 – Profundidade de penetração dos íons cloreto das amostras após exposição à solução de 3,5% de NaCl.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Observa-se que o teor de pó de vidro influencia a frente de penetração de cloretos após ciclos de molhagem e secagem, sendo maior a penetração conforme aumenta-se o teor de pó de vidro incorporado. A profundidade de penetração também aumenta com o tempo de exposição na solução de $NaCl$, como era esperado.

A diferença entre a penetração de cloretos no compósito cimentício com 50% de pó de vidro VD50 e no compósito cimentício de referência REF foi de 29% para 720 dias de ciclos de molhagem e secagem. Quanto maior a quantidade de $C - S - H$ contida no concreto, quer seja pela reação de hidratação dos compostos do cimento ou pela reação pozolânica da sílica ativa e do pó de vidro, maior a probabilidade de combinação com os íons cloreto e menor a velocidade de penetração dos íons cloreto no concreto de cobrimento.

Deve-se considerar que todas as profundidades obtidas foram baixas, o que indica que os íons cloreto não teriam atingido a armadura, se considerada a espessura do concreto de cobrimento especificada pela NBR 6118 (ABNT, 2014), em nenhum dos compósitos cimentícios estudados, não apresentando qualquer risco para o início da corrosão.

Harbec *et al.* (2017) observaram a diminuição da penetração dos íons cloreto em misturas com pó de vidro, atribuindo esse fenômeno à densificação e tortuosidade dos poros, consequência da formação de $C - S - H$ proveniente do efeito pozolânico do vidro. Mas vale ressaltar que os autores utilizaram a relação a/agl de 0,35 com substituição de sílica por 10% de pó de vidro com d_{50} de 12,3 μm e partículas esféricas.

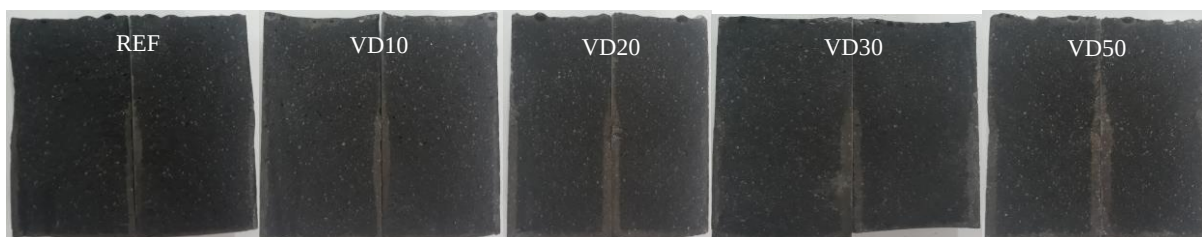
Na Figura 88 são mostradas as frentes de penetração dos íons cloreto após algumas horas da aspersão de nitrato de prata após 365 dias e 720 dias de ciclos de molhagem e secagem.

Figura 88 – Frente de penetração de cloretos em compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro em substituição ao cimento após aspersão da solução de nitrato de prata aos 365 dias (a) e 720 dias (b).

a) 365 dias



b) 720 dias



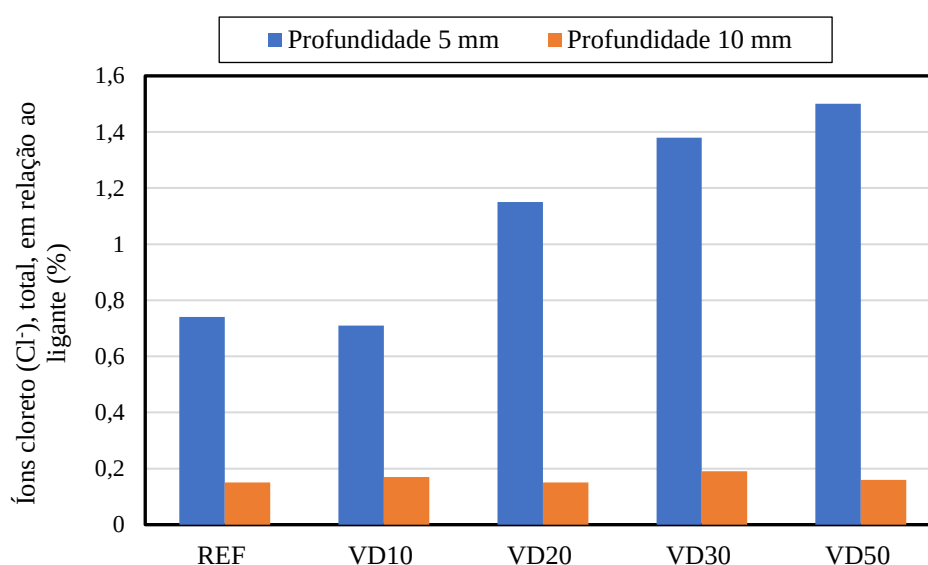
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Visualmente percebe-se que todas as profundidades obtidas foram baixas e que acontece um leve aumento dessa frente de penetração de cloretos com o tempo.

4.4.2 Teor total de cloretos

Na Figura 89 pode-se observar o teor total de cloretos encontrado nas amostras após exposição dos corpos de prova à solução de 3,5% de $NaCl$, em ciclos de molhagem e secagem, após 311 dias de ciclos. O pó para realização dos ensaios foi retirado nas profundidades de 5 mm e 10 mm da superfície do corpo de prova.

Figura 89 – Teor total de íons cloreto dos corpos de prova após 311 dias de exposição à solução de 3,5% de $NaCl$.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Verificou-se que o teor de cloretos diminuiu para o traço com 10% de substituição do cimento Portland por pó de vidro. A partir de 20% de substituição o teor de cloretos aumenta conforme aumenta o teor de pó de vidro utilizado. O teor de cloretos segue a mesma tendência da profundidade da frente de penetração de íons cloreto.

Vale observar que o teor de cloretos encontrado para a profundidade de 5 mm supera o estabelecido na classificação da agressividade do ambiente sobre a armadura constituída em aço, definida pela NBR 12655 (ABNT, 2015), que é de 0,15% para classes de agressividade forte e muito forte. Porém, a penetração de cloretos ocorre até uma profundidade muito menor que o estabelecido para cobrimento mínimo da armadura no concreto sendo 3,58 mm aos 311 dias para o VD50.

O teor de cloretos na profundidade de 10 mm é bem menor que o estabelecido na classificação da agressividade do ambiente sobre a armadura constituída em aço da NBR 12655 (ABNT, 2015).

De acordo com o artigo de revisão de Jiang *et al.* (2019), vários estudos publicados mostram que 40% a 90% da penetração de íons cloreto pode ser reduzida com a inclusão de 20% a 30% de pó de vidro como substituição de cimento. Isso pode ser atribuído ao refinamento de poros pela reação pozolânica, que diminui a porosidade e a conectividade dos poros para o transporte de cloretos. Os trabalhos citados referem-se a concretos convencionais com adição de pó de vidro com diâmetro máximo de partículas de 0,075 mm.

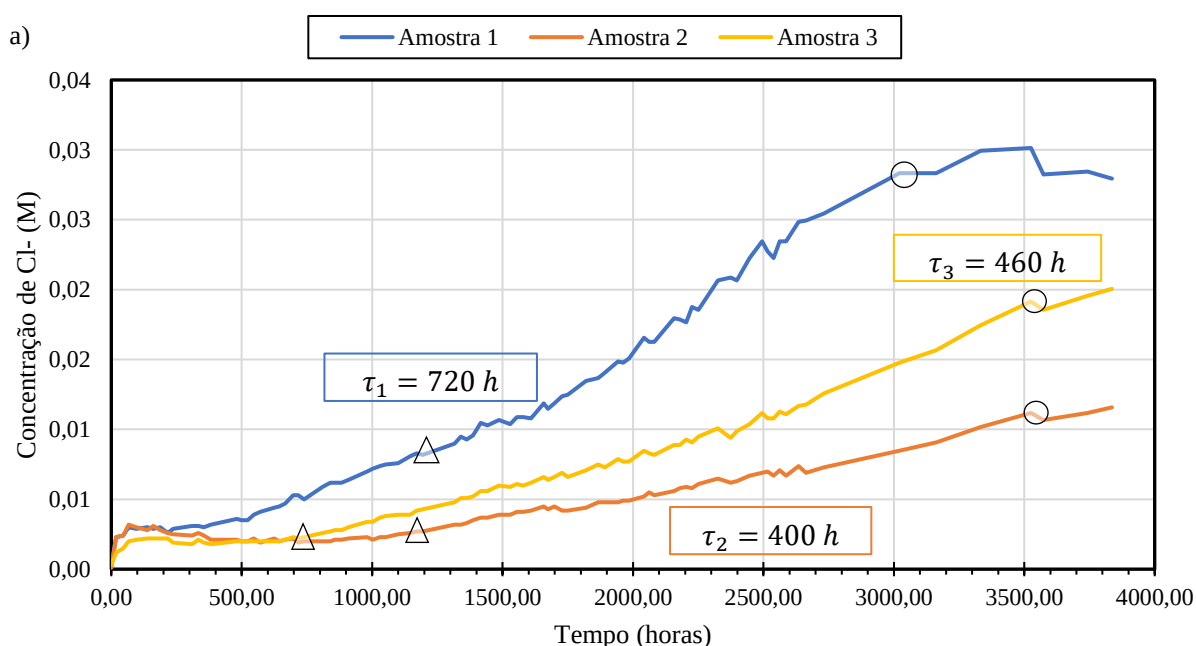
Com os resultados obtidos no presente trabalho (penetração de cloretos maior para traços com substituição de cimento por pó de vidro acima de 10%), considera-se que o tamanho das partículas de pó de vidro utilizado e a presença de agregados menores aumentam a penetração de cloretos. Porém, a máxima penetração de cloretos obtida foi de 4,29 mm na idade de 545 dias.

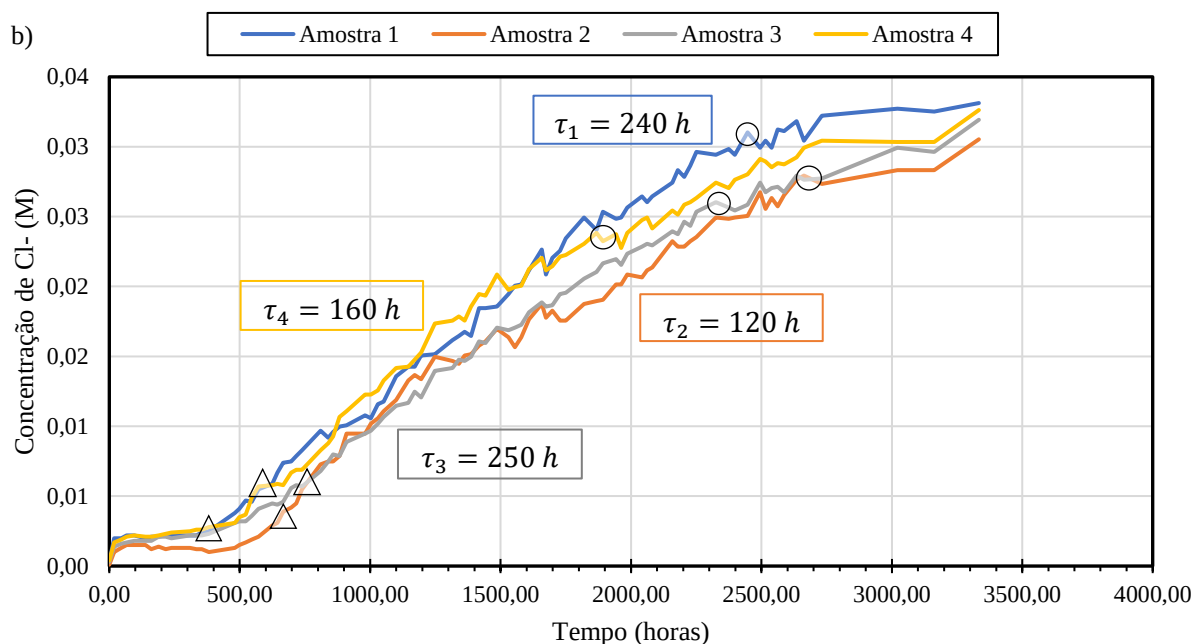
Du e Tan (2017) e Matos e Sousa-Coutinho (2012) utilizaram pó de vidro com d50 da mesma ordem de grandeza do cimento utilizado por eles e agregados com tamanho máximo de diâmetro de 10 mm, enquanto na presente pesquisa o pó de vidro tem d50 maior que o do cimento Portland e a sílica utilizados e diâmetro máximo de agregado de 1,2 mm.

4.4.3 Migração de cloretos

A Figura 90 mostra a evolução da concentração de cloretos na câmara anódica durante os ensaios de migração. A concentração de íons cloreto (Cl^-) aumenta com o tempo, uma vez que a tensão elétrica é aplicada, forçando esses íons a migrarem em direção ao polo positivo do sistema.

Figura 90 – Evolução da concentração de cloretos na solução presente na célula anódica em função do tempo, para ensaios de migração de cloretos. a) Amostras REF; b) Amostras VD50 (Δ = início do estado estacionário e $\circ$ = final do estado estacionário).





Fonte: Elaborada pela autora (2020).

No início do ensaio, a quantidade de íons cloreto que passa para a câmara anódica é desprezível. A duração desse processo corresponde ao chamado *time lag* (τ), e pode ser definida como o tempo necessário para que os íons cloreto passem através da amostra de concreto, causando a sua saturação.

Esse período de tempo será usado para estimar os valores do coeficiente de difusão no estado não estacionário, D_{ns} . Após este período, o fluxo de íons cloreto através da amostra torna-se constante e corresponde ao período de estado estacionário.

O *time lag* é obtido a partir da intersecção entre o prolongamento da linha que caracteriza o estado estacionário e o eixo das abscissas (tempo). O *time lag* para o compósito cimentício com substituição de 50% do volume de cimento por pó de vidro (VD50) variou de 120 h a 250 h entre as amostras analisadas (média de 192 h) e foi menor que o *time lag* para o compósito cimentício sem pó de vidro (REF), que variou de 400 h a 720 h (média de 527 h).

Isso deve-se, provavelmente, à menor quantidade de cimento Portland no compósito cimentício VD50 em relação ao compósito referência. Análise estatística foi realizada e os resultados estão apresentados no Apêndice J e observa-se que a incorporação de 50% de pó de vidro produziu diferença significativa na concentração de cloretos em relação ao compósito cimentício de referência.

O fluxo de íons cloreto (J_{cl}) representa a velocidade na qual os íons são transportados através do concreto. O fluxo de íons cloreto através da amostra, após o *time lag*, aumenta a uma taxa constante, o que corresponde ao regime no estado estacionário. O fluxo de íons cloreto pode ser obtido usando a inclinação linear do gráfico que representa a evolução da concentração de cloretos na célula anódica em função do tempo. Na Tabela 48 podem ser observados os valores

do fluxo de íons cloreto e dos coeficientes de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário.

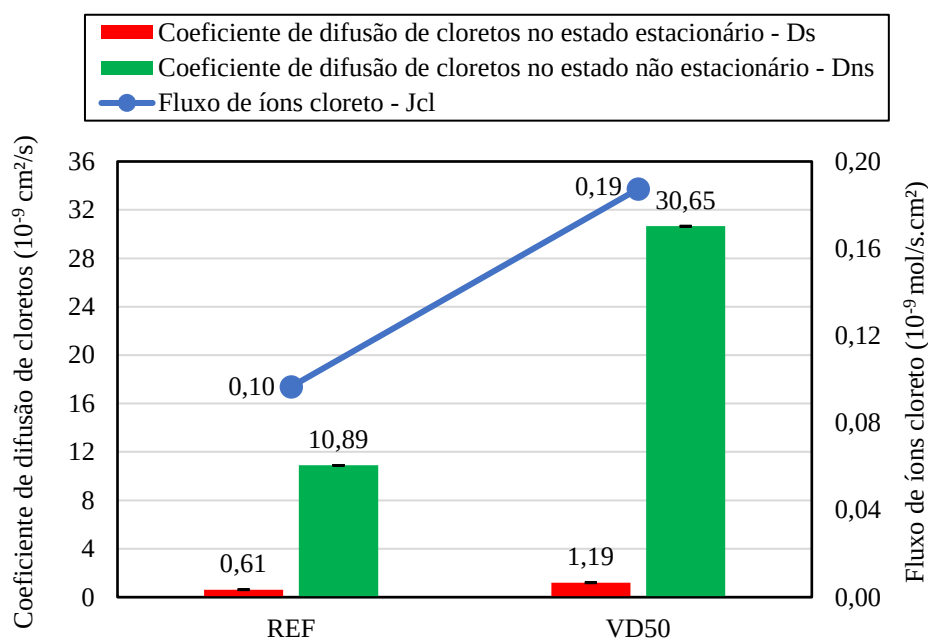
Tabela 48 – Fluxo de íons cloreto e coeficientes de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário.

Traço	Fluxo de íons cloreto			Coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário e não estacionário					
	Jcl (10^{-9} mol/s.cm ²)			Ds (10^{-9} cm ² /s)			Dns (10^{-9} cm ² /s)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
REF	0,10	0,05	53,91	0,61	0,33	53,91	10,89	3,08	28,26
VD50	0,19	0,01	6,11	1,19	0,07	6,11	30,65	10,99	35,86

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Figura 91 mostra os valores obtidos para o fluxo de íons cloreto (Jcl), coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário (Ds) e não estacionário (Dns) através do concreto em função do tempo.

Figura 91 – Fluxo de íons cloreto (Jcl), coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário (Ds) e não estacionário (Dns) através do concreto em função do tempo.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Um claro aumento no fluxo de íons cloreto é observado para as amostras contendo 50% de pó de vidro em substituição ao cimento Portland. Isto revela que ocorrerá o início do processo de corrosão causado pela migração de íons cloreto para a amostra com pó de vidro antes da amostra referência. Para os resultados dos coeficientes de difusão nos estados estacionário e não estacionário, ambos são maiores para os compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro em relação aos compósitos cimentícios referência e são coerentes com o resultado do fluxo de íons cloreto.

Alguns autores (CASTELLOTE; ANDRADE; ALONSO, 2001 e SANTOS, 2006) analisaram

os ensaios de difusão de cloretos em concretos comuns com e sem incorporação de sílica ativa e variando a relação água/cimento e justificaram a redução dos coeficientes de difusão devido a uma redução na relação água/aglomerante acompanhada de uma redução na porosidade total em função da diminuição dessa relação.

Pela análise estatística dos valores de fluxo de íons cloreto observa-se diferença significativa entre as amostras de REF e VD50, porém os valores são muito baixos quando comparados com outros materiais. Embora não seja fácil realizar uma análise quantitativa dos coeficientes de difusão de cloretos devido aos diversos fatores que influem na permeabilidade aos cloretos, consegue-se perceber a diferença entre os resultados de diversos autores. Na Tabela 49 observa-se a variação dos coeficientes de difusão de cloretos segundo vários autores.

Tabela 49 – Coeficientes de difusão de cloretos de acordo com diferentes autores.

	Traços	Coeficiente de difusão de cloretos ($10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$)
(RIBEIRO, 2010)	Referência	10
(RIBEIRO, 2010)	Lama vermelha, 30%	8
(WEI e SONG, 2005)	Cinza volante, 58%	5,1
(MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012)	CC - Pó de vidro, 10%	9,5
(MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012)	CC - Pó de vidro, 20%	7,8
VD50	CCUAD - Pó de vidro, 50%	1,19
REF	CCUAD - Referência	0,61

Fonte: Elaborada pela autora (2020)

Destaca-se a grande variação dos valores entre os CCUAD ($0,61 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ e $1,19 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$) e os concretos menos resistentes (de $5,1 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ a $10 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$), sendo os valores dos coeficientes de difusão de cloretos para os CCUAD bem mais baixos que os dos concretos convencionais.

A penetração de cloretos para os concretos com incorporação de pó de vidro diminuiu em relação ao concreto referência no trabalho de Matos e Sousa-Coutinho (2012), diferentemente do ocorrido nesta pesquisa. Matos e Sousa-Coutinho utilizaram agregado graúdo ($d_{\text{max}} = 10 \text{ mm}$) e relação água/cimento de 0,5 com substituição de até 20%, não sendo verificada difusão em teores de substituição maiores.

Com base nos critérios apresentados na Tabela 24 o compósito cimentício de referência é classificado como de extremamente alta resistência à penetração de cloretos. O compósito cimentício com incorporação de 50% de pó de vidro é classificado como de muito alta resistência.

Os resultados de penetração de cloretos obtidos foram relacionados com o tempo de vida útil desse material na tentativa de ter representações mais sensíveis quanto aos benefícios do uso do pó de vidro em substituição ao cimento nos compósitos cimentícios.

Foi utilizada a segunda lei da difusão de Fick (Equações 23 e 24), de acordo com o proposto por estudos recentes (RIBEIRO, 2010; YADAV *et al.*, 2010; MEDEIROS; HELENE, 2009).

$$PC = 2(z)\sqrt{tD_s} \quad (23)$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{C_{Cl} - C_0}{C_s - C_0} \quad (24)$$

Onde:

D_s = coeficiente de difusão no estado estacionário (cm²/ano);

t = tempo de vida útil (anos);

$\text{erf}(z)$ = função gaussiana de erros;

PC (penetração de cloretos) = profundidade em que a concentração de cloretos atinge o limite para que ocorra a despassivação da armadura (cm);

C_0 = concentração inicial de cloretos (neste caso, 0%);

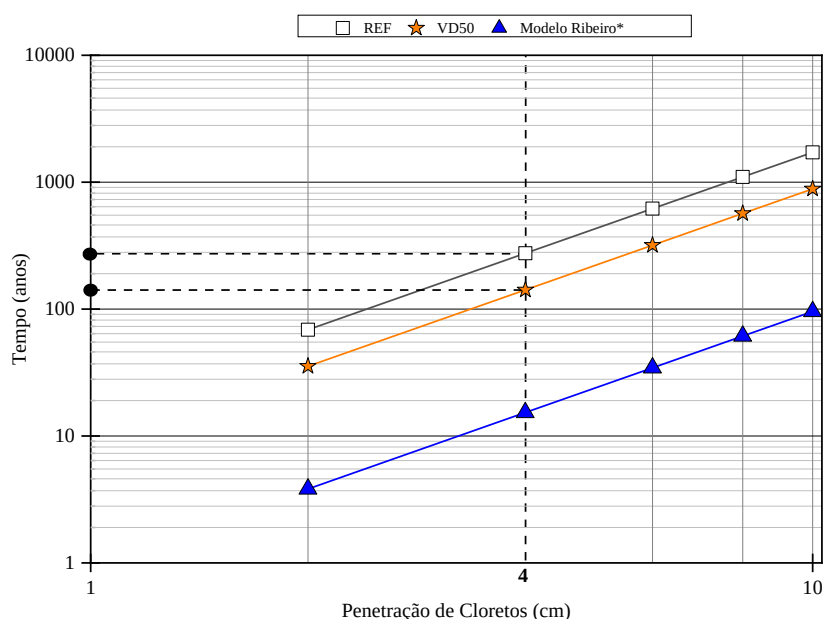
C_s = concentração de cloretos na superfície (%);

C_{Cl} = concentração de cloretos em função da profundidade e do tempo (%), em relação à massa de cimento.

Orientando-se pela literatura (RIBEIRO, 2010; NILSSON *et al.*, 2000; MEDEIROS; HELENE, 2009) foram fixados alguns parâmetros: $C_s = 1,8\%$ e $C_{Cl} = C_{dep} = 0,4\%$ em peso de cimento, onde C_{dep} é a concentração limite de cloretos para despassivar o aço (por massa de cimento).

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 92, onde são destacados os valores de vida útil para a penetração de cloretos em estruturas com um cobrimento de concreto igual a 4 cm (valor mínimo exigido pelas normas, para ambientes agressivos, com presença de cloretos).

Figura 92 – Relação entre o tempo de vida útil e a penetração de cloretos.



Notas: * (Ribeiro, 2010)

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As amostras de referência (sem pó de vidro) apresentaram uma estimativa de 275 anos de vida útil e a substituição de 50% de cimento por pó de vidro diminuiu a estimativa de vida útil do concreto para 142 anos, valores bem maiores do que os 16,5 anos e 35 anos encontrados para o concreto convencional e concreto com lama vermelha, respectivamente (modelo Ribeiro^{*}).

4.4.4 Difusão de cloretos

O ensaio de difusão de cloretos no estado não estacionário foi realizado com o objetivo de obter os coeficientes de difusão de cloretos, sendo esse dado bastante representativo no que se refere ao real mecanismo de transporte de cloretos nos compósitos cimentícios.

Deve-se destacar que quanto maior o valor do coeficiente de difusão de cloretos, pior é o desempenho do compósito cimentício frente a ambientes agressivos contendo cloretos.

Na Tabela 50 estão apresentados os valores da frente de penetração de cloretos e os coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário.

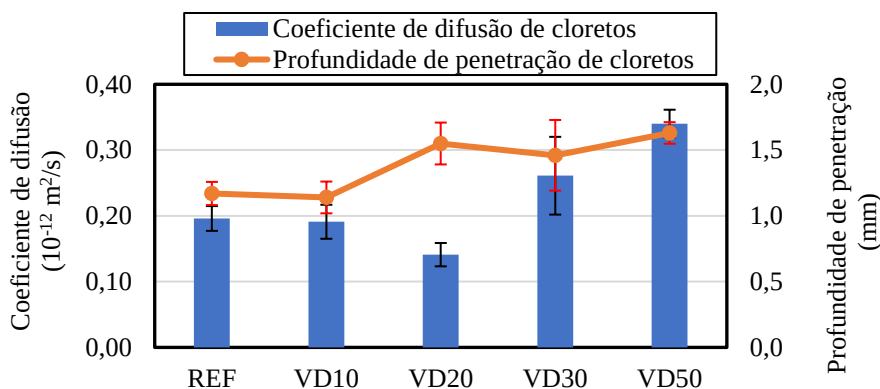
Tabela 50 – Frente de penetração de cloretos e coeficientes de difusão de cloretos aos 28 dias.

Traço	Frente de penetração de cloretos				Coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário			
	Média (mm)	Desvio padrão (mm)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao	Média ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Desvio padrão ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao
REF	1,17	1,26	2,36	REF	0,196	0,019	9,63	REF
VD10	1,14	0,93	1,78	NÃO	0,191	0,026	13,57	NÃO
VD20	1,55	0,88	1,69	SIM	0,141	0,018	12,56	NÃO
VD30	1,46	0,91	1,74	NÃO	0,261	0,059	22,60	NÃO
VD50	1,63	0,67	1,35	SIM	0,340	0,021	6,28	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 93 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de difusão de cloretos realizados aos 28 dias de idade para os compósitos cimentícios de referência e com substituição parcial do cimento por 10%, 20%, 30% e 50% de pó de vidro (em volume). Na mesma figura estão representadas as profundidades de penetração de cloretos obtidas nos corpos de prova após o ensaio de difusão de cloretos.

Figura 93 – Coeficiente de difusão de cloretos e profundidade de penetração de cloretos aos 28 dias de idade.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em relação ao compósito cimentício de referência os traços com substituição de 10% e 20% apresentaram uma diminuição de 2,6% e 28,1%, respectivamente, enquanto os traços com substituição de 30% e 50% apresentaram aumento de 33,2% e 73,5%, respectivamente, no coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias. Com base nos critérios apresentados na Tabela 24 todos os traços avaliados são classificados como extremamente resistentes à penetração de cloretos.

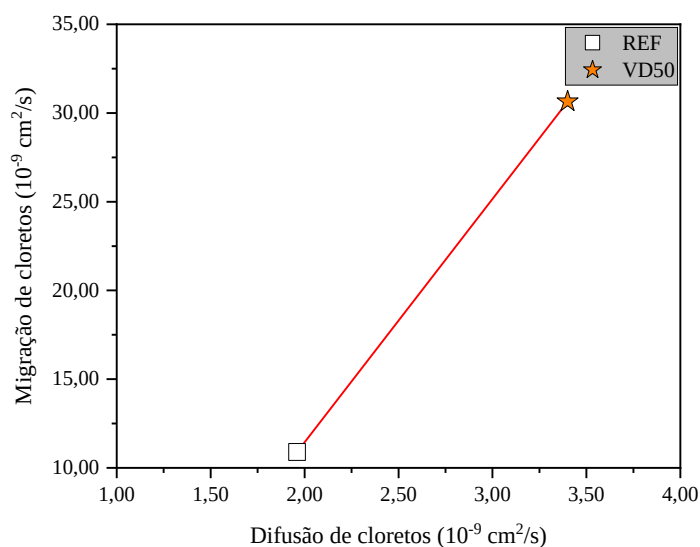
Teng, Afroughsabet e Ostertag (2018) encontraram em suas pesquisas com concreto que a substituição parcial do cimento por adições minerais e, particularmente, sílica ativa reduziu significativamente o coeficiente de difusão ou migração de cloretos do concreto. A substituição de 10% em massa de cimento por sílica ativa resultou em uma redução de 76% da difusão de cloretos aos 28 dias, enquanto a substituição de 30% de pó de vidro em uma mistura levou a redução de 31% em relação ao concreto simples. A substituição por ambas as adições também foi uma forma muito eficaz de melhorar a resistência à penetração de cloretos do concreto e uma redução de até 78% foi alcançado, embora isso seja apenas ligeiramente melhor do que o substituição apenas por sílica ativa. Esse fenômeno pode ser atribuído ao efeito da sílica ativa e da escória na formação de um gel $C - S - H$ secundário que refinou o tamanho dos poros e aumentou a zona de transição. Como consequência, o coeficiente de migração de cloretos do concreto foi reduzido. Não foram realizados estudos para incorporação maior que 30%. De acordo com os resultados obtidos no estudo de Teng, Afroughsabet e Ostertag (2018) e a classificação na Tabela 24, o concreto simples, que apresentou alta resistência à compressão, alcançou uma classificação de resistência "muito alta" contra penetração de cloretos para sua amostra de 28 dias. As misturas que continham um ou dois tipos de adições foram classificadas como "extremamente alta resistência".

A profundidade de penetração de cloretos aos 28 dias acompanhou o coeficiente de difusão de cloretos para todos os traços com exceção do traço com 20% de substituição. Neste caso, a penetração de cloretos aumentou enquanto o coeficiente de difusão diminuiu em relação ao traço sem pó de vidro. Aos 365 dias não se observou penetração de cloretos após o ensaio de difusão para os traços REF e VD50.

De acordo com Li *et al.* (2020), os coeficientes de difusão de íons cloreto de CCUAD variam de $0,02 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ a $0,41 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dependendo da relação água/cimento, regime de cura, volume de fibras e idade dos testes. Devido ao grande número de parâmetros envolvidos nos testes realizados, disponíveis na literatura, é difícil fazer uma comparação quantitativa da difusão dos íons cloreto nos CCUAD.

O coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário foi determinado nos ensaios de migração de cloretos e de difusão de cloretos apresentando comportamento semelhante, ou seja, o coeficiente aumentou para VD50 em relação ao REF. Foi feita uma correlação entre os resultados dos coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário obtidos nos ensaios de difusão e migração de cloretos conforme pode-se observar na Figura 94, destacando que cada um dos dois pontos dessa correlação corresponde ao par de propriedades para cada uma das composições (0% e 50%).

Figura 94 – Correlação entre os coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário determinados por difusão e migração de cloretos em corpos de prova de referência e com 50% de pó de vidro.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

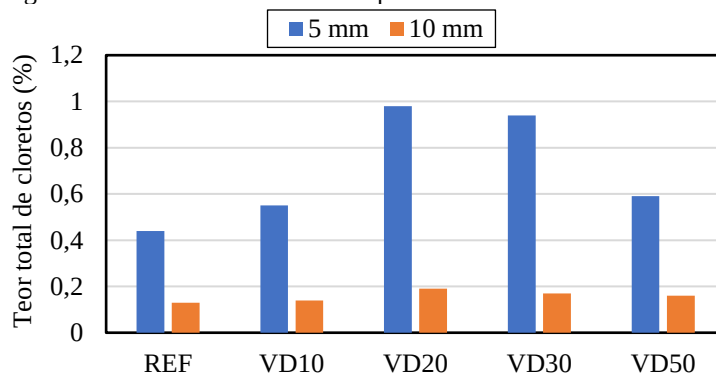
Observa-se que entre os valores dos coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário para os dois ensaios realizados existe uma proporção de 1:13,75. Observa-se, no entanto, que os valores encontrados tanto para o traço referência quanto para os traços com substituição de cimento por pó de vidro estão de acordo com os valores encontrados na literatura para a difusão dos íons cloreto de CCUAD.

Ao realizar a análise de variância ANOVA (Apêndice K) para a frente de penetração de cloretos observa-se que a substituição de cimento por 50% de pó de vidro exerceu um efeito significativo quando comparado com os traços REF e VD10. A diferença foi significativa também entre os teores de substituição de 20% com REF e VD10.

Para o coeficiente de difusão de cloretos, a análise estatística (Apêndice K) mostra que a substituição de cimento por 50% de pó de vidro exerceu um efeito significativo quando comparado com todos os traços avaliados. A diferença foi significativa também entre os teores de substituição de 20% com VD30.

Na Figura 95 são apresentados os cloretos totais em ácido nítrico expressos em relação aos aglomerantes na base de não voláteis.

Figura 95 – Teor total de cloretos após ensaio de difusão de cloretos.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com relação ao teor total de cloretos nas amostras submetidas ao ensaio de difusão de cloretos aos 28 dias de idade, o traço com maior teor de cloretos foi o VD20, que apresentou o melhor comportamento com relação ao coeficiente de difusão. Apesar desse resultado, todos os compósitos cimentícios com substituição de cimento por pó de vidro apresentaram teor total de cloretos maior que o traço referência, sem incorporação de pó de vidro.

De acordo com Matos e Sousa-Coutinho (2012), o uso em argamassas do pó de vidro em substituição parcial do cimento aumenta a resistência à penetração de cloretos em comparação com a argamassa de controle, especialmente para substituição de 20% e também para 10%. Jain e Neithalath (2010) realizaram o teste NT BUILD 492:2011 e obtiveram desempenho semelhante, somente aos 56 dias de cura.

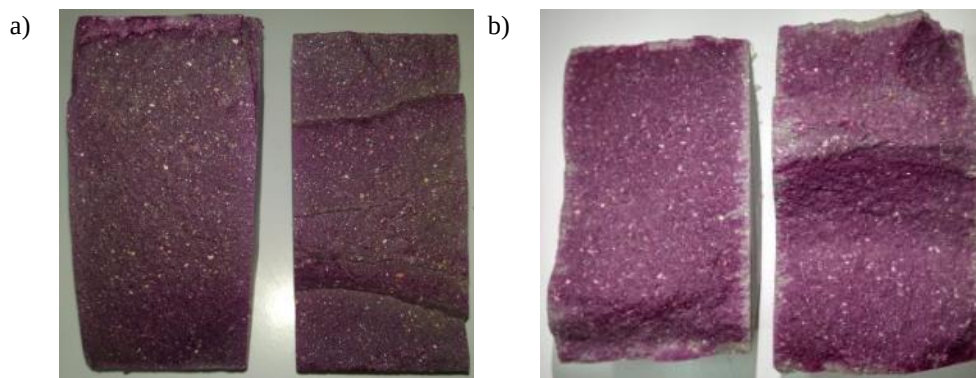
4.4.5 Efeitos combinados de difusão de cloretos com profundidade de carbonatação

Após serem submetidos ao ensaio de difusão de cloretos quatro corpos de prova do compósito cimentício de referência (0%) e quatro do compósito com substituição de cimento por pó de vidro (50%) foram mantidos em câmara de carbonatação por dois anos.

Malheiro *et al.* (2014) estudaram matrizes cimentícias com e sem adição de cinza volante com a finalidade de avaliar a ação combinada da ação de cloretos com a carbonatação. Se por um lado a redução da permeabilidade da matriz cimentícia com incorporação de cinza volante reduz a penetração do dióxido de carbono na estrutura, por outro as reações pozolânicas, e o consequente consumo de hidróxido de cálcio, diminuem a reserva alcalina da matriz, resultando em uma frente de carbonatação mais rápida quando comparada às matrizes mais permeáveis, sem incorporação de cinza volante.

Nas amostras de referência estudadas no presente trabalho não se observa profundidade de carbonatação, enquanto nas amostras com pó de vidro observa-se uma indicação de carbonatação após dois anos de exposição. Na Figura 96 pode ser visualizado o efeito da carbonatação nas amostras contendo 50% de pó de vidro (b), o que não acontece nas amostras referência (a).

Figura 96 – a) Amostra não carbonatada de compósito cimentício referência; b) Amostra carbonatada de compósito cimentício com 50% de pó de vidro.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Nota-se que as marcas de carbonatação aparecem nas duas faces de maneira bastante irregular, tanto a face exposta ao $NaCl$ quanto a exposta ao $NaOH$, sendo 9,29 mm a espessura máxima da carbonatação.

No estudo de Malheiro *et al.* (2014), corpos de prova de argamassas de cimento e areia na proporção de 1:3 com relação água/cimento em torno de 0,5 foram moldados com e sem incorporação de cinza volante e submetidos a ciclos de molhagem e secagem. Metade das amostras foi colocada em solução contendo $NaCl$ (3,5%) por dois dias e 12 dias em câmara de carbonatação (4% CO_2). A outra metade foi colocada em água destilada por dois dias e 12 dias em câmara de carbonatação (4% CO_2).

Os resultados deixam clara a influência da presença de cloretos sobre a evolução da frente de carbonatação tanto para as argamassas sem cinza volante quanto para aquelas com cinza volante. Essa influência é maior para as argamassas sem cinza volante. Há uma redução aproximada de 51% na profundidade de carbonatação das argamassas submetidas à ação combinada dos agentes agressores quando comparada à profundidade obtida para os corpos de prova sujeitos apenas ao CO_2 . No caso dos corpos de prova com cinza volante essa redução é de aproximadamente 31%.

Como esperado e confirmando o resultado obtido para o compósito com incorporação de 50% de pó de vidro, observam-se profundidades de carbonatação bem mais elevadas para as argamassas contendo adições.

4.4.6 Resistividade elétrica

Na Tabela 51 apresentam-se os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios estudados nas idades de 7 dias, 28 dias, 91 dias, 180 dias e 230 dias.

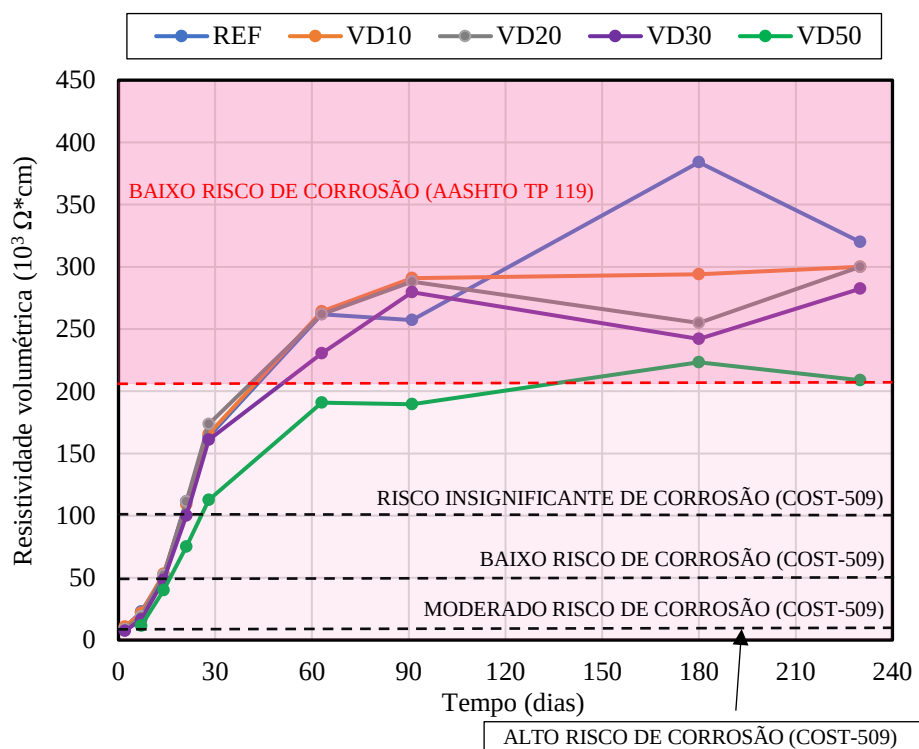
Tabela 51 – Resistividade elétrica dos compósitos cimentícios estudados.

Período		Traços				
		REF	VD10	VD20	VD30	VD50
7 dias	Média ($k\Omega.cm$)	22,8	21,72	18,8	16,37	11,37
	DP ($k\Omega.cm$)	0,2	0,1	0,15	0,09	0,08
	CV (%)	0,86	0,45	0,79	0,52	0,66
	Diferença significativa em relação ao REF		SIM	SIM	SIM	SIM
28 dias	Média ($k\Omega.cm$)	163,65	165,55	173,51	124,28	112,5
	DP ($k\Omega.cm$)	1,62	2,85	1,8	5,06	0,76
	CV (%)	0,99	1,72	1,04	4,07	0,67
	Diferença significativa em relação ao REF		NÃO	SIM	SIM	SIM
91 dias	Média ($k\Omega.cm$)	257,43	291,09	288,24	252,63	189,87
	DP ($k\Omega.cm$)	10,41	8,82	10,19	0	10,47
	CV (%)	4,04	3,03	3,53	0	5,52
	Diferença significativa em relação ao REF		SIM	SIM	NÃO	SIM
180 dias	Média ($k\Omega.cm$)	385,65	295,56	254,91	257,43	224,34
	DP ($k\Omega.cm$)	30,95	26,94	3,94	10,41	19,47
	CV (%)	8,03	9,12	1,55	4,04	8,68
	Diferença significativa em relação ao REF		SIM	SIM	SIM	SIM
230 dias	Média ($k\Omega.cm$)	331,03	309,89	306,67	282,86	208,76
	DP ($k\Omega.cm$)	0	10	11,55	14,85	4,54
	CV (%)	0	3,23	3,77	5,25	2,17
	Diferença significativa em relação ao REF		NÃO	NÃO	SIM	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Figura 97 apresenta o perfil de evolução da resistividade elétrica média dos corpos de prova de referência (0%) e contendo pó de vidro em substituição ao cimento Portland (10%, 20%, 30% e 50%). Os corpos de prova foram mantidos submersos em solução saturada de cal até o dia do ensaio. As linhas pontilhadas representam as faixas de risco de corrosão: alto ($< 10 k\Omega.cm$), moderado (10 a $50 k\Omega.cm$), baixo (50 a $100 k\Omega.cm$) e insignificante ($> 100 k\Omega.cm$), segundo a COST 509. A AASHTO TP 119:2018 estabelece o limite de $207 k\Omega.cm$ como limite para o risco de corrosão.

Figura 97 – Resistividade elétrica volumétrica dos compósitos cimentícios estudados.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Para todas as amostras estudadas, a resistividade elétrica aumentou com o passar do tempo, devido à maior hidratação da pasta e redução na concentração de fluidos nos poros do concreto, com a crescente secagem dos corpos de prova, tornando-os menos condutivos.

De acordo com estudos de Ribeiro (2010), a condução da corrente elétrica através do concreto ocorre por meio de poros contínuos e microfissuras preenchidos com água e presentes na matriz.

Apesar de apresentar valores de resistividade elétrica inferiores aos da amostra de referência, os compósitos cimentícios contendo pó de vidro apresentaram valores bastante superiores ao limite que considera uma insignificante probabilidade de corrosão ($> 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$). Os corpos de prova de referência e os corpos de prova com substituição de cimento por pó de vidro apresentaram menor resistividade em ambiente úmido, situação mais propícia à corrosão, e esse comportamento foi mantido durante todo o tempo do ensaio.

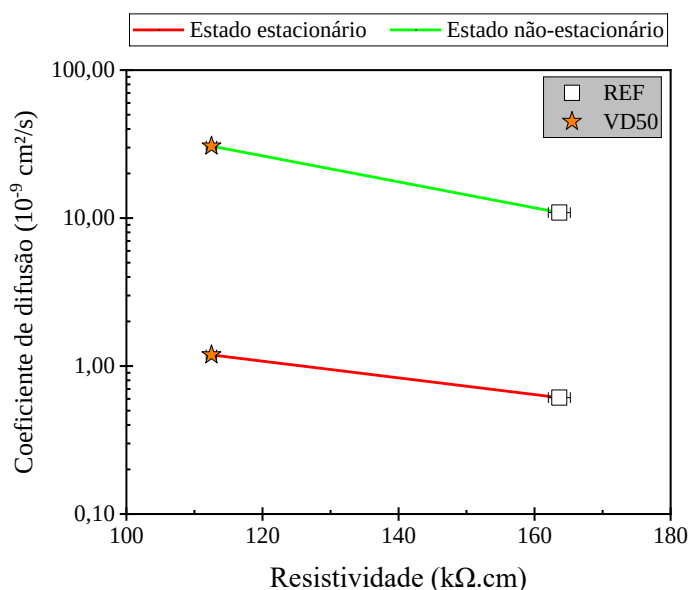
Sohail *et al.* (2021) ensaiaram um CUAD com 150 MPa aos 28 dias e encontraram um valor de resistividade de $480 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$. Os compósitos cimentícios avaliados neste trabalho atingiram valores em torno de 150 MPa a partir de 91 dias. Nessa idade os valores encontrados para resistividade variaram de $190 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ para o VD50 a $291 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ para o VD10. Aos 180 dias os valores de resistividade variaram de $224 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ para o VD50 a $386 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ para o REF.

Para o CUAD, a maior resistência à corrente elétrica sugere que há um número menor de poros menores que não estão interligados. Durante a fase de propagação da corrosão, a maior resistividade do concreto dificulta o processo de corrosão na interface aço-concreto reduzindo

a mobilidade dos íons Fe^{2+} e OH^- .

As pesquisas de Ribeiro (2010) e Santos (2006) indicaram que existe uma relação inversamente proporcional entre a resistividade e os coeficientes de difusão. Foi feita uma análise dos resultados obtidos aos 28 dias conforme pode-se observar na Figura 98, destacando que cada um dos dois pontos dessa correlação corresponde ao par de propriedades para cada uma das composições (0% e 50%).

Figura 98 – Correlação entre os coeficientes de difusão e a resistividade elétrica medida aos 28 dias de idade em corpos de prova de referência e com 50% de pó de vidro, mantidos em ambiente úmido.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

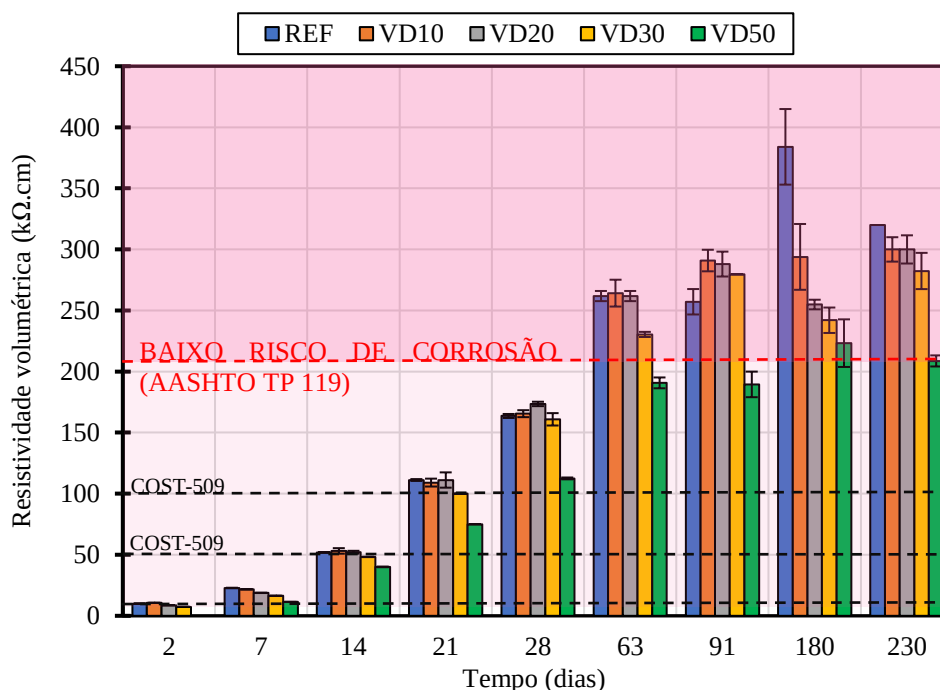
Esse resultado, apesar de não ser conclusivo, é um indicativo de que a correlação é válida para amostras de compósitos cimentícios contendo pó de vidro, desde que mantidos em ambiente úmido, o que é a situação mais propícia para que ocorra a corrosão. Assim, quanto maior a resistividade do concreto, menor a penetração de íons cloreto e, conseqüentemente, menor a probabilidade de ocorrer corrosão. Nesse sentido, o compósito cimentício com incorporação de pó de vidro apresenta menor resistividade e maior coeficiente de difusão que o compósito referência.

Na Figura 99 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios em várias idades. Observou-se que o aumento no teor de pó de vidro em substituição ao cimento Portland provocou uma diminuição significativa na resistividade elétrica. Essa diminuição entre a resistividade elétrica do compósito referência e do compósito com substituição de 50% de cimento por pó de vidro variou de 22,81% a 50,12% entre as idades analisadas.

Aos 230 dias, a diminuição da resistividade em relação ao compósito cimentício de referência foi de 6,4%, 7,4%, 14,6% e 36,9% para os traços VD10, VD20, VD30 e VD50,

respectivamente. Os resultados de resistividade elétrica e as análises estatísticas de cada amostra estão apresentados no Apêndice L.

Figura 99 – Resistividade elétrica dos compósitos cimentícios.

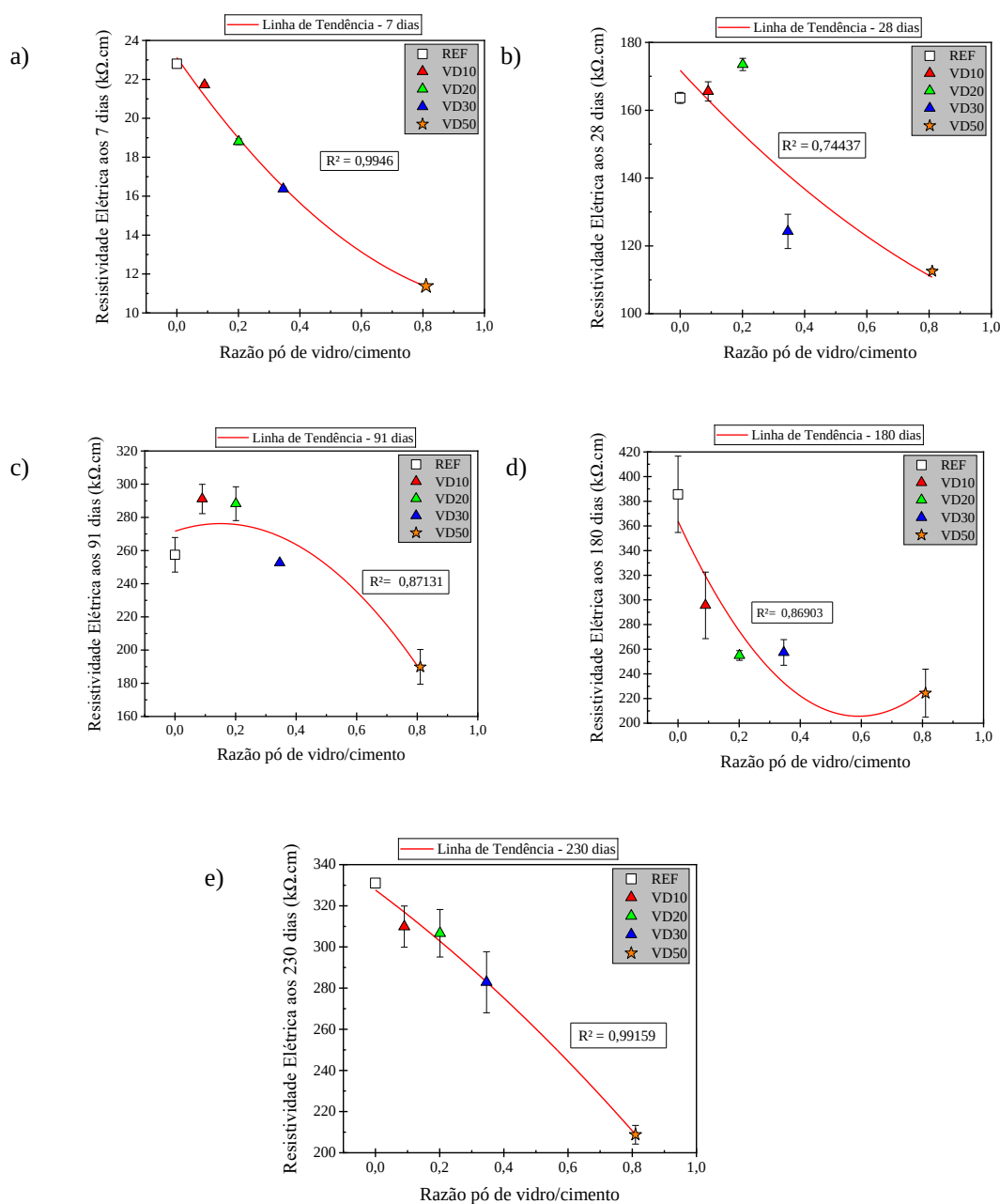


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Aos sete dias todos os compósitos apresentaram diferença estatística entre eles. Do mesmo modo, aos 28 dias todos os compósitos apresentaram diferença estatística entre eles com exceção de REF e VD10, que são estatisticamente equivalentes. Da análise estatística aos 91 dias observa-se que REF é equivalente a VD30 e VD10 é equivalente a VD20. Todas as outras comparações são diferentes estatisticamente. Aos 180 dias observa-se que REF é estatisticamente diferente de todas as amostras e VD10 é diferente estatisticamente de VD50. Aos 230 dias não há diferença estatística entre REF e VD10 e VD20. A incorporação de 30% e 50% de pó de vidro altera significativamente os valores de resistividade elétrica.

A resistividade elétrica indica a resistência do material à passagem de corrente elétrica; quanto maior a resistividade, maior a dificuldade de movimentação iônica no interior do material. Pode-se verificar na Figura 100 a correlação existente entre a relação pó de vidro/cimento e os resultados de resistividade elétrica aos 7 dias, 28 dias, 91 dias e 180 dias e 230 dias.

Figura 100 – Correlação razão pó de vidro/cimento versus resistividade elétrica dos compósitos cimentícios: 7 dias (a), 28 dias (b), 91 dias (c), 180 dias (d) e 230 dias (e).



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A razão pó de vidro/cimento versus resistividade apresentou correlação de 99%, 74%, 87%, 87% e 99% para as idades de 7 dias, 28 dias, 91 dias, 180 dias e 230 dias, respectivamente.

A resistividade diminui com o aumento do teor de pó de vidro podendo-se inferir que a porosidade e a permeabilidade aumentam e a densidade dos compósitos cimentícios diminuem com o aumento do teor de pó de vidro.

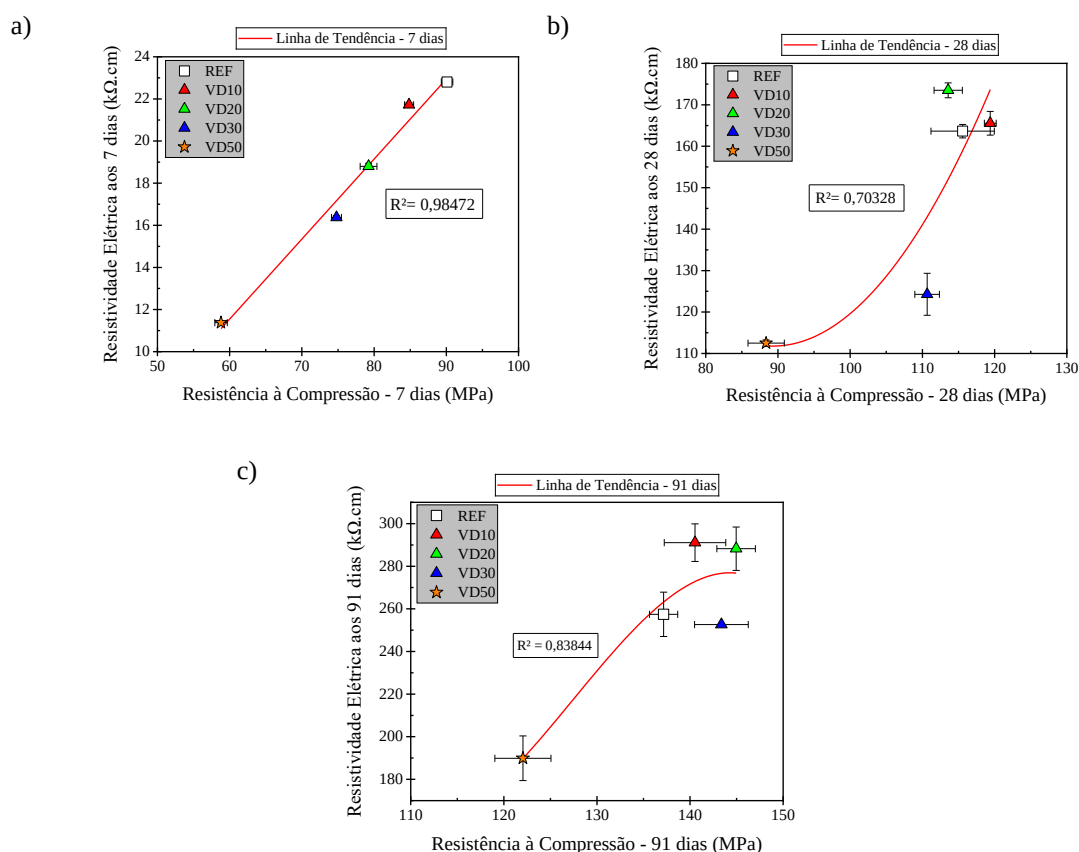
Por meio da aplicação da técnica de resistividade elétrica foi possível monitorar a evolução da hidratação da matriz cimentícia. A resistividade elétrica das matrizes aumentou com o passar do tempo até os 180 dias; aos 230 dias as matrizes referência e com 50% de pó de vidro apresentaram resistividade menor que aos 180 dias (Figura 100). À medida que ocorreu a hidratação, a porosidade foi reduzida, consequentemente a disponibilidade de água livre também reduziu. Esses fatores contribuíram para o aumento da resistividade elétrica.

A diminuição na resistividade elétrica para os compósitos cimentícios produzidos com pó de vidro em relação à referência pode estar associada a um aumento da porosidade interconectada e/ou aumento da tortuosidade dos “caminhos”, e também à composição química da solução de água de poros.

Os resultados de resistividade elétrica foram correlacionados com os resultados de resistência à compressão, absorção capilar, porosidade e profundidade de penetração de cloretos.

As relações entre os resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica e resistência à compressão aos 7 dias, 28 dias e 91 dias foram plotadas em gráficos (Figura 101 (a), (b) e (c)).

Figura 101 – Relação entre resistividade elétrica e resistência à compressão de compósitos cimentícios aos 7 dias (a), 28 dias (b) e 91 dias (c).



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em todas as idades avaliadas verificou-se um aumento da resistividade com o aumento da resistência à compressão, sendo que a resistência à compressão é maior quanto menor é a quantidade de pó de vidro usada nos compósitos.

A resistividade versus resistência à compressão apresentou correlação de 98%, 70% e 84% para as idades de 7 dias, 28 dias e 91 dias, respectivamente. Pode-se inferir que os produtos formados pela reação pozolânica do pó de vidro não influenciaram de maneira significativa a resistência à compressão dos compósitos cimentícios.

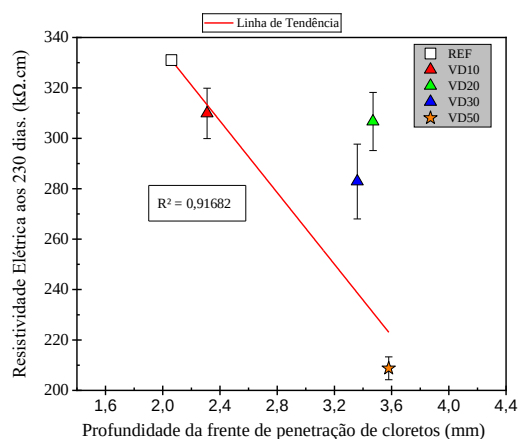
De acordo com Feldman (1985), os compostos hidratados formados pela reação pozolânica são mais eficientes para colmatar poros do que para aumentar resistência mecânica devido à menor densidade dos hidratos formados pela reação pozolânica quando comparados com os produtos originários da reação do cimento.

Não foram observadas correlações entre a absorção capilar e a resistividade elétrica. A resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aumentou até a idade de 180 dias. Para a idade de 230 dias a resistividade dos traços referência e com 50% de pó de vidro diminuiu.

Em todos os casos não foram observadas alterações significativas na absorção capilar. Considerando-se a dificuldade na determinação da total secagem ou saturação dos corpos de prova, há que considerar-se a não adequação do ensaio de absorção de água por capilaridade aos CUAD.

Na Figura 102 está apresentada a relação entre os resultados de resistividade elétrica e profundidade de penetração de cloretos após ciclos de molhagem/secagem em solução de *NaCl* na idade de 230 dias. Os resultados apresentaram uma correlação de 91,7%, mostrando que a resistividade elétrica é inversamente proporcional à profundidade de penetração de cloretos, indicando que o aumento da incorporação de pó de vidro proporciona o aumento da profundidade de penetração de íons cloreto.

Figura 102 – Correlação da profundidade de penetração de cloretos versus resistividade elétrica dos compósitos cimentícios em idades avançadas.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

No estudo de Narmluk e Nawa (2011), considerou-se que a resistência do *C-S-H* à difusão de íons cloreto deve-se à espessura das camadas *C-S-H* e à deposição de partículas *C-S-H* nos poros. No início, *C-S-H* é solto e poroso e contém uma variedade de tamanhos de poros. A deposição de partículas *C-S-H* pode ocorrer apenas nos grandes poros, que podem acomodar as partículas *C-S-H*.

A difusão iônica pode ocorrer em poros pequenos e grandes. Como resultado, quando os poros grandes são estreitados ou bloqueados, existem pequenos poros disponíveis para os íons se difundirem. Portanto, é possível que a deposição de partículas *C-S-H* nas paredes dos poros ocorra em paralelo com a difusão de íons através das camadas de *C-S-H*.

A deposição de partículas *C-S-H* induzem a um aumento da tortuosidade, resultando em caminhos mais longos para os íons se difundirem através das camadas *C-S-H* à medida que a hidratação progride.

4.4.7 Condutividade elétrica e pH dos compósitos cimentícios

Na Tabela 52 podem ser verificados os resultados de condutividade elétrica e pH.

Os compósitos cimentícios com 50% de pó de vidro em substituição ao cimento apresentaram resultados de pH similares ao compósito referência, ou seja, a substituição do cimento pelo pó de vidro não alterou essa propriedade.

Com relação aos resultados da condutividade elétrica, os traços com pó de vidro tiveram sua condutibilidade diminuída com o aumento do teor de pó.

A análise estatística dos resultados dos ensaios da condutividade elétrica e do pH para os compósitos cimentícios aos 365 dias está apresentada no Apêndice M.

Tabela 52 – Resultados de condutividade elétrica e pH das soluções produzidas com os compósitos cimentícios após 365 dias de cura.

Amostras	pH				Condutividade			
	Média	Desvio padrão	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF	Média (mS/cm)	Desvio padrão (mS/cm)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	12,40	0,09	0,70		5,20	0,16	2,9	
VD10	12,58	0,09	0,68	NÃO	8,02	0,14	1,70	SIM
VD20	12,32	0,09	0,74	NÃO	4,13	0,14	3,42	SIM
VD30	12,45	0,09	0,69	NÃO	5,69	0,50	8,80	NÃO
VD50	12,32	0,09	0,74	NÃO	4,13	0,14	3,42	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Diante desse resultado, pode-se inferir que a diminuição na condutividade elétrica dos compósitos cimentícios produzidos com pó de vidro pode estar relacionada com a diminuição na tortuosidade dos “caminhos” condutivos no interior da matriz e com as condutividades iônicas das soluções que foram alteradas com a incorporação do pó de vidro.

4.4.8 Condutividade elétrica e pH das soluções de água de poros

Na Tabela 53 podem ser verificados os resultados obtidos na caracterização das soluções de água de poros.

A análise estatística dos resultados dos ensaios da condutividade elétrica e do pH para as soluções de água nos poros está apresentada no Apêndice N.

Tabela 53 – Valores de pH e condutividade elétrica das soluções de água dos poros dos compósitos cimentícios.

Amostras	pH				Condutividade			
	Média	Desvio padrão	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF	Média (mS/cm)	Desvio padrão (mS/cm)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	12,40	0,09	0,75		8,14	0,52	6,33	
VD10	12,39	0,10	0,81	NÃO	7,57	0,32	4,21	NÃO
VD20	12,37	0,14	1,10	NÃO	6,85	0,43	6,29	SIM
VD30	12,33	0,15	1,18	NÃO	6,51	0,72	10,99	SIM
VD50	12,30	0,14	1,10	NÃO	5,76	0,28	4,90	SIM

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Verificou-se que as soluções apresentaram resultados similares do pH, porém para a condutividade elétrica os valores apresentaram alguma variação. Ao comparar os resultados das soluções obtidas a partir da mistura dos materiais e das soluções obtidas com o material extraído dos compósitos cimentícios na idade de 365 dias (Tabela 52), verifica-se que o pH não sofreu alterações, ou seja, a solução continuou saturada pelo hidróxido de cálcio. Por outro lado, observa-se uma diminuição da condutividade elétrica de 56% para a solução referência e 41% para a solução com 50% de pó de vidro. Provavelmente essa diminuição ocorreu devido às reações de hidratação dos compostos do cimento.

Um pH alto é importante para a durabilidade do concreto armado, porque a passivação do aço é garantida por um pH maior que 8,5, e em um ambiente alcalino, uma camada passiva de óxido se forma na superfície do aço de reforço e evita ataques de corrosão (LEWIS e FIDJESTØL, 2019).

4.4.9 Potencial de corrosão do aço em compósitos cimentícios

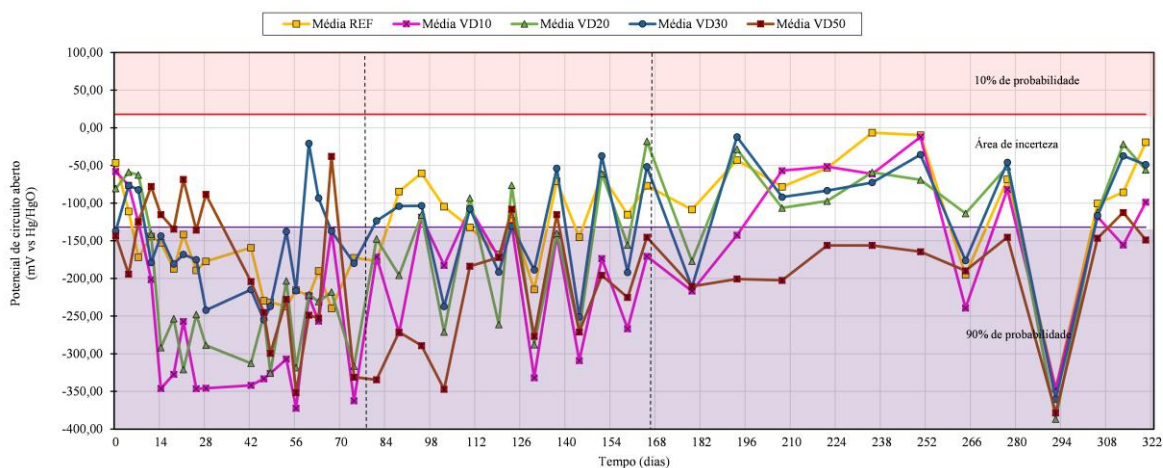
A técnica do potencial de corrosão é bastante utilizada em pesquisas que avaliam o processo corrosivo em concreto armado. A técnica indica se é ou não possível e quais as possibilidades de ocorrência da corrosão. Essa técnica está relacionada, principalmente, à difusividade de íons através dos poros do concreto. Por meio dos resultados do ensaio de potencial de corrosão é possível analisar a duração do período de iniciação da corrosão das barras analisadas, isto é, o momento em que o potencial ficou inferior a -132 mV (probabilidade de corrosão superior a 90%), tendo o eletrodo *Hg/HgO* saturado como referência.

Na Figura 103 são apresentados os resultados de potencial de corrosão obtidos após ciclos de secagem e molhagem. Os corpos de prova foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem

em solução de $NaCl$ a 3,5%, após cura imersa em solução saturada de hidróxido de cálcio por 28 dias.

Até os 67 dias os ciclos foram de três dias imersos e quatro dias em estufa. A partir de 67 dias até 165 dias os ciclos passaram a ser de sete dias em imersão e sete dias em estufa. De 165 dias até 305 dias aumentou-se novamente o ciclo, passando a 14 dias em imersão e 14 dias em estufa. Finalmente, após 305 dias os ciclos voltaram a ser de sete dias em imersão e sete dias em estufa. Essas mudanças na duração dos ciclos de molhagem/secagem foram impulsionadas pelos resultados encontrados na tentativa de acelerar o processo. Os valores apresentados são uma média dos quatro valores obtidos para cada composição. O potencial de corrosão das barras foi medido em todos os semiciclos aos quais os corpos de prova foram submetidos e mostrou variação durante todo o ensaio, com valores maiores ou menores. Vale salientar que os resultados apresentaram variação muito alta entre as amostras para todos os teores avaliados.

Figura 103 – Evolução do potencial de corrosão das barras de armadura dos corpos de prova de compósitos cimentícios contendo pó de vidro em diversos teores, em função da idade, nos ciclos completos.



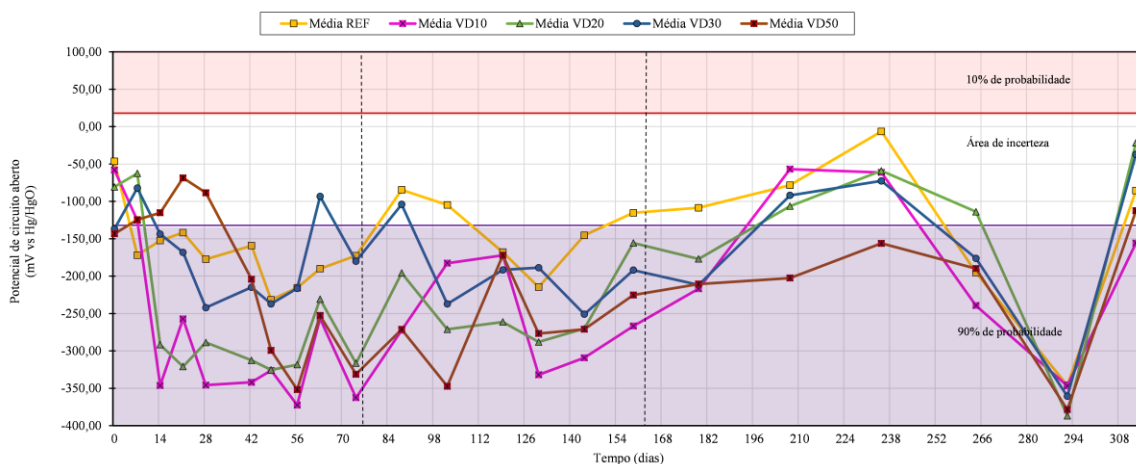
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os valores de potencial de corrosão mais positivos são verificados após os ciclos de secagem, pois, devido à redução do volume de eletrólito, ocorre o aumento das concentrações das substâncias dissolvidas e, de acordo com a equação de Nernst, o potencial de equilíbrio aumenta com o aumento da atividade, isto é, das concentrações efetivas das substâncias oxidadas.

Estudos desenvolvidos por Santos (2006) confirmam esse comportamento e mostram uma correlação inversamente proporcional entre o potencial de corrosão e o teor de umidade do concreto, significando que o aumento do teor de umidade implica na diminuição do potencial de corrosão medido nas barras.

Na Figura 104, apresentam-se as medidas do potencial de corrosão dos corpos de prova no estado úmido que é o mais crítico.

Figura 104 – Evolução do potencial de corrosão das barras de armadura dos corpos de prova de compósitos cimentícios contendo pó de vidro em diversos teores, em função da idade, nos semiciclos no estado úmido.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Pelos resultados obtidos observa-se que todos os traços atingem em algum momento a zona incerta com exceção do traço com 50% de incorporação de pó de vidro.

Isso ocorre, provavelmente, pelo fato de os compósitos com pó de vidro possuírem maior rede de poros capilares (apresentam maior capacidade de absorção da solução contendo $NaCl$ – sucção capilar e maior dificuldade em perder essa umidade – menor porosidade total) em comparação com as amostras de referência.

O ensaio foi interrompido aos 322 dias sem que os resultados atingissem o nível seguro e as amostras foram rompidas para observação das barras inseridas nos corpos de prova.

Na Figura 105 observam-se as barras inseridas nos compósitos cimentícios REF e VD50 após a ruptura dos corpos de prova.

Figura 105 – Barras de aço inseridas nos corpos de prova após ensaio de potencial de corrosão.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Nota-se que as barras não sofreram corrosão na região central, sendo que a corrosão observada é, provavelmente, devido ao ingresso de água na parte superior do corpo de prova devido ao tipo de vedação e também ao esmalte utilizado na delimitação da área do aço.

De acordo com Li *et al.* (2020), a corrosão do aço em concreto induzida por ingresso de cloretos é a principal causa de deterioração. Como a permeabilidade ao íon cloreto no CUAD é extremamente baixa, a resistência à corrosão é alta.

Ghafari *et al.* (2015) usaram o teste acelerado de corrosão para avaliar a taxa de corrosão de barras de aço em concretos de alto e ultra alto desempenho e determinaram que o tempo de fissuração no CAD foi menos da metade do tempo no CUAD.

A taxa de corrosão para barras de aço em CUAD foi de 0,01 $\mu\text{m}/\text{ano}$, muito abaixo do valor limite de 1,00 $\mu\text{m}/\text{ano}$, de acordo com a pesquisa de Roux, Andrade e Sanjuan (1996).

Fan *et al.* (2019) investigaram a influência das fibras revestidas de latão e zinco na resistência elétrica de CUAD submetido à cura padrão e a resistência à corrosão das barras de aço incorporadas. O teste eletroquímico foi realizado em amostras de CUAD imerso em solução de *NaCl* a 3,5% em peso por um ano. Os resultados mostraram que nenhum cloreto foi detectado, e a densidade da corrente de corrosão estava em torno de 0,01 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando que não havia corrosão na barra de aço.

4.5 Estudos microestruturais

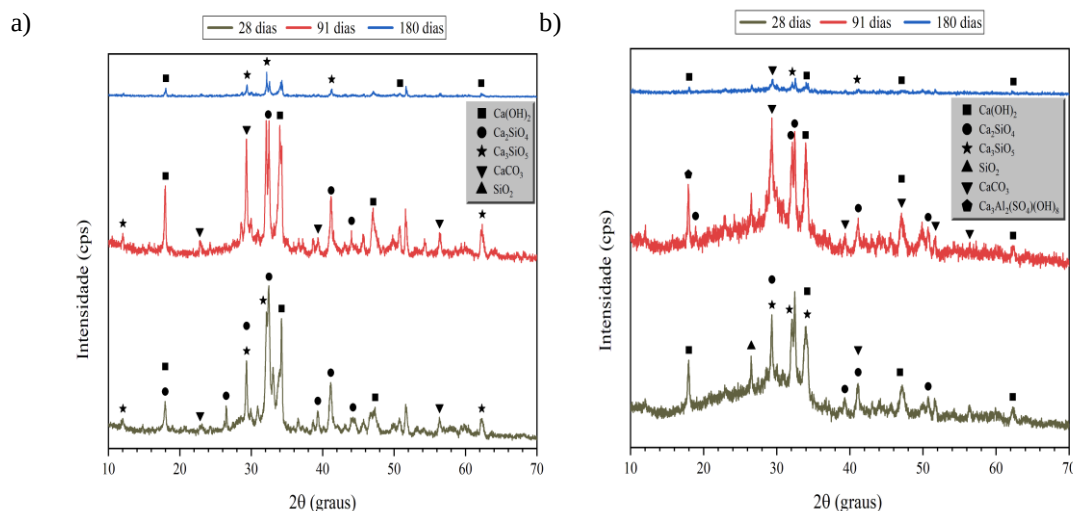
4.5.1 Difratomia de raios X

As principais fases cristalinas identificadas nos difratogramas realizados foram: quartzo, portlandita ou hidróxido de cálcio, silicato tricálcico ou alita, silicato dicálcico ou belita e calcita. Durante a hidratação do cimento, outra fase formada a partir das reações da alita e belita é o silicato de cálcio hidratado ($C - S - H$) que não possui picos cristalinos, apresentando uma estrutura amorfa, que quando presente na evolução da hidratação do cimento é identificado através da formação de halo amorfo no difratograma de raios-X.

Na Figura 106 são apresentados os difratogramas das pastas de cimento dos traços REF e VD50 nas idades de 28 dias, 91 dias e 180 dias. Nos traços REF e VD50 é possível observar elevados picos cristalinos de portlandita e calcita, além de componentes não hidratados do cimento, como alita e belita. O traço VD50 aos 28 dias, 91 dias e 180 dias de idade, entre os ângulos de 30° a 35°, apresenta picos cristalinos de produtos não hidratados do cimento (alita e belita) e de portlandita quase duas vezes menor que o traço REF.

O efeito de diluição do cimento promovido pela sua substituição por pó de vidro é o principal responsável pela redução desses picos. Para os picos de portlandita entre os ângulos de 15° a 20° e 45° a 50° aos 28 dias, os traços REF e VD50 apresentam intensidade semelhante, uma vez que a participação do pó de vidro na reação pozolânica ainda não evidencia diferenças significativas. Enquanto aos 91 dias os mesmos picos de portlandita já apresentam diferenças visíveis entre os traços REF e VD50, sendo consumidos pela reação pozolânica do pó de vidro. Esse comportamento repete-se aos 180 dias com a portlandita quase nula no traço VD50, bem menor que no REF. Isso implica que, em idades avançadas, a portlandita foi totalmente consumida pelas reações pozolânicas.

Figura 106 – Difratomogramas das pastas de cimento aos 28 dias, 91 dias e 180 dias: a) do traço REF; b) VD50.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Através dos difratogramas apresentados por meio da Figura 106 a, pode-se notar que ao longo da hidratação das pastas de referência, houve uma diminuição nos picos dos silicatos (alita e belita) para a formação dos picos de hidróxido de cálcio ou portlandita.

Assim como na pasta de referência analisada, a pasta com adição de sílica ativa e incorporação de pó de vidro (Figura 106 b), ao longo da hidratação, apresentou diminuição nos picos de alita e belita e consequentemente formação de portlandita. É notável a presença de compostos como calcita em todas as idades e quartzo em idade avançada.

A presença de sílica ativa na composição do CCAD pode influenciar as observações do efeito pozolânico do pó de vidro, uma vez que se trata de um material pozolânico, porém muito mais fino e com maior superfície específica, reagindo mais rapidamente e intensamente que o pó de vidro, consumindo precocemente boa parte da portlandita anteriormente disponível e que reagiria com o pó de vidro.

Nos dois traços analisados, ambos com sílica ativa, observou-se a redução acentuada da quantidade de hidróxido de cálcio, como por exemplo na posição próxima a 18°, atribuída ao efeito fíler e às reações pozolânicas da sílica ativa na matriz de cimento. A sílica ativa reduz a quantidade de vazios da matriz de cimento, diminuindo e limitando a precipitação do hidróxido de cálcio em grandes cristais. As partículas de sílica ativa podem atuar ainda como pontos de nucleação que também provocam uma aceleração na hidratação do cimento e a reação pozolânica que se desenvolve pela reação entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio, é capaz de reduzir o teor de hidróxido de cálcio.

Na pesquisa de Vaitkevičius, Šerelis e Hilbig (2014), a fase cristalina da portlandita diminuiu com o aumento do pó de vidro e percebeu-se que quando a quantidade de pó de vidro aumenta, as intensidades de alita e belita tendem a diminuir. Os picos reduzidos de alita e belita provavelmente estão relacionados a uma melhor solubilidade da fase do clínquer. A reação

pozolânica da portlandita com sílica ativa e pó de vidro provavelmente teve a maior influência na diminuição da intensidade dos picos de portlandita.

Esse mesmo comportamento foi verificado no presente trabalho para as três idades avaliadas: 28 dias, 91 dias e 180 dias.

Resultados experimentais revelaram (VAITKEVIČIUS; ŠERELIS; HILBIG, 2014) que o pó de vidro pode reagir cerca de cinco vezes menos com a portlandita em comparação com sílica ativa e também que o pó de vidro aumenta a taxa de dissolução do cimento Portland, acelerando o processo de hidratação.

Pan *et al.* (2017), utilizando um consumo inicial de cimento de 567 kg/m³ com substituição de 5% por pó de vidro em massa com granulometria em d_{50} de 20 µm, produziram pastas de cimento onde identificaram por meio de difração de raios X (DRX) a diminuição da quantidade de portlandita a partir da idade de sete dias, sendo esse efeito mais evidente na idade de 28 dias.

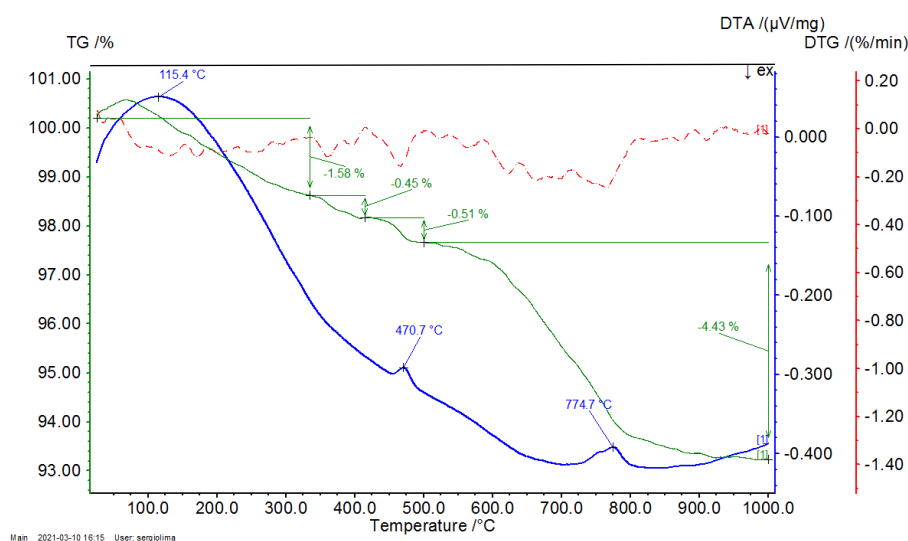
Para substituições em massa de 45% do cimento por pó de vidro, Du e Tan (2017), utilizando consumo inicial de cimento de 380 kg/m³ e pó de vidro com granulometria em d_{50} de 10 µm, constataram que a portlandita da mistura tinha sido consumida integralmente pela reação pozolânica com o vidro, apresentando relação molar de Ca/Si igual a 1. Em contrapartida, a substituição de 60% do cimento por pó de vidro apresentou relação molar de Ca/Si de 0,67, ou seja, a portlandita não foi totalmente consumida.

A fase de formação do $C - S - H$, que possui uma estrutura pouco cristalina, é representada nos difratogramas pelo halo amorfo entre 28° e 34° 2θ. Um fato interessante foi que a pasta com pó de vidro apresentou um aumento da fase amorfa em relação à referência. Embora o aumento da fase amorfa possa ser atribuído ao aumento das fases $C - S - H$, essa fase também pode ser atribuída à presença da sílica ativa.

4.5.2 Termogravimetria

Foram realizados ensaios de termogravimetria para pastas de referência (Figura 107) e para pastas com 50% de pó de vidro em substituição ao cimento Portland (Figura 108) aos 28 dias de idade. Os traços estudados tiveram um comportamento de perda de massa diferente ao longo da variação de temperatura aplicada durante a análise chegando a 7,0% e 3,8% para REF e VD50, respectivamente.

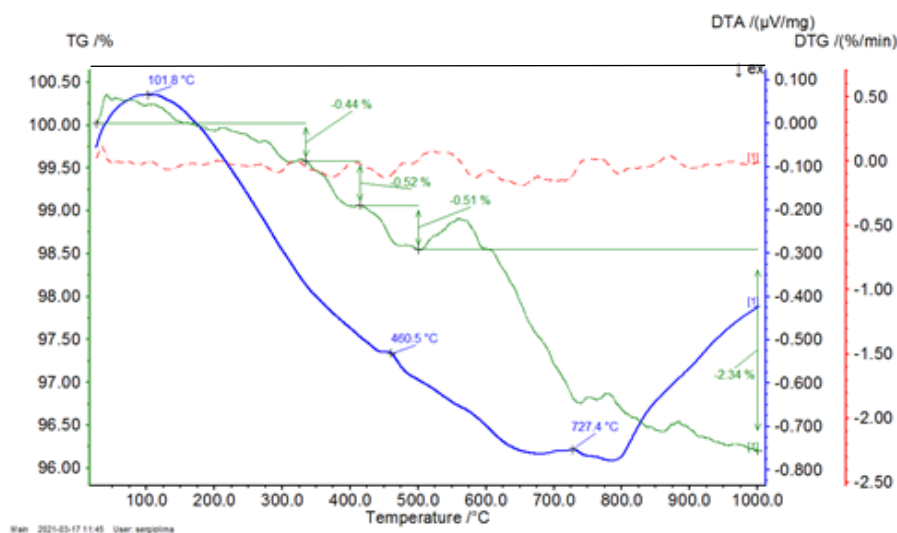
Figura 107 – Gráfico TG/DTG/DTA do traço de referência.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Para ambos os traços, REF e VD50, foram observadas transições principais, sendo que a primeira transição está associada à perda de água livre e desidratação do $C-S-H$ (temperatura até em torno de 335°C). Entre 335°C e 414°C observa-se a desidroxilação de aluminatos de cálcio hidratado e entre 414°C e 500°C da portlandita, com evento endotérmico entre 450°C e 500°C. De 500°C a 1000°C ocorre descarbonatação da calcita, com evento endotérmico entre 650°C e 800°C.

Figura 108 – Gráfico TG/DTG/DTA do traço VD50.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Ainda, percebe-se nas amostras a ocorrência de algum evento endotérmico entre 500°C e 650°C, possivelmente devido à transição vítrea da sílica ativa e/ou de quartzo presente, provocando discreta expansão térmica.

As reações que ocorrem quando pastas de cimento Portland são submetidas a um aumento

progressivo de temperatura apresentam três contribuições endotérmicas características que podem ser analisadas utilizando as curvas de TG/DTG. É possível realizar a quantificação do teor dos principais compostos hidratados formados e os teores de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio remanescentes na matriz hidratada (HOPPE FILHO *et al.*, 2017; MONTEAGUDO *et al.*, 2014). Cada uma das três fases apresenta uma faixa de temperatura correspondente, que é utilizada para a identificação dos compostos. Os intervalos de temperatura correspondem aos processos de desidratação, de desidroxilação e de descarbonatação.

Considerando a faixa de temperatura correspondente ao $C - S - H$ nas pastas de cimento a maior perda de massa nessa região inicial do gráfico ocorre para o compósito cimentício sem pó de vidro. Em compósitos cimentícios com adições reativas, como é o caso da sílica ativa e do pó de vidro, o comportamento esperado é a maior quantidade de $C - S - H$ em relação à pasta de referência. Vale ressaltar que as reações do pó de vidro ocorrem tardiamente em relação às reações do cimento e da sílica ativa.

A segunda faixa de temperatura corresponde à desidroxilação da amostra. Nesta fase é possível avaliar a influência das adições minerais na quantidade de água não evaporável relacionada ao hidróxido de cálcio. Pela análise do gráfico é perceptível que não há diferença na quantidade de $Ca(OH)_2$ entre REF e VD50 na idade de 28 dias.

A terceira faixa de temperatura corresponde à descarbonatação da amostra tendo relação direta com o teor de carbonato de cálcio da pasta. O traço com substituição de 50% de cimento por pó de vidro tem metade da perda de massa do traço referência. Tal ocorrência justifica-se predominantemente pela maior quantidade de cimento Portland no traço referência, mas também pode ser atribuída à carbonatação das amostras durante o tempo entre a preparação da amostra e a execução do ensaio.

Vários autores (LEE *et al.*, 2017; CHEYREZY, MARET e FROUIN, 1995; LI *et al.*, 2019; SHEN *et al.*, 2019 e LU *et al.*, 2020) descreveram o mesmo comportamento em seus estudos.

Lee *et al.* (2019) relataram a desidratação do AFm por volta dos 150°C e a presença de $C - S - H$, etringita e portlandita em ensaios realizados com um dia de cura a 20°C. Segundo Shen *et al.* (2019), as reações entre portlandita e pó de quartzo e sílica são aceleradas pela cura em autoclave e o teor de portlandita em CUAD a 20°C é muito baixo.

Para Lu *et al.* (2020) ocorreu uma perda de massa devido a impurezas encontradas nas garrafas pós-consumo. Neste trabalho isso não ocorre pelo fato de as garrafas terem sido lavadas antes da produção do pó de vidro.

Baseado em procedimento utilizado por Grilo *et al.* (2014) o teor de portlandita livre (t_{CH}) foi determinado a partir da perda de massa na faixa de 414-500°C ($PM_{(414-500^{\circ}C)}$), que corresponde à região de desidroxilação de portlandita, enquanto o teor de calcita (t_{CC}) presente nas amostras foi obtido a partir da perda de massa na faixa de 500-1000°C ($PM_{(500-1000^{\circ}C)}$)

que corresponde à liberação de CO_2 de carbonatos.

A partir dos resultados do ensaio de termogravimetria o teor de portlandita livre (t_{CH}) e calcita (t_{CC}) foram determinados pelas Equações 25 e 26. O teor de água ligada (t_A) foi determinado pela Equação 27.

$$t_{CH} = PM_{(414-500^\circ C)} * k_1 \quad (25)$$

$$t_{CC} = PM_{(500-1000^\circ C)} * k_2 \quad (26)$$

$$t_A = PM_{(00-335^\circ C)} \quad (27)$$

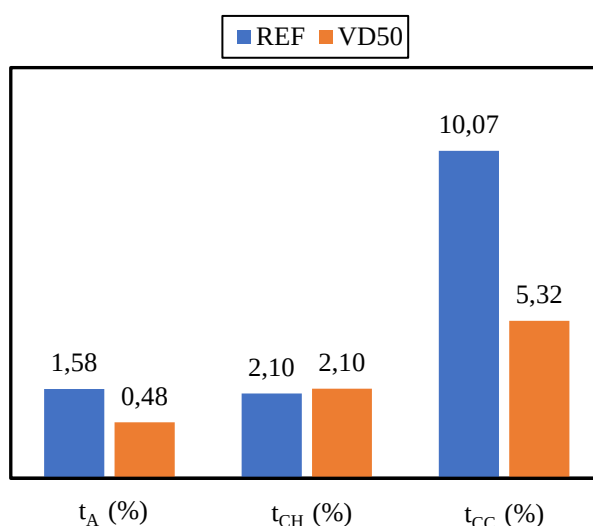
Sendo as constantes k_1 e k_2 os coeficientes das massas molares de CO_2 , $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ e H_2O de acordo com as Equações 28 e 29.

$$k_1 = \frac{MM_{Ca(OH)_2}}{MM_{H_2O}} = \frac{74}{18} \quad (28)$$

$$k_2 = \frac{MM_{CaCO_3}}{MM_{CO_2}} = \frac{100}{44} \quad (29)$$

Com base na perda de massa determinada nas curvas do ensaio de termogravimetria, as quantidades de água, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio foram calculadas pelas Equações 23 a 25, conforme apresentado na Figura 109.

Figura 109 – Teor de água, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio nos compósitos cimentícios referência (REF) e com 50% de pó de vidro (VD50).



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O teor de água ligada no compósito cimentício diminuiu com a incorporação de pó de vidro. Isto é devido à diluição do clínquer com o pó de vidro de reação mais lenta.

A diminuição observada no $C - S - H$ da pasta com a adição de sílica ativa e incorporação de

pó de vidro, é condizente com os resultados de resistência à compressão simples dos compósitos cimentícios, pois o compósito cimentício na idade analisada (28 dias) apresentou diminuição nos valores de resistência à compressão em comparação ao traço sem incorporação de pó de vidro.

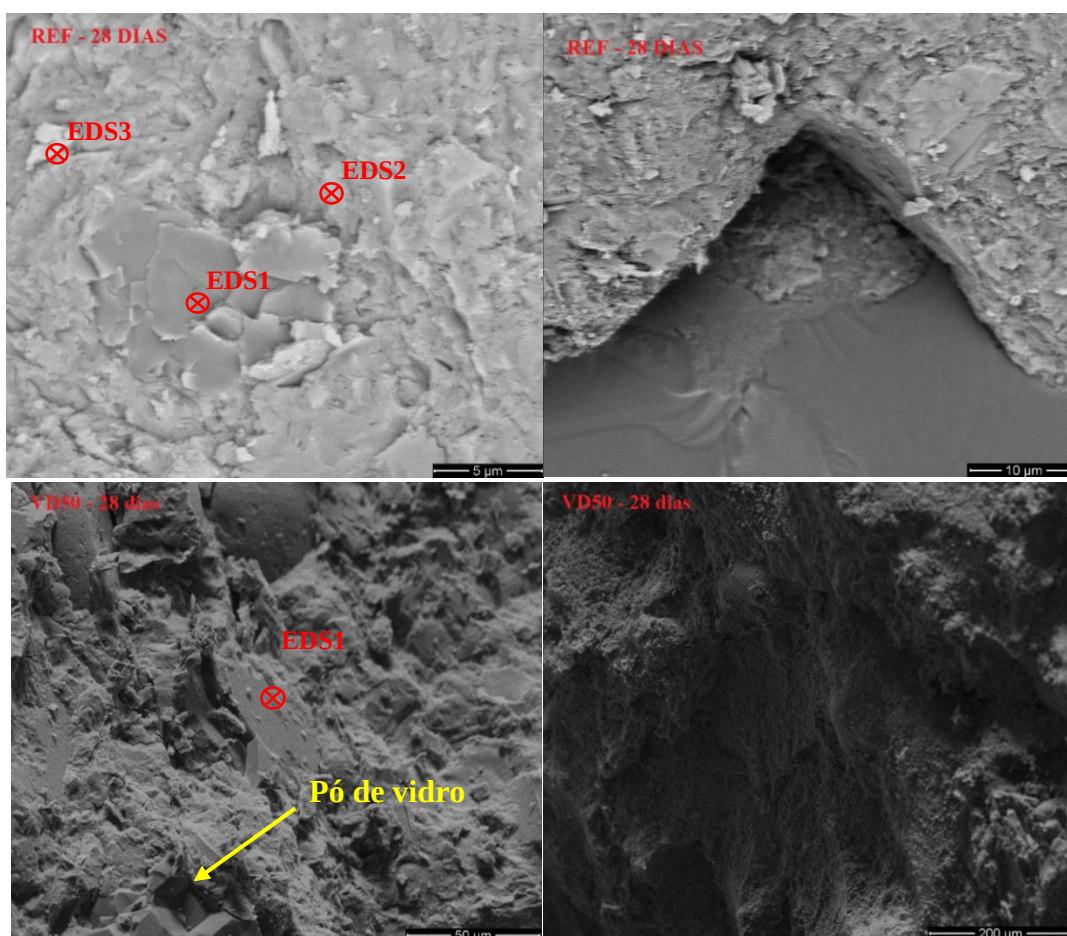
O teor de $Ca(OH)_2$ foi o mesmo com a incorporação de pó de vidro em relação ao compósito cimentício de referência. A substituição de cimento por pó de vidro diminui o teor de cimento de forma a diminuir a formação de hidróxido de cálcio. Por outro lado, a atividade pozolânica do pó de vidro consome o hidróxido produzido pela hidratação do cimento.

O teor de carbonato de cálcio diminuiu com a incorporação de 50% de pó de vidro e consequente diminuição de consumo de cimento, possivelmente devido ao efeito diluição.

4.5.3 Microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 110 são apresentadas as análises microestruturais realizadas por MEV nos traços REF e VD50 aos 28 dias e na Figura 111 é mostrada a identificação das partículas nos traços REF e VD50 realizada por energia dispersiva de raios X (EDS) aos 28 dias.

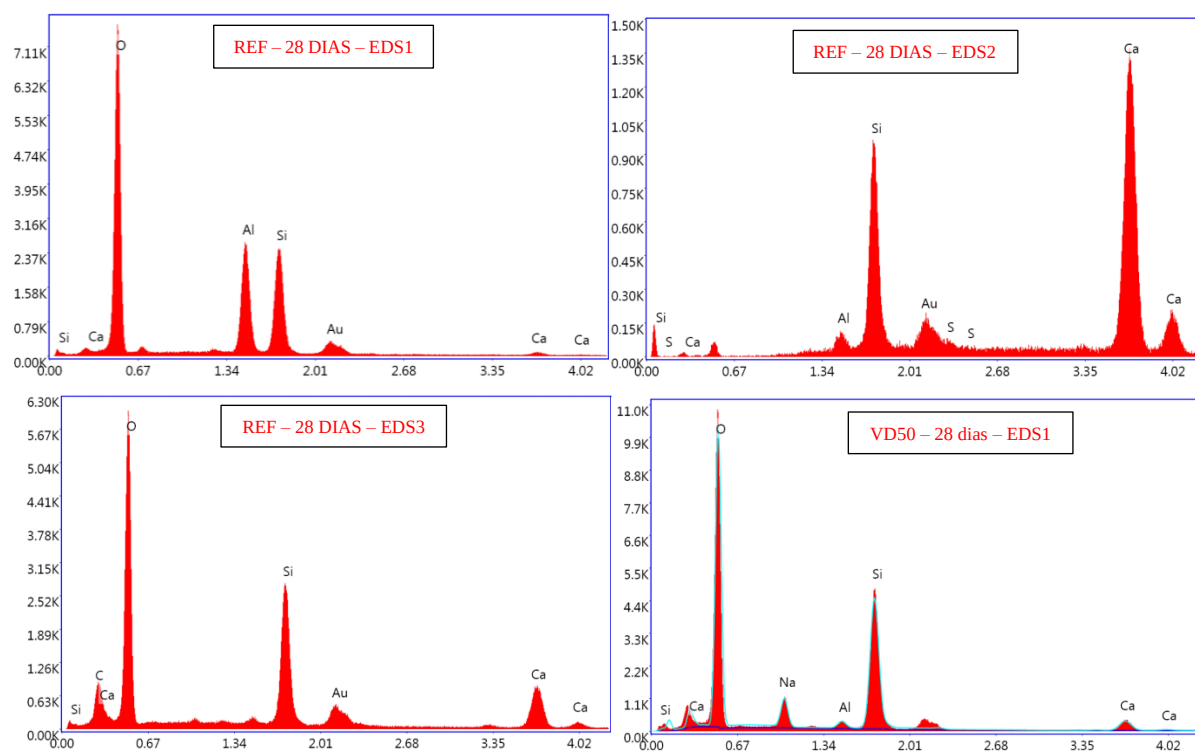
Figura 110 – MEV dos CCUAD REF e VD50 aos 28 dias.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na pasta VD50 observa-se a presença de partículas de pó de vidro na idade de 28 dias.

Figura 111 – Partículas nos traços REF e VD50 determinadas por energia dispersiva de raios X (EDS) aos 28 dias.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

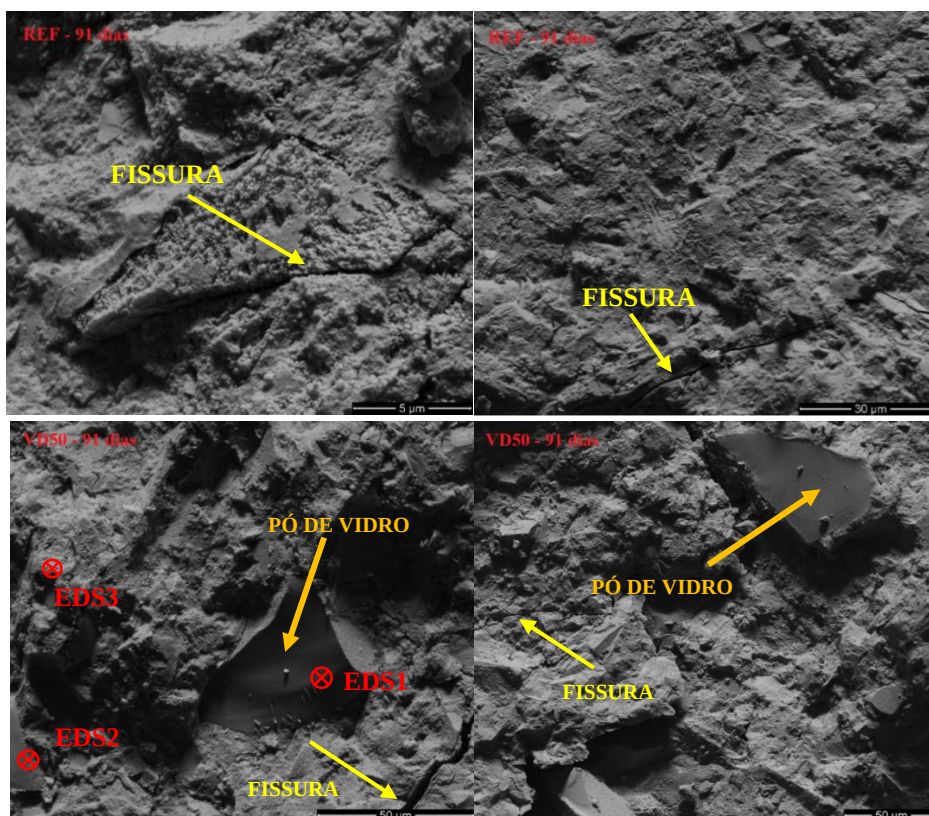
Alguns pesquisadores definem uma relação Ca/Si para cada tipo de $C-S-H$, porém os valores são bastante variados, dependendo do material. As variações nas taxas Ca/Si de um ponto para outro dentro da matriz de $C-S-H$ da pasta cimento Portland reflete a composição variável do $C-S-H$, mas também pode ser consequência da presença de outras fases intimamente misturadas ao $C-S-H$, tendo possivelmente substituições iônicas (SILVA, 2006).

Nas Figuras 111 observa-se que os $C-S-H$ encontrados apresentam diferentes relações Ca/Si . No ponto 2 a relação Ca/Si foi de 1,35.

Em pastas de cimento Portland, comum no estado endurecido, a relação média Ca/Si do $C-S-H$ formado fica em torno de 1,7 podendo apresentar variações (PELISSER; GLEIZÈ; MIKOWSKI, 2009).

Na Figura 112 são apresentadas as análises microestruturais realizadas por MEV nos traços REF e VD50 aos 91 dias e na Figura 113 é mostrada a identificação das partículas nos traços VD50 realizada por energia dispersiva de raios X (EDS) aos 91 dias.

Figura 112 – MEV dos CCUAD REF e VD50 aos 91 dias.



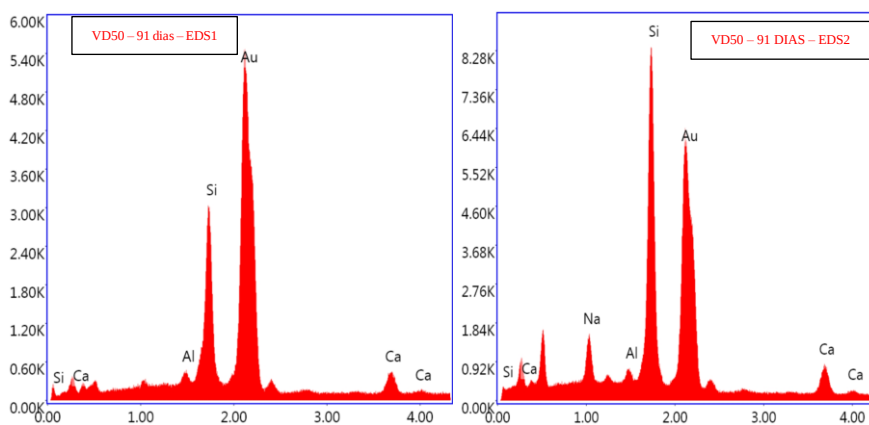
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

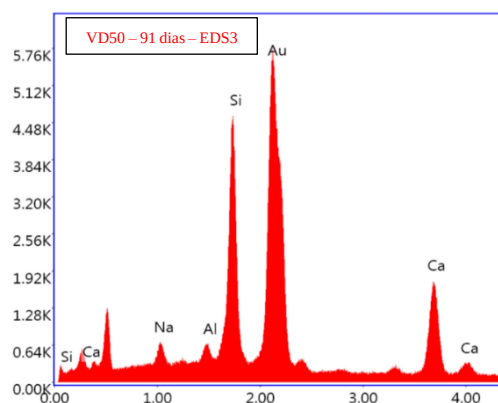
Observam-se pequenas fissuras na matriz cimentícia REF aos 91 dias, devido ao processo de fratura para obtenção das amostras.

Na pasta VD50 observa-se a presença de partículas de pó de vidro na idade de 91 dias, além da presença de pequenas fissuras.

A identificação das partículas nos traços REF e VD50 foi realizada por energia dispersiva de raios X (EDS) e está apresentada na Figura 113.

Figura 113 – Partículas no traço VD50 determinadas por energia dispersiva de raios X (EDS) aos 91 dias.



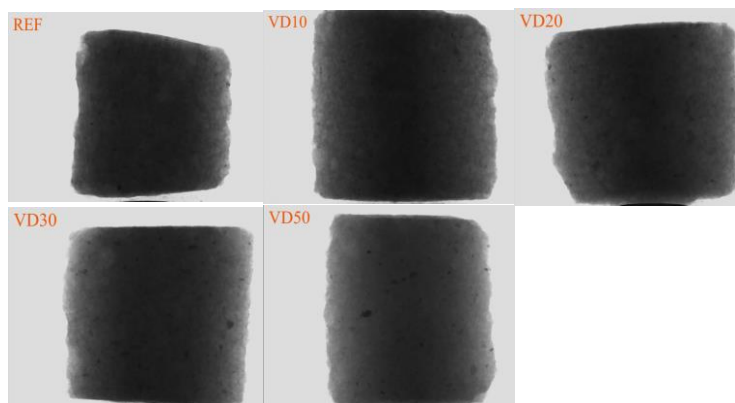


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.5.4 Tomografia computadorizada

O ensaio de tomografia computadorizada foi realizado em corpos de prova de compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro em diferentes teores. As variações da tomografia computadorizada foram mapeadas graficamente por meio de softwares específicos, facilitando a visualização da uniformidade do compósito, sua compactação, integridade e sistema de poros de cada traço avaliado. Na Figura 114 apresentam-se as representações tridimensionais dos corpos de prova de todos os traços analisados.

Figura 114 – Modelagem tridimensional dos corpos de prova dos traços analisados ([clique no hyperlink da figura para ser redirecionado ao vídeo](#)).

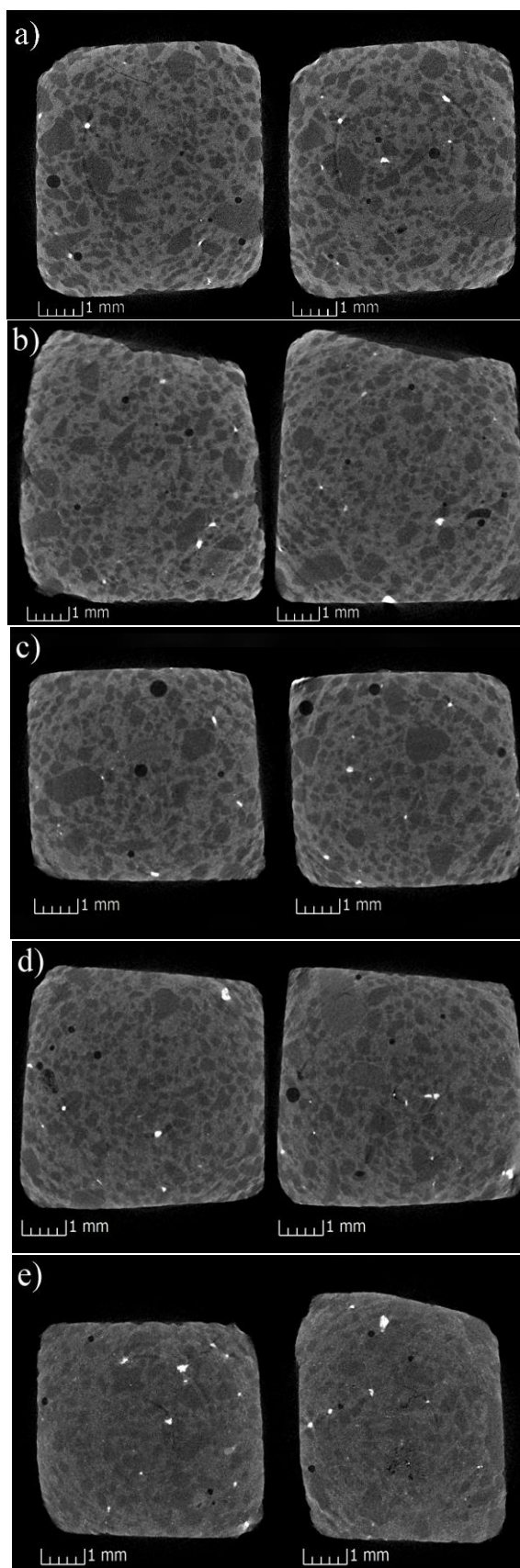


Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Na Figura 115 apresentam-se as distribuições dos poros nos corpos de prova de todos os traços analisados.

As figuras correspondem a cortes transversais dos corpos de prova e as tonalidades representam cada fase do compósito cimentício: a cor cinza mais clara representa a pasta de cimento, sílica e pó de vidro; o cinza escuro representa o agregado miúdo e o preto representa os poros ou vazios.

Figura 115 – Distribuição dos poros nos corpos de prova: a) REF, b) VD10, c) VD20, d) VD30 e e) VD50 ([clique no hyperlink da figura para ser redirecionado ao vídeo](#)).



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Pela análise das figuras e vídeos pode-se observar as diferentes densidades e distribuição de poros de cada compósito cimentício estudado. A porosidade é baixa para todos os traços estudados. Pode-se verificar na Figura 115 que as amostras produzidas com 10% e 20% de pó de vidro (Figuras 115 (b) e (c)) apresentam coloração de cinza muito próxima do compósito referência (Figura 115 (a)). Os compósitos cimentícios com 50% de pó de vidro (Figura 115 (e)) têm uma coloração cinza ligeiramente mais clara que as outras. Na configuração do software adotada para analisar as amostras, a coloração mais clara indica a maior densidade da amostra. Desta forma, é possível afirmar que as amostras produzidas com 50% de pó de vidro são ligeiramente mais densas que as amostras de referência e com menor quantidade de pó de vidro.

Os resultados do ensaio de tomografia computadorizada estão apresentados na Tabela 54.

Os compósitos cimentícios produzidos com pó de vidro apresentaram um volume total de poros inferior à amostra de compósito cimentício de referência. Essa diminuição foi de 7% para a amostra com 10% de pó de vidro, 73% para a amostra com 20% de pó de vidro, 70% para a amostra com 30% de pó de vidro, e 68% para a amostra com 50% de pó de vidro. O diâmetro médio de poros aumenta com a incorporação de pó de vidro em relação ao compósito cimentício de referência, porém para o VD50 esse aumento é menor. A densidade aparente e a porosidade dos compósitos cimentícios com pó de vidro são inferiores ao compósito cimentício sem pó de vidro e diminuem com o aumento do teor de pó de vidro.

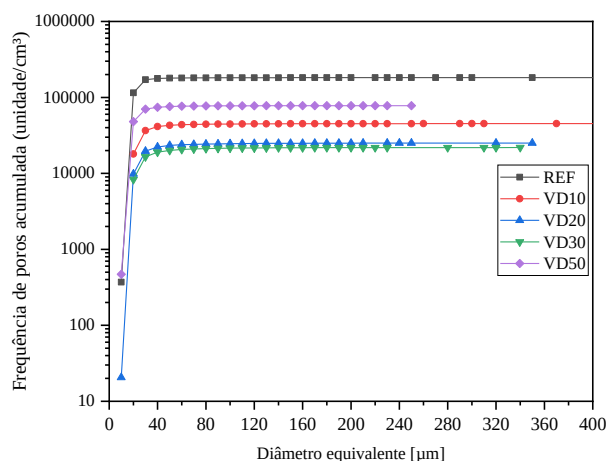
Tabela 54 – Resultados do ensaio de tomografia computadorizada.

Propriedades	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
Volume total de poros/amostra ($\mu\text{m}^3 \times 10^9$)	1,02	0,95	0,27	0,30	0,32
Diâmetro médio de poro (μm)	25,17	31,00	32,51	33,30	26,31
Densidade aparente (g/cm^3)	2,39	2,37	2,35	2,32	2,29
Porosidade (%)	0,66	0,44	0,19	0,17	0,20

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A porosidade dos compósitos cimentícios diminui enquanto o diâmetro médio dos poros aumenta com a incorporação de pó de vidro o que indica a presença de mais bolhas de ar aprisionado nos compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro, com exceção do VD50. Este fenômeno pode ser observado também nos vídeos apresentados nas Figuras 114 e 115. Na Figura 116 pode-se verificar a frequência acumulada de diâmetros de poros obtidos no ensaio de tomografia computadorizada. Foi possível identificar os poros maiores que 10 μm . Os compósitos cimentícios produzidos com 10%, 20%, 30% e 50% de pó de vidro apresentaram uma redução de frequência total de poros de 75%, 86%, 88% e 57%, respectivamente, quando comparados com a amostra de referência (0% de pó de vidro).

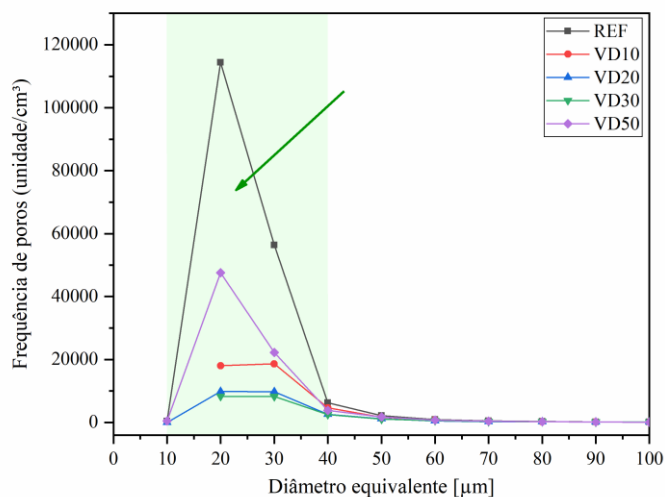
Figura 116 – Frequência acumulada de diâmetros de poros dos compósitos cimentícios.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

O gráfico da Figura 117 foi gerado pela somatória da frequência de poros detectada em cada faixa de porosidade. Foi possível identificar uma redução na frequência de poros para os compósitos cimentícios produzidos com o pó de vidro quando comparadas com o compósito cimentício de referência nas faixas de poros de 10–40 μm (região indicada pela seta na Figura 117). Para a faixa de 20 μm a redução da frequência de poros foi de 84%, 91%, 93% e 58%, para os compósitos cimentícios VD10, VD20, VD30 e VD50, respectivamente.

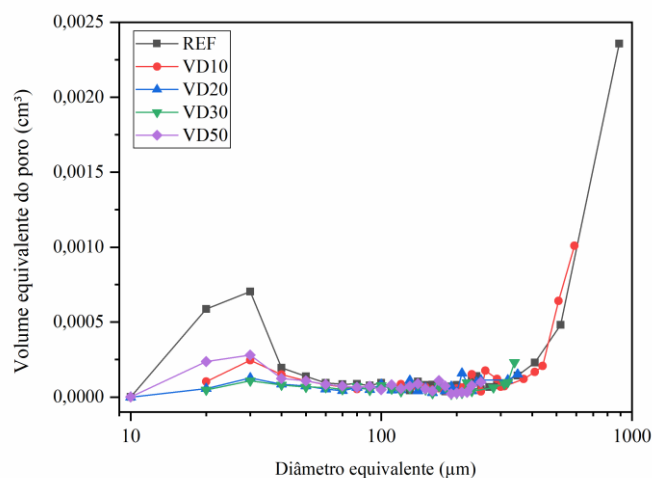
Figura 117 – Distribuição de poros dos compósitos cimentícios.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A distribuição de volumes de poros dos compósitos cimentícios obtidos no ensaio de tomografia computadorizada está apresentada na Figura 118. O pico de maior magnitude para os compósitos cimentícios com 0%, 10%, 20%, 30% e 50% de pó de vidro ocorre para o diâmetro de poro de 30 μm . Para os compósitos cimentícios com 10%, 20%, 30% e 50% de pó de vidro, os volumes de poros relativos aos diâmetros de poro na faixa de 10 μm a 50 μm são menores que o volume de poros para o mesmo diâmetro no compósito cimentício de referência (0% de pó de vidro).

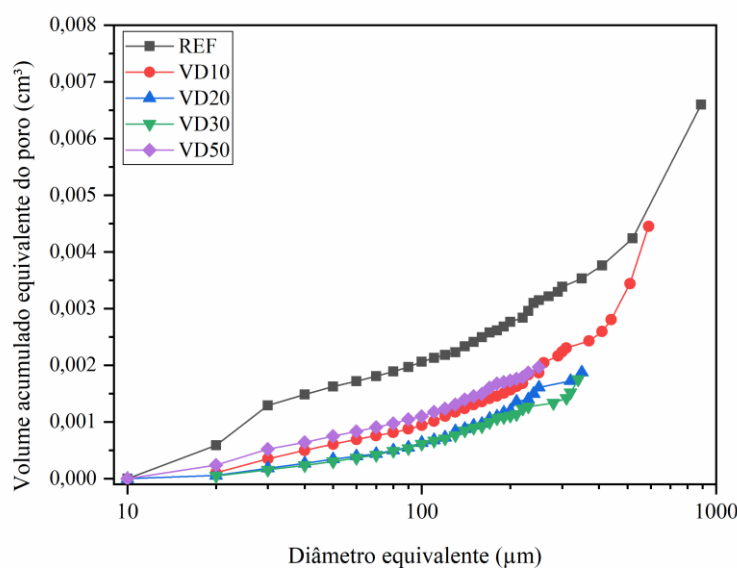
Figura 118 –Distribuição de poros e incremento de volume dos compósitos cimentícios.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Foram plotadas também as curvas acumuladas, as quais podem ser visualizadas na Figura 119. Todas as curvas apresentaram comportamento similar. A partir do diâmetro de 350 μm fica evidente a presença de poros maiores somente nos compósitos REF e VD10.

Figura 119 – Curvas acumuladas da distribuição de poros dos compósitos cimentícios.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A incorporação do pó de vidro contribuiu principalmente com a diminuição dos macroporos (ou capilares longos) de diâmetros superiores a 10 μm . Esses poros influenciam principalmente na permeabilidade e difusividade do material cimentício (MINDESS; YOUNG; DARWIN, 2003). Poros com diâmetro maior que 350 μm aparecem apenas nos compósitos cimentícios REF e VD50. Diante disso, realizou-se o somatório do volume de poros nas amostras considerando os poros menores e maiores que 350 μm (Tabela 55).

Observou-se que o incremento no teor de pó de vidro diminuiu de maneira pouco drástica o

volume de poros menores que 350 µm em comparação com a amostra REF.

Tabela 55 – Somatório do volume de poros correspondente aos poros maiores e menores que 40 µm e 90 µm.

Σ volume de poros (cm ³ /cm ³)	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
Poros > 350 µm	0,0031	0,0021	0,0000	0,0000	0,0000
Poros < 350 µm	0,0035	0,0023	0,0019	0,0018	0,0020
TOTAL	0,0066	0,0044	0,0019	0,0018	0,0020

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Para avaliar a influência da incorporação do pó de vidro nos poros maiores e menores que 350 µm calculou-se o índice de porosidade (Equação 30) de cada composição em relação ao volume de poros do compósito cimentício de referência (0% de pó de vidro).

$$\text{Índice de porosidade} = \frac{\text{Volume de poros}_{VDXX}}{\text{Volume de poros}_{REF}} \times 100 \quad (30)$$

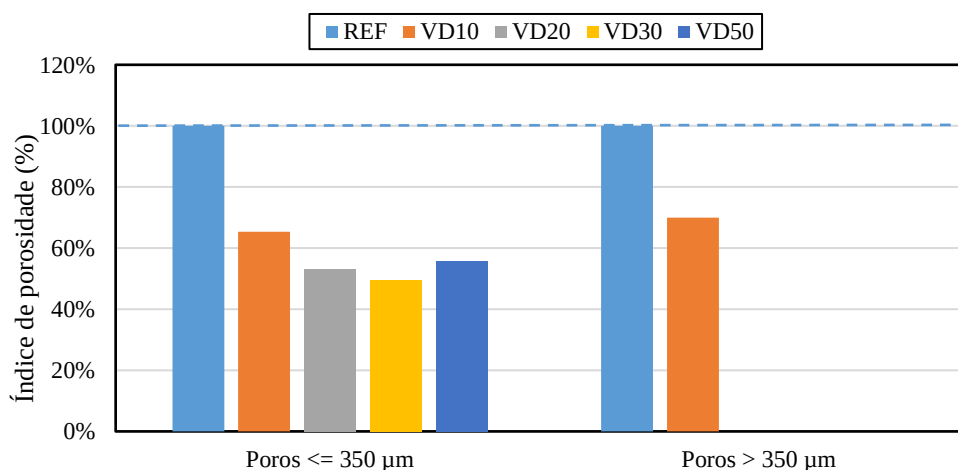
Onde:

$\text{Volume de poros}_{VDXX}$ = volume de poros do compósito cimentício com 10%, 20%, 30% ou 50% de pó de vidro;

$\text{Volume de poros}_{REF}$ = volume de poros do compósito cimentício de referência.

Os resultados dos índices de porosidade estão apresentados na Figura 120. Considerando os diâmetros menores que 350 µm, a incorporação do pó de vidro provocou uma redução média de 44% no índice de porosidade de VD10, VD20, VD30 e VD50. Para diâmetros maiores que 350 µm o índice de porosidade de VD10 é 30% inferior em comparação com o compósito cimentício de referência (0% de pó de vidro).

Figura 120 – Índice de porosidade dos compósitos cimentícios.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Era de se esperar que compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro, que apresentaram uma porosidade inferior ao compósito cimentício referência, apresentassem valores de resistência à compressão maiores quando comparado com a referência. Mesma consideração pode ser feita com relação à resistência ao ataque de cloretos.

Vale ressaltar, no entanto, que os valores de porosidade apresentados pelos compósitos cimentícios estudados, com e sem incorporação de pó de vidro, são bem menores que os valores encontrados em outros estudos. Silva (2006) utilizou o método de porosimetria por intrusão de mercúrio em concretos com resistência à compressão em torno de 100 MPa aos 28 dias e encontrou porosidade média de 5,12%. Moretti (2018) utilizou o método de porosimetria por intrusão de mercúrio em concretos com resistência à compressão em torno de 50 MPa aos 91 dias e encontrou porosidade média de 15,32%.

Vale ressaltar também que tanto os valores de resistência à compressão quanto os coeficientes de difusão de cloretos para os compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro não apresentam diferença estatística significativa com relação à referência, com exceção do compósito com incorporação de 50% de pó de vidro.

4.6 Resumo das principais análises

Na Tabela 56 são apresentados os resultados das principais análises, a maioria na idade de 28 dias.

Tabela 56 – Resumo dos principais resultados para as propriedades estudadas.

PROPRIEDADES	CCUAD				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
Densidade de massa (kg/m³)	2307	2338	2326	2322	2273
Teor de ar incorporado (%)	4	2	2	1	1
Absorção de água por capilaridade - 72 h (g/cm³)	0,079	0,077	0,092	0,091	0,088
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Resistência à compressão axial - 28 dias (MPa)	115,58	119,40	113,57	110,66	88,37
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
Resistência à compressão axial - 1 ano (MPa)	167,93	154,33	160,09	155,60	138,40
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
Σ volume de poros < 350 µm - 1 ano (cm³/cm³)	0,0035	0,0023	0,0019	0,0018	0,0020
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	11,08	10,94	11,03	10,07	9,82
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Resistência à tração por flexão (MPa)	23,12	21,92	21,08	19,79	18,72
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	53,31	52,15	52,1	52,37	49,75
Estatisticamente diferente de REF?	-	SIM	SIM	NÃO	SIM
Módulo de elasticidade estático (GPa)	43,09	45,51	41,67	42,94	41,51
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Porosidade aparente (%)	2,30	2,44	2,64	3,27	3,51
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	SIM	SIM
Densidade aparente (g/cm³)	2,39	2,37	2,35	2,32	2,29
Estatisticamente diferente de REF?	-	SIM	SIM	SIM	SIM
RAS - Variação dimensional - 30 dias (%)	0,32	0,49	0,35	0,16	0,10
Frente de penetração de cloretos - 720 dias (mm)	2,91	2,64	3,48	3,72	4,12

Tabela 56 – Resumo dos principais resultados para as propriedades estudadas (continuação).

PROPRIEDADES	CCUAD				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
Teor total de cloretos - 5 mm/311 dias (%)	0,74	0,71	1,15	1,38	1,50
Migração - Coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário ($10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$)	0,61				1,19
Estatisticamente diferente de REF?					SIM
Migração - Coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário ($10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$)	10,89				30,65
Estatisticamente diferente de REF?					SIM
Migração - Fluxo de íons cloreto ($10^{-9} \text{ mol/s.cm}^2$)	0,097				0,187
Estatisticamente diferente de REF?	-				SIM
Previsão de vida útil anos	275				142
Difusão - Coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	0,20	0,19	0,14	0,26	0,34
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
Efeito combinado difusão/carbonatação	não				sim
Resistividade elétrica ($\text{k}\Omega.\text{cm}$)	164	166	174	124	113
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	SIM	SIM	SIM
Condutividade elétrica dos compósitos cimentícios (mS/cm)	5,2	8,02	4,13	5,69	3,31
Estatisticamente diferente de REF?	-	SIM	SIM	NÃO	SIM
pH dos compósitos cimentícios	12,4	12,58	12,32	12,45	12,19
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Condutividade elétrica das soluções de água dos poros (mS/cm)	8,14	7,57	6,85	6,51	5,76
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	SIM	SIM	SIM
pH das soluções de água dos poros	12,4	12,39	12,37	12,33	12,3
Estatisticamente diferente de REF?	-	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Eficiência energética cimento ($\text{kg/m}^3.\text{MPa}$)	8,7	7,5	7	6,3	5,7
Eficiência energética aglomerantes ($\text{kg/m}^3.\text{MPa}$)	9,3	8,9	9,2	9,2	11,1

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A hipótese considerada nesta pesquisa foi confirmada, pois a utilização do pó de vidro em altos teores em substituição ao cimento Portland não afetou as características mecânicas e de durabilidade frente à ação de cloretos dos compósitos cimentícios, uma vez que os mesmos podem ser classificados como de ultra alto desempenho.

Os resultados obtidos para os compósitos cimentícios com 50% de substituição de cimento Portland por pó de vidro são inferiores aos resultados obtidos para o compósito cimentício referência, porém mantendo-se nos níveis de resultados referentes aos compósitos de ultra alto desempenho. Além da alta resistência mecânica e durabilidade ainda proporciona uma diminuição do consumo de cimento Portland.

Por meio dos resultados obtidos e análises realizadas durante o desenvolvimento desse estudo, destaca-se que:

1) todas as pastas estudadas apresentaram compatibilidade entre os aglomerantes e o aditivo superplastificante além de trabalhabilidades semelhantes;

2) considerando que todos os traços estudados alcançaram alta resistência à compressão com aumento da resistência à tração e módulo de elasticidade com elevada resistência à penetração e difusão de cloretos, todos são considerados compósitos cimentícios de ultra alto desempenho, desde o traço com menor consumo de cimento (500 kg/m^3) até o traço referência com maior consumo de cimento (1000 kg/m^3). Todos os traços tiveram a adição de sílica ativa correspondente a 8% em relação à massa de cimento do traço referência e tiveram a relação água-aglomerantes mantida constante;

3) com relação à capacidade de absorção de água, todos os compósitos cimentícios estudados apresentaram resultados da mesma ordem de grandeza de outros compósitos de ultra alto desempenho estudados por outros autores; os traços com incorporação de pó de vidro não apresentaram diferença significativa em relação ao traço referência aos 28 dias. Porém, ficou evidenciado um comportamento que sinaliza para a necessidade de avaliação do ensaio de absorção de água por capilaridade, utilizado nessa pesquisa;

4) os traços com e sem incorporação de pó de vidro atingiram resistência à compressão acima de 150 MPa depois de um ano de cura. A exceção foi o compósito cimentício com 50% de incorporação que também atingiu alta resistência à compressão na mesma idade. Mesmo comportamento foi observado com relação à resistência à tração por compressão diametral, apresentando valores maiores que os encontrados para compósitos cimentícios convencionais e que é uma característica dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho. O comportamento dos traços em relação à resistência à tração na flexão também apresentou resultados maiores que os obtidos para concretos convencionais não tendo sido encontrada diferença estatística entre os resultados. Outra característica dos compósitos cimentícios é o

aumento do módulo de elasticidade que foi observado em todos os traços, em relação ao concreto convencional;

5) os compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro apresentaram menor densidade aparente e maior porosidade aparente em relação ao compósito cimentício sem incorporação de vidro, sendo que os traços com 30% e 50% apresentaram diferença estatística em relação ao traço referência; os valores da resistência à compressão dos traços com incorporação de pó de vidro também foram menores em relação aos valores do traço referência com diferença significativa somente entre VD50 e REF;

6) com relação aos ensaios de durabilidade frente à penetração de cloretos o teor de pó de vidro influencia a frente de penetração de cloretos após ciclos de secagem e molhagem, sendo maior a penetração conforme aumenta-se o teor de pó de vidro incorporado. Porém, todas as profundidades obtidas foram baixas, o que indica que os íons cloreto não teriam atingido a armadura, se considerada a espessura do concreto de cobertura especificada pela NBR 6118 (ABNT, 2014), em nenhum dos compósitos cimentícios estudados, não apresentando qualquer risco para o início da corrosão;

7) quanto à determinação do teor de cloretos pelo método de Volhard, nota-se que os teores são altos nas proximidades da superfície dos compósitos cimentícios em contato com a solução e há uma redução com o aumento da profundidade, porém os teores encontrados ainda são altos quando comparados com o teor limite para considerar a despassivação da armadura. Os compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro apresentaram maiores teores que os compósitos referência, com o teor aumentando com o aumento do teor incorporado. A determinação desses teores precisa ser comparada e comprovada com outro método quantitativo pois na posição em que o ensaio colorimétrico não indicou a presença de cloretos, a concentração do íon deveria ter sido bem menor, fato que não foi verificado;

8) dos ensaios de migração de cloretos observam-se diminuição do “time lag”, aumento do fluxo de íons e, conseqüentemente, dos coeficientes de difusão nos estados estacionário e não estacionário para os compósitos cimentícios com incorporação de 50% de pó de vidro em relação aos compósitos cimentícios de referência. A redução do coeficiente de difusão no estado estacionário tem como consequência direta o aumento da vida útil da estrutura. Amostras de compósito cimentício contendo 50% de pó de vidro apresentaram, segundo resultados do ensaio de migração de cloretos, uma menor vida útil, atingindo metade do valor obtido para as amostras de referência (142 contra 275 anos); porém vale ressaltar que esses resultados são muito melhores que os apresentados por outros concretos;

9) em relação ao compósito cimentício de referência os traços com substituição de 10% e 20% apresentaram uma diminuição enquanto os traços com substituição de 30% e 50% apresentaram aumento no coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias. Vale ressaltar que somente a incorporação de 50% de pó de vidro apresentou diferença significativa em relação à referência. Todos os compósitos cimentícios com substituição de cimento por pó de vidro

apresentaram profundidade de penetração de cloretos e teor total de cloretos maior que o traço referência, sem incorporação de pó de vidro;

10) nos ensaios de carbonatação natural e acelerado não houve a ocorrência de carbonatação, porém avaliando o efeito combinado da carbonatação acelerada com a penetração de cloretos, nota-se que marcas de carbonatação aparecem nos compósitos cimentícios com incorporação de 50% de pó de vidro, nas duas faces de maneira bastante irregular, em idades avançadas. Tal fato está relacionado com o teor do $Ca(OH)_2$ existente na matriz de cimento que é consumido pelas reações pozolânicas proporcionadas pelas incorporações, o que facilita o avanço da frente de carbonatação;

11) a resistividade diminui com o aumento do teor de pó de vidro, podendo-se inferir que a porosidade e a permeabilidade aumentam e a densidade dos compósitos cimentícios diminuem com o aumento do teor de pó de vidro. Em todas as idades avaliadas verificou-se um aumento da resistividade com o aumento da resistência à compressão, sendo que a resistência à compressão é maior quanto menor é a quantidade de pó de vidro incorporada aos compósitos. A resistividade elétrica é um bom indicativo da possibilidade de penetração de íons cloreto. Quanto maior a resistividade do compósito cimentício, menor a penetração de íons cloreto e, conseqüentemente, menor a probabilidade de ocorrer corrosão. O aumento da incorporação de pó de vidro proporciona, também, o aumento da profundidade de penetração de íons cloreto. Como a resistividade elétrica controla o fluxo de íons que pode difundir no compósito cimentício através da solução presente nos poros, é altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio. Vale ressaltar que os ensaios foram realizados na condição de corpos de prova saturados com superfície seca. Quanto maior o teor de umidade, menor é a resistividade do material. Nas piores condições, de menor resistividade, os compósitos cimentícios apresentaram, aos 28 dias, risco insignificante de corrosão de acordo com a COST – 509. Aos 63 dias, com exceção do compósito cimentício com 50% de incorporação de pó de vidro, todos apresentaram baixo risco de corrosão de acordo com a AASHTO – 119. O VD50 atingiu a faixa de baixo risco de corrosão por volta dos 130 dias;

12) Ao comparar os resultados das soluções obtidas a partir da mistura dos materiais e das soluções obtidas com o material extraído dos compósitos cimentícios na idade de 365 dias verifica-se que o pH não sofreu alterações, ou seja, a solução continuou saturada pelo hidróxido de cálcio. Por outro lado, observa-se uma diminuição da condutividade elétrica para a solução referência e para a solução com 50% de incorporação de pó de vidro. Provavelmente essa diminuição ocorreu devido às reações de hidratação dos compostos do cimento e da reação pozolânica do pó de vidro e da sílica que ocorrem com o passar do tempo;

13) por causa da alta resistividade do meio, as medidas eletroquímicas no monitoramento do processo de corrosão das armaduras são mais difíceis de serem realizadas. Não é possível avaliar a evolução do processo corrosivo por meio da técnica do potencial de corrosão, que nos indica apenas quais as possibilidades de ocorrência da corrosão e, por isso, deve ser utilizada como uma técnica complementar. Os ensaios de potencial de corrosão foram interrompidos sem

resultados satisfatórios, porém, com a ruptura dos corpos de prova, observa-se que não houve corrosão das barras de aço;

14) com relação às análises microscópicas, verificou-se que os ensaios específicos aplicados ao estudo da microestrutura (DRX, TG e MEV) mostraram-se bastante eficazes para a caracterização das fases presentes e acompanhamento de eventos distintos. Através dos ensaios, evidenciou-se a reação pozolânica, a partir dos quais observou-se que o teor de CH é reduzido com o progresso da hidratação, transformando-se em $C - S - H$; e

15) o ensaio de tomografia computadorizada permitiu comprovar que a quantidade de poros nos compósitos cimentícios diminuiu com a incorporação de pó de vidro. Considerando somente os poros menores que 350 μm a diferença entre as porosidades dos compósitos avaliados não é considerável levando-se em conta a ordem de grandeza da porosidade. Poros maiores que 350 μm só aparecem nos compósitos cimentícios de referência e com 10% de incorporação de pó de vidro. Ainda assim a porosidade é muito menor, em ordem de grandeza, que a encontrada em outros tipos de concreto.

Com base nas considerações acima conclui-se que o CCUAD com diferentes teores de incorporação de pó de vidro apresentou excelente desempenho mecânico e quanto à proteção do aço contra corrosão: altas resistências mecânicas (compressão axial e tração por compressão diametral e tração na flexão), alto módulo de elasticidade, baixos coeficientes de absorção de água, alta resistividade elétrica, alta resistência à penetração de íons cloreto, frente de penetração de cloretos muito baixa, baixos coeficientes de migração de cloretos, previsão de vida útil muito alta e baixo risco de corrosão.

Quanto ao teor de pó de vidro recomenda-se o uso do compósito cimentício de ultra alto desempenho com incorporação de 50% de pó de vidro em substituição ao cimento Portland, pois mantém alta resistência mecânica e alta resistência ao ataque de cloretos, com consumo de cimento de 500 kg/m^3 contra 1000 kg/m^3 do compósito cimentício de referência. É importante destacar que o pó de vidro é um resíduo e que, incorporado ao compósito cimentício, reduz a quantidade de clínquer, reduzindo o grande consumo de energia necessário para produzi-lo. Além do aproveitamento de um resíduo ainda há a redução da emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente e preserva as reservas de matérias primas.

Todo produto deve proporcionar bom desempenho do ponto de vista mecânico e de durabilidade, ser ecologicamente correto frente ao desenvolvimento sustentável e à disponibilidade de recursos naturais e ser economicamente viável para ser inserido em um mercado altamente competitivo. O compósito cimentício de ultra alto desempenho com e sem incorporação de pó de vidro atingiu uma vida útil estimada muito maior que os concretos convencionais. Nesse contexto a utilização do pó de vidro é promissora nos aspectos de resistência mecânica e durabilidade proporcionados aos compósitos cimentícios e no aspecto ecológico, ainda que os custos não tenham sido quantificados.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem abaixo algumas sugestões para dar continuidade ao estudo desenvolvido:

- o perfil de cloretos deve ser cuidadosamente avaliado, comparando-se diferentes metodologias e concluindo-se qual delas melhor se adapta em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho, cuja frente de penetração é pequena;
- a determinação da permeabilidade ao oxigênio e à água sob pressão de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho, bem como o coeficiente de absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios também devem ser explorados. Deve-se analisar compósitos cimentícios com diferentes porosidades e distribuição de poros, comparando-os com os respectivos coeficientes de absorção de água por capilaridade e com a altura capilar;
- a influência da incorporação de microfibras metálicas na resistência à tração e na ductilidade dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho deve ser explorada para viabilizar a utilização dos compósitos como reforço estrutural;
- análise da penetração dos íons cloreto em peças moldadas com compósitos cimentícios armados submetidas a algum tipo de carregamento, verificando-se a qualidade do material conjuntamente com as microfissuras obtidas;
- realização de estudos de avaliação de custo e ciclo de vida como ferramenta de tomada de decisão para reinserção de resíduos como estratégia circular, tendo como estudo de caso o pó de vidro aplicado aos compósitos cimentícios; e
- Verificar a pozolanicidade do pó de vidro para diferentes granulometrias utilizando, por exemplo, a micronização de partículas, e também, relacionar com os processos de cura térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELGADER, H. S.; BEN-ZEITUN, A. E. Tensile strength of two-stage concrete measured by double-punch tests. *In: Role of Concrete in Nuclear Facilities*, p. 43-50, Thomas Telford Publishing, 2005.

ABDULKAREEM, O. M. *et al.* Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 235-246, 2018.

ABELLÁN-GARCÍA, J. Four-layer perceptron approach for strength prediction of UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 256, n. 119465, 2020.

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.

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.

AİTCIN, P.-C. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1349-1359, 2000.

AKHNOUKH, A. K.; XIE, H. Welded wire reinforcement versus random steel fibers in precast/prestressed ultra-high performance concrete I-girders. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2200-2207, 2010.

ALI, M. H.; DINKHA, Y. Z.; HAIDO, J. H. Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 20, n. 2, p. 536-541, 2017.

ALNAHHAL, M. F. *et al.* Assessment on engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 822-835, 2018.

ALONSO, C. *et al.* Ground water leaching resistance of high and ultra high performance concretes in relation to the testing convection regime. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p. 1583-1594, 2006.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. Standard method of test for electrical resistivity of a concrete cylinder tested in a uniaxial resistance test. **TP 119**. Washington, D.C., USA, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water. **ASTM C20**. West Conshohocken, PA, USA, 2000.

_____. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. **ASTM C618**. West Conshohocken, PA, USA, 2019.

_____. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. **ASTM C1202**. West Conshohocken, PA, USA, 2019.

_____. Standard test method for melting and crystallization temperatures by thermal analysis. **ASTM E794**. West Conshohocken, PA, USA, 2018.

_____. Preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. **ASTM G1**. West Conshohocken, PA, USA, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018

_____. **NBR 5751**: materiais pozolânicos – determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5752**: materiais pozolânicos – determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7222**: concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7681**: calda de cimento para injeção. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 8522**: concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11172**: aglomerantes de origem mineral – terminologia. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 11579**: cimento Portland – determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11768-3**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 3: ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 12653**: materiais pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 13276:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13278:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13956-1:** sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15577-5:** agregados – reatividade álcali-agregado. Parte 5: determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15577-4:** agregados – reatividade álcali-agregado. Parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15575-1:** edificações habitacionais – desempenho. Parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15577-1:** agregados – reatividade álcali-agregado. Parte 1: guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15630:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15894-1:** metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15895:** materiais pozolânicos – determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 16372:** cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 16605:** cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16606:** cimento Portland – determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16607:** cimento Portland – determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16697:** cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 30:** agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45:** agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46:** agregados – determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 49:** agregado miúdo – determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52:** agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

BARROS, L. M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado.** Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BREAKILO, F. *et al.* Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. **Cerâmica**, v. 65, n. 375, p. 351-358, 2019.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION – BSI. Testing concrete. Methods for analysis of hardened concrete. **BS 1881-124**, 1988.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2116-2136, 2005.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 7ª ed., 2008.

_____. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma abordagem integrada.** Rio de Janeiro: LTC, 2ª ed., 2010.

CASCUDO, O. Estrutura atômica e molecular dos materiais. *In:* ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: Ibracon, v. 1, cap. 6, p. 143-182, 2ª ed., 2010.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo: Pini, 1ª ed., 1997.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 10, p. 1411-1420, 2001.

CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete). **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1491-1500, 1995.

CINCOTTO. Reações de hidratação e pozolânicas. *In*: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1ª ed. São Paulo: Ibracon, v. 1, cap. 11, p. 381-413, 2011.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON – CEB. Diagnosis and assessment of concrete structures. **CEB – 192**. Lausanne, Switzerland, 1988.

Confederação Nacional do Ramo Químico (CNQ). **Panorama Setor de Vidro**, 2015. Disponível em: <http://cnq.org.br/system/uploads/publication/2ff996c7069c650d075bb5c87b75bc0a/file/panorama-vidros-b.pdf>. Acesso em: 3 de out. de 2020.

CORDEIRO, G. C. *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 5, p. 410-418, 2008.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. The role of industrial by-products in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3181-3186, 2011.

COURARD, L. *et al.* Durability of mortars modified with metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 9, p. 1473-1479, 2003.

CWIRZEN, A. The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete. **Advances in Cement Research**, v. 19, n. 1, p. 25-33, 2007.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. *In*: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon, v. 1, cap. 8, p. 261-309, 1ª ed., 2011.

DE LARRARD, F. *et al.* A new rheometer for soft-to-fluid fresh concrete. **Materials Journal**, v. 94, n. 3, p. 234-243, 1997.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997-1009, 1994.

DOBIAS, D.; PERNICOVA, R.; MANDLIK, T. Water transport properties and depth of chloride penetration in ultra high performance concrete. *In*: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, p. 137-142, 2016.

DU, H.; TAN, K. H. Properties of high volume glass powder concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 75, p. 22-29, 2017.

_____. Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali- silica reaction and mitigation methods. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 118-126, 2013.

DU, Y. *et al.* Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder, metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material. **Journal of Cleaner Production**, p. 125018, 2020.

ELAQRA, H.; RUSTOM, R. Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 326-335, 2018.

EUROPEAN COOPERATION IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH – COST. Corrosion and protection of metals in contact with concrete: final report. **COST 509**. European Commission, Directorate General Science. Research and Development, Brussels, 1997.

FAN, L. *et al.* Effect of steel fibers with galvanized coatings on corrosion of steel bars embedded in UHPC. **Composites Part B: Engineering**, v. 177, p. 107445, 2019.

FELDMAN, R. F.; CHENG-YI, Y. Properties of Portland cement-silica fume pastes II. Mechanical properties. **Cement and Concrete Research**, v. 15, n. 6, p. 943- 952, 1985.

FERDOSIAN, Iman; CAMÕES, Aires. Effective low-energy mixing procedure to develop high-fluidity cementitious pastes. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 1, p. 11-17, 2016.

FERNANDES, L. F. R. *et al.* Avaliação da atividade pozolânica do resíduo de porcelana por meio da condutividade elétrica. In: **Proc. 1º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos – TECSIC**, Campinas, 2017.

FICHA TÉCNICA – VIDRO. **Compromisso empresarial para reciclagem (CEMPRE)** [2020]. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>. Acesso em: 2 de out. de 2018.

FIDJESTØL, P.; LEWIS, R. Microsilica as an addition. In: **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, p. 679-712. Butterworth-Heinemann, 1998.

FREITAS, T. G. O. **Efeito do pó de vidro na mitigação da reação álcali-sílica de compósitos cimentícios de alto desempenho**. Tese (Mestrado em Construção Civil) –Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

GAO, X. *et al.* Assessing the modification efficiency of waste glass powder in hydraulic construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120111, 2020.

GARAS, V. Y.; KURTIS, K. E.; KAHN, L. F. Creep of UHPC in tension and compression: effect of thermal treatment. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 493-502, 2012.

GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali – Aggregate reaction in activated fly ash systems. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 2, p. 175-183, 2007.

GHAFAARI, E. *et al.* Influence of nano-silica addition on durability of UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 181-188, 2015.

GONEN, T.; YAZICIOGLU, S. The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 5, p. 1040-1045, 2007.

GRILO, J. *et al.* Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 287-294, 2014.

GUO, S. *et al.* Reduced alkali-silica reaction damage in recycled glass mortar samples with supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 3621-3633, 2018.

HARBEC, D. *et al.* Mechanical and durability properties of high performance glass fume concrete and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 142-156, 2017.

HE, Z.-H. *et al.* Creep behavior of concrete containing glass powder. **Composites Part B: Engineering**, v. 166, p. 13-20, 2019.

HEINZ, D.; LUDWIG, H.-M. Heat treatment and the risk of DEF delayed ettringite formation in UHPC. *In: Proceedings of the International Symposium on UHPC*, p. 717-730. Kassel, Germany, 2004.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livres-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 271-288, 2017.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

HOPPE FILHO, J. *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 22, n. 3, 2017.

IBRAHIM, S.; MEAWAD, A. Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 451-458, 2018.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 1, p. 19-29, 2011.

_____. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1309-1312, 2010.

_____. Use of waste glass as powder and aggregate in cement-based materials. *In: SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria)*, 2009.

JAIN, J. A.; NEITHALATH, N. Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes- influence of test methods on microstructure. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 2, p. 148-156, 2010.

JIANG, Y. *et al.* A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. **Journal of Environmental Management**, v. 242, p. 440-449, 2019.

JOHN, V. M. *et al.* Fillers in cementitious materials – Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65-78, 2018.

JUHART, J. *et al.* Functional and environmental performance optimization of Portland cement-based materials by combined mineral fillers. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 157-178, 2019.

KHAN, M. I.; ABBAS, Y. M.; FARES, G. Review of high and ultrahigh performance cementitious composites incorporating various combinations of fibers and ultrafines. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v. 29, n. 4, p. 339-347, 2017.

KHAYAT, K. H. *et al.* Rheological properties of ultra-high-performance concrete – An overview. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105828, 2019.

KOU, S. C.; XING, F. The effect of recycled glass powder and reject fly ash on the mechanical properties of fibre-reinforced ultrahigh performance concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2012, 2012.

KOUTNY, O. *et al.* Rheological behaviour of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume. **Cement and Concrete Composites**, v. 88, p. 29-40, 2018.

KRAUSS, H. W.; BUDELMANN, H. Hydration kinetics of cement paste with very fine inert mineral additives. *In: International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering*, p. 93-99. RILEM Publications SARL, 2011.

KRSTIC, M.; DAVALOS, J. F. Field application of recycled glass pozzolan for concrete. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 4, p. 123-131, 2019.

LEE, H. *et al.* Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 683-693, 2018b.

LEE, N. K. *et al.* Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, v. 104, p. 68-79, 2018a.

LI, J. *et al.* Durability of ultra-high performance concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 255, p. 119296, 2020.

LI, P. P. *et al.* Conceptual design and performance evaluation of two-stage ultra-low binder ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 125, p. 105858, 2019.

LI, Z.; AFSHINNIA, K.; RANGARAJU, P. R. Effect of alkali content of cement on properties of high performance cementitious mortar. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 631-639, 2016.

LIU, B.; XIE, Y.; LI, J. Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 994-998, 2005.

LONG, G.; WANG, X.; XIE, Y. Very-high-performance concrete with ultrafine powders. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 4, p. 601-605, 2002.

LORENZI, Alexandre *et al.* Concrete structures monitoring using ultrasonic tests. **Revista de la Construcción. Journal of Construction**, v. 19, n. 3, p. 246-257, 2020.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.

LU, J.-X. *et al.* Synergetic recycling of waste glass and recycled aggregates in cement mortars: physical, durability and microstructure performance. **Cement and Concrete Composites**, p. 103632, 2020.

LU, J.-X.; POON, C. S. Recycling of waste glass in construction materials. *In: New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*, p. 153-167, Woodhead Publishing, 2019.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. 1, p. 63-68, 1989.

MALHEIRO, R. L. M. C. *et al.* Evolução da frente de carbonatação em argamassas contendo cinzas volantes tendo em conta a presença de íões cloreto. *In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*, 2014.

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

MAYHOUB, O. A. *et al.* The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: a review. **Ain Shams Engineering Journal**, 2020.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1476-1484, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**, 3ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MO, Z.; GAO, X.; SU, A. Mechanical performances and microstructures of metakaolin contained UHPC matrix under steam curing conditions. **Construction and Building Materials**, 2020.

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.

MONTEAGUDO, S. M. *et al.* The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases. **Thermochimica Acta**, v. 592, p. 37-51, 2014.

MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FORSSBERG, E. The function of fillers in concrete. **Materials and Structures**, v. 37, n. 2, p. 74, 2004.

MORETTI, J. P. **Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

MOSABERPANAH, M. A.; EREN, O.; TARASSOLY, A. R. The effect of nano-silica and waste glass powder on mechanical, rheological, and shrinkage properties of UHPC using response surface methodology. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 804-811, 2019.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NARMLUK, M.; NAWA, T. Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 6, p. 579-589, 2011.

NASSAR, R.-U.-D.; SOROUSHIAN, P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 368-377, 2012.

National Overview: Facts and Figures on Materials, Wastes and Recycling. **US Environmental Protection Agency (EPA)**, 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials/>. Acesso em: 20 de jun. de 2018.

NEPOMUCENO, M. C. S.; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; LOPES, S. M. R. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 82-94, 2014.

NILSSON, L. *et al.* Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment. *In: Second International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*, 2000.

NORDTEST METHOD – NT. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. **NT BUILD 492**. Taastrup, Denmark, 2011.

OERTEL, T. *et al.* Amorphous silica in ultra-high performance concrete: first hour of hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 58, p. 131-142, 2014.

OLIVEIRA JUNIOR, A. *et al.* **Propriedades residuais de compósitos cimentícios de alto desempenho com pó de vidro submetidos à altas temperaturas**. Tese (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

OLIVEIRA, C. T. A.; AGOPYAN, V. Estudo da água do poro de pastas de cimento de escória pelo método da água de equilíbrio. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/259, EPUSP, 2000.

OMRAN, A. *et al.* Performance of ground-glass pozzolan as a cementitious material: a review. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 7, n. 1, p. 237-270, 2018.

OMRAN, A. F. *et al.* Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 43-58, 2017.

OMRAN, A.; TAGNIT-HAMOU, A. Performance of glass-powder concrete in field applications. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 84-95, 2016.

PAN, Z. *et al.* High temperature performance of mortars containing fine glass powders. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 16-26, 2017.

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

PAUL, S. C.; ŠAVIJA, B.; BABAFEMI, A. J. A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass. **Journal of Cleaner Production**, v. 198, p. 891-906, 2018.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. M. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 324-332, 2018.

RAJABI, A. M.; MOAF, F. O. Simple empirical formula to estimate the main geomechanical parameters of preplaced aggregate concrete and conventional concrete. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 485-492, 2017.

RASHIDIAN-DEZFOULI, H.; AFSHINNIA, K.; RANGARAJU, P. R. Efficiency of ground glass fiber as a cementitious material, in mitigation of alkali-silica reaction of glass aggregates in mortars and concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 15, p. 171-180, 2018.

RAVERDY, M. *et al.* Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components. *In: 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, 1980.

RIBEIRO, D. V. *et al.* **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: teoria, controle e métodos de análises**, 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RIBEIRO, D. V. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

RIBEIRO. Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos. *In: RIBEIRO (Ed.). Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção*, 2ª ed. São Paulo: Elsevier, cap. 6, p. 125-158, 2018.

RODIER, L.; SAVASTANO JR, H. Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 333-341, 2018.

RODRIGUES, M. S. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

RONG, Z. D. *et al.* Effect of silica fume and fly ash on hydration and microstructure evolution of cement based composites at low water- binder ratios. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 446-450, 2014.

RONG, Z. *et al.* Effects of nano- SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 25-31, 2015.

ROUX, N.; ANDRADE, Cid; SANJUAN, M. A. Experimental study of durability of reactive powder concretes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-6, 1996.

SACCANI, A.; BIGNOZZI, M. C. ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 531-536, 2010.

SALVADOR FILHO, J. A. A. *et al.* Influência da utilização do pó de vidro em substituição ao cimento Portland na resistência à compressão de matrizes cimentícias de ultra alta resistência. *In: 59º Congresso Brasileiro do Concreto*, 2017.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SCHMIDT, M.; FEHLING, E. Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. **ACI Special Publication**, v. 228, p. 51-78, 2005.

SCHRÖFL, C.; SNOECK, D.; MECHTCHERINE, V. A review of characterisation methods for superabsorbent polymer (SAP) samples to be used in cement-based construction materials: Report of the RILEM TC 260-RSC. **Materials and Structures**, v. 50, n. 4, p. 197, 2017.

SERPA, D. *et al.* ASR of mortars containing glass. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 489-495, 2013.

SHAIKH, F. U. A. *et al.* Performance evaluation of ultrahigh performance fibre reinforced concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117-152, 2020.

SHARIFI, Y.; AFSHOON, I.; FIROOZJAIE, Z. Fresh Properties of Self-Compacting Concrete Containing Ground Waste Glass Microparticles as Cementing Material. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 13, n. 2, p. 50- 66, 2015.

SHAYAN, A.; XU, A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 81-89, 2004.

SHEN, P. *et al.* The effect of curing regimes on the mechanical properties, nano-mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 118, p. 1-13, 2019.

SHIROMA, L. **Atividade pozolânica de resíduos de isoladores de porcelana em matrizes cimentícias.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

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

SILVA, C. M. M. A. **Durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto submetidos a tratamentos com cimento Portland e moagem**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SOARES, S. M. *et al.* Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com a incorporação de diversos teores de pó de vidro. *In: 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (4º SPPC)*, artigo 116, p. 136-146, 2019.

SOARES, S. M.; FERREIRA, F. G. S.; SALVADOR FILHO, J. A. A. Desenvolvimento recente de compósitos cimentícios de alto e ultra alto desempenho. *In: 3º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto (Degrada)*, 2018a.

_____. Influência do pó de vidro na ocorrência de reação álcali-agregado em matrizes cimentícias de ultra alto desempenho. Ibracon, 2018b.

SOBUZ, H. R. *et al.* Manufacturing ultra-high performance concrete utilising conventional materials and production methods. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 251-261, 2016.

SOHAIL, M. G. *et al.* Advancements in concrete mix designs: high-performance and ultrahigh-performance concretes from 1970 to 2016. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 3, 2018.

SOHAIL, M. G. *et al.* Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101669, 2021.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder-towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 600-612, 2016.

_____. Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: filling the micro gap. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 374-383, 2017.

SOLIMAN, N. A.; OMRAN, A. F.; TAGNIT-HAMOU, A. Laboratory Characterization and Field Application of Novel Ultra-High-Performance Glass Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 3, 2016.

SORELLI, L. *et al.* The nano-mechanical signature of ultra high performance concrete by statistical nanoindentation techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1447-1456, 2008.

SOUZA. Princípios da corrosão eletroquímica. *In: RIBEIRO (Ed.). Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção*, 2ª ed. São Paulo: Elsevier, cap. 2, p. 12-32, 2018.

TAFRAOUI, A. *et al.* Metakaolin in the formulation of UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 669-674, 2009.

TAI, Y.-S.; EL-TAWIL, S. Effect of component materials and mixing protocol on the short-term performance of generic ultra-high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117703, 2020.

TAVARES, J. C. **Potencialidade do uso da cinza da folha da bananeira como substituição parcial do cimento Portland em concretos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

TENG, S.; AFROUGHSABET, V.; OSTERTAG, C. P. Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 504-515, 2018.

The many facets of glass. **Éco Entreprises Québec (EEQ)**, 2016. Disponível em: <https://www.eeq.ca/en/the-recycle-bin/innovation-par-matiere/glass/>. Acesso em: 22 de out. de 2020.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Pini, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra alto desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**, 1ª ed. São Paulo: Ibracon, v. 2, cap. 36, p. 1283-1325, 2011.

VAITKEVIČIUS, V.; ŠERELIS, E.; HILBIG, H. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 102-109, 2014.

VAN DEN HEEDE, P.; GRUYAERT, E.; DE BELIE, N. Transport properties of highvolume fly ash concrete: capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 10, p. 749- 756, 2010.

WILLE, K. *et al.* Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing. **Materials and Structures**, v. 45, n. 3, p. 309-324, 2012.

WILLEY, J. A. **Use of ultra-high performance concrete to mitigate impact and explosive threats**. (Master's thesis) – Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, 2013.

YADAV, V. S. *et al.* Sequestration of carbon dioxide (CO₂) using red mud. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, n. 1-3, p. 1044-1050, 2010.

YANG, Q. *et al.* Effect of ground quartz sand on properties of high-strength concrete in the steam-autoclaved curing. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 12, p. 1993-1998, 2000.

ZHANG, H. *et al.* Performance of ultra-high performance concrete (UHPC) with cement partially replaced by ground granite powder (GGP) under different curing conditions. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 469-482, 2019.

ZHENG, K. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Composites**, v. 67, p. 30-38, 2016.

ZHOU, Z.; QIAO, P. Durability of ultra-high performance concrete in tension under cold weather conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 94-106, 2018.

APÊNDICE A

No Apêndice A são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para o **ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA (IAP) – Cal**

Para os valores encontrados no ensaio de resistência à compressão aos sete dias das amostras de argamassa foi feita a análise do desvio relativo máximo (DRM).

Tabela A.1 – Análise do desvio relativo máximo (DRM).

	Resistência à compressão (MPa)	Análise DRM	
		1ª Análise	2ª Análise
Amostra 1	4,72	5,062	1,615
Amostra 2	4,71	5,263	1,824
Amostra 3	5,21	-4,794	-8,598
Amostra 4	4,93	0,838	-2,762
Amostra 5	4,83	2,849	-0,677
Amostra 6	5,43	-9,219	-

Os valores anotados em vermelho na Tabela A.1 indicam que essas amostras foram descartadas para atendimento da norma específica para esse ensaio.

Na Tabela A.2 são apresentados os valores detalhados do ensaio a resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Tabela A.2 – Resistência à compressão aos 7 dias.

Nº CP	IAP – Cal (MPa)	Estatística descritiva	
	Pó de vidro #200	IAP – Cal (MPa) - Pó de vidro #200	
1	4,72	Média	4,80
2	4,71	Erro padrão	0,052
3	4,93	Mediana	4,775
4	4,83	Desvio padrão	0,104
		Variância da amostra	0,011
		Mínimo	4,71
		Máximo	4,93
		Soma	19,19
		Contagem	4

APÊNDICE B

No Apêndice B são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para o **ÍNDICE DE DESEMPENHO COM O CIMENTO PORTLAND**

Para os valores encontrados no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias das amostras de argamassa e referência foi feita a análise do desvio relativo máximo (DRM).

Tabela B.1 – Análise do desvio relativo máximo (DRM).

Argamassa - $f_{cB} = 21,186 \text{ MPa}$				Referência - $f_{cA} = 25,188 \text{ MPa}$		
	Resistência à compressão (MPa)	Análise DRM		Resistência à compressão (MPa)	Análise DRM	
		1ª Análise	2ª Análise		1ª Análise	2ª Análise
Amostra 1	21,66	-2,237	-2,237	24,99	0,240	0,784
Amostra 2	21,68	-2,332	-2,332	26,81	-7,026	-6,442
Amostra 3	20,39	3,757	3,757	22,74	9,222	-
Amostra 4	20,20	4,654	4,654	24,42	2,515	3,047
Amostra 5	19,67	7,156	-	25,58	-2,116	-1,558
Amostra 6	22,00	-3,842	-3,842	25,76	-2,834	-2,273

Os valores anotados em vermelho na Tabela B.1 indicam que essa amostra foi descartada para atendimento da norma específica para esse ensaio.

Na Tabela B.2 são apresentados os valores detalhados do ensaio a resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Tabela B.2 – Resistência à compressão aos 28 dias.

Nº CP	$I_{cimento}$ (MPa)	Estatística descritiva	
	Pó de vidro #200	$I_{cimento}$ (MPa) - Pó de vidro #200	
1	21,66	Média	21,19
2	21,68	Erro padrão	0,370
3	20,39	Mediana	21,66
4	20,20	Desvio padrão	0,827
5	22,00	Variância da amostra	0,684
		Mínimo	20,20
		Máximo	22,00
		Soma	105,93
		Contagem	5

APÊNDICE C

No Apêndice C são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE**

ANÁLISE AOS 7 DIAS

Na Tabela C.1 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, aos 7 dias de idade, ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.1 – Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 7 dias.

Nº CP	Absorção por capilaridade no período de 72 horas - 7 dias (g/cm ²)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	0,106	0,102	0,133	0,149	0,139
2	0,088	0,117	0,111	0,135	0,133
3	0,104	0,104	0,120	0,139	0,129

Na Tabela C.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, aos 7 dias de idade, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.2 – Valores estatísticos descritivos de absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância (g/cm ²) ²
REF	3	0,298	0,099	1,05E-04
VD10	3	0,324	0,108	6,41E-05
VD20	3	0,363	0,121	1,27E-04
VD30	3	0,422	0,141	5,10E-05
VD50	3	0,401	0,134	2,63E-05

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de 7 dias de absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela C.3.

Tabela C.3 – ANOVA da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios aos 7 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,57E-03	4	8,91E-04	11,95	7,97E-04	3,48
Dentro dos grupos	7,46E-04	10	7,46E-05			
Total	4,31E-03	14				

Conclusão: Rejeitar H_0

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os valores podem ser observados na Tabela C.4.

Tabela C.4 – Teste de Tukey para os valores de absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	SIM	SIM
VD10			NÃO	SIM	SIM
VD20				NÃO	NÃO
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 28 DIAS

Na Tabela C.5 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, aos 28 dias de idade, ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.5 – Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 28 dias.

Nº CP	Absorção por capilaridade no período de 72 horas - 28 dias (g/cm ²)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	0,085	0,081	0,095	0,089	0,077
2	0,070	0,080	0,098	0,089	0,112
3	0,084	0,069	0,084	0,094	0,075

Na Tabela C.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, aos 28 dias de idade, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.6 – Valores estatísticos descritivos de absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância (g/cm ²) ²
REF	3	0,238	0,079	6,81E-05
VD10	3	0,230	0,077	4,60E-05
VD20	3	0,277	0,092	5,22E-05
VD30	3	0,272	0,091	7,01E-06
VD50	3	0,264	0,088	4,13E-04

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de 28 dias de absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela C.7.

Tabela C.7 – ANOVA para os valores de absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios aos 28 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,90E-04	4	1,47E-04	1,26	3,49E-01	3,48
Dentro dos grupos	1,17E-03	10	1,17E-04			
Total	1,76E-03	14				

Obs.: Não foi necessário fazer o teste de Tukey, pois $F_{\text{calculado}} < F_{\text{crítico}}$.

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve aceitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações não são significativamente diferentes. Os valores encontrados para a absorção de água por capilaridade aos 28 dias não apresentam diferenças significativas entre eles, apresentando também uma baixa absorção de água por capilaridade, sendo o maior valor igual a 0,09 g/cm² (VD20, VD30 e VD50).

ANÁLISE AOS 180 DIAS

Na Tabela C.8 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, aos 180 dias de idade, ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.8 – Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 180 dias.

Nº CP	Absorção por capilaridade no período de 72 horas - 180 dias (g/cm ²)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	0,122	0,146	0,139	0,162	0,155
2	0,122	0,161	0,140	0,169	0,154
3	0,132	0,140	0,150	0,159	0,166

Na Tabela C.9 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, aos 180 dias de idade, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.9 – Valores estatísticos descritivos de absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância (g/cm ²) ²
REF	3	0,377	0,126	3,46E-05
VD10	3	0,446	0,149	1,14E-04
VD20	3	0,428	0,143	3,84E-05
VD30	3	0,490	0,163	2,73E-05
VD50	3	0,475	0,158	3,84E-05

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de 180 dias de absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela C.10.

Tabela C.10 – ANOVA para os valores de absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios aos 180 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,62E-03	4	6,55E-04	12,95	5,75E-04	3,48
Dentro dos grupos	5,06E-04	10	5,06E-05			
Total	3,13E-03	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os valores podem ser observados na Tabela C.11.

Tabela C. 11 – Teste de Tukey para os valores de absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		SIM	NÃO	SIM	SIM
VD10			NÃO	NÃO	NÃO
VD20				SIM	NÃO
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO REF ENTRE AS IDADES

Na Tabela C.12 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade do compósito cimentício REF entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.12 – Absorção de água por capilaridade do REF entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Nº CP	Absorção por capilaridade no período de 72 horas - REF (g/cm ²)		
	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,106	0,085	0,122
2	0,088	0,070	0,122
3	0,104	0,084	0,132

Na Tabela C.13 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício REF entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.13 – Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade do REF entre as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância (g/cm ²) ²
7 dias	3	0,298	0,099	1,05E-04
28 dias	3	0,238	0,079	6,81E-05
180 dias	3	0,377	0,126	3,46E-05

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do REF entre 7, 28 e 180 dias de idade da absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela C.14.

Tabela C.14 – ANOVA para os valores de absorção de água por capilaridade do REF entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,24E-03	2	1,62E-03	23,47	1,46E-03	5,14
Dentro dos grupos	4,15E-04	6	6,91E-05			
Total	3,66E-03	8		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os valores podem ser observados na Tabela C.15.

Tabela C.15 – Teste de Tukey para os valores de absorção de água por capilaridade do REF entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Idades	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		NÃO	SIM
28 dias			SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE DO VD10 ENTRE AS IDADES

Na Tabela C.16 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade do compósito cimentício VD10 entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.16 – Absorção de água por capilaridade do VD10 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Nº CP	Absorção por capilaridade no período de 72 horas - VD10 (g/cm ²)		
	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,102	0,081	0,146
2	0,117	0,080	0,161
3	0,104	0,069	0,140

Na Tabela C.17 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício VD10 entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.17 – Valores estatísticos descritivos de absorção de água por capilaridade do VD10 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância (g/cm ²) ²
7 dias	3	0,324	0,108	6,41E-05
28 dias	3	0,230	0,077	4,60E-05
180 dias	3	0,446	0,149	1,14E-04

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do VD10 entre 7, 28 e 180 dias de idade da absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela C.18.

Tabela C.18 – ANOVA para os absorção de água por capilaridade do VD10 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,86E-03	2	3,93E-03	52,60	1,57E-04	5,14
Dentro dos grupos	4,48E-04	6	7,47E-05			
Total	8,31E-03	8		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os valores podem ser observados na Tabela C.19.

Tabela C.19 – Teste de Tukey para os valores de absorção de água por capilaridade do VD10 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Idades	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		SIM	SIM
28 dias			SIM

Obs.: SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE DO VD20 ENTRE AS IDADES

Na Tabela C.20 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade do compósito cimentício VD20 entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.20 – Absorção de água por capilaridade do VD20 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Nº CP	Absorção por capilaridade no período de 72 horas - VD20 (g/cm ²)		
	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,133	0,095	0,139
2	0,111	0,098	0,140
3	0,120	0,084	0,150

Na Tabela C.21 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício VD20 entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.21 – Valores estatísticos descritivos de absorção de água por capilaridade do VD20 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância (g/cm ²) ²
7 dias	3	0,363	0,121	1,27E-04
28 dias	3	0,277	0,092	5,22E-05
180 dias	3	0,428	0,143	3,84E-05

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do VD20 entre 7, 28 e 180 dias de idade da absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela C.22.

Tabela C.22 – ANOVA para os valores de absorção de água por capilaridade do VD20 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,84E-03	2	1,92E-03	26,49	1,05E-03	5,14
Dentro dos grupos	4,35E-04	6	7,26E-05			
Total	4,28E-03	8		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os valores podem ser observados na Tabela C.23.

Tabela C.23 – Teste de Tukey para os valores de absorção de água por capilaridade do VD20 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Idades	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		SIM	SIM
28 dias			SIM

Obs.: SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE DO VD30 ENTRE AS IDADES

Na Tabela C.24 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade do compósito cimentício VD30 entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.24 – Absorção de água por capilaridade do VD30 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Nº CP	Absorção por capilaridade no período de 72 horas - VD30 (g/cm ²)		
	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,149	0,089	0,162
2	0,135	0,089	0,169
3	0,139	0,094	0,159

Na Tabela C.25 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício VD30 entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.25 – Valores estatísticos descritivos de absorção de água por capilaridade do VD30 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância (g/cm ²) ²
7 dias	3	0,422	0,141	5,10E-05
28 dias	3	0,272	0,091	7,01E-06
180 dias	3	0,490	0,163	2,73E-05

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do VD30 entre 7, 28 e 180 dias de idade da absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela C.26.

Tabela C.26 – ANOVA para os valores de absorção de água por capilaridade do VD30 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,31E-03	2	4,15E-03	145,99	8,16E-06	5,14
Dentro dos grupos	1,71E-04	6	2,84E-05			
Total	8,48E-03	8		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela C.27.

Tabela C.27– Teste de Tukey para os valores de absorção de água por capilaridade do VD30 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Idades	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		SIM	SIM
28 dias			SIM

Obs.: SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE DO VD50 ENTRE AS IDADES

Na Tabela C.28 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade do compósito cimentício VD50 entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.28 – Absorção de água por capilaridade do VD50 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Nº CP	Absorção por capilaridade no período de 72 horas - VD50 (g/cm ²)		
	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,139	0,077	0,155
2	0,133	0,112	0,154
3	0,129	0,075	0,166

Na Tabela C.29 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício VD50 entre 7, 28 e 180 dias de idade ao final do ensaio em 72 horas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela C.29 – Valores estatísticos descritivos de absorção de água por capilaridade do VD50 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância (g/cm ²) ²
7 dias	3	0,401	0,134	2,63E-05
28 dias	3	0,264	0,088	4,13E-04
180 dias	3	0,475	0,158	3,84E-05

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do VD50 entre 7, 28 e 180 dias de idade da absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela C.30.

Tabela C.30 – ANOVA para os valores de absorção de água do VD50 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,63E-03	2	3,82E-03	23,96	1,38E-03	5,14
Dentro dos grupos	9,56E-04	6	1,59E-04			
Total	8,59E-03	8		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela C.31.

Tabela C.31 – Teste de Tukey para os valores de absorção de água por capilaridade do VD50 entre as idades de 7, 28 e 180 dias.

Idades	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		SIM	NÃO
28 dias			SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

APÊNDICE D

No Apêndice D são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL**

ANÁLISE AOS 2 DIAS

Na Tabela D.1 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios estudados aos 2 dias de idade.

Tabela D.1 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 2 dias de idade.

Nº CP	Resistência à compressão axial - 2 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	87,66	78,10	78,55	36,57*	42,96
2	80,42	81,46	79,18	45,70	38,41*
3	85,39	78,62	68,48	44,00	45,36
4	84,26	79,52	70,71	45,04	45,05

Obs.: * Valores eliminados.

Na Tabela D.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 2 dias de idade.

Tabela D.2 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 2 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	4	337,73	84,43	9,15E+00
VD10	4	317,70	79,43	2,18E+00
VD20	4	296,92	74,23	2,95E+01
VD30	3	134,74	44,91	7,35E-01
VD50	3	133,37	44,46	1,70E+00

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 2 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela D.3.

Tabela D.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 2 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	5018,63	4	1254,66	127,91	2,67E-10	3,18
Dentro dos grupos	127,51	13	9,81			
Total	5146,15	17			Conclusão: Rejeitar H_0	

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela D.4.

Tabela D.4 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 2 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	SIM	SIM	SIM
VD10			NÃO	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 7 DIAS

Na Tabela D.5 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios estudados aos 7 dias de idade.

Tabela D.5 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade.

Nº CP	Resistência à compressão axial - 7 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	86,99	81,51	84,32	72,31	62,54
2	92,32	85,59	80,02	72,47	61,34
3	93,57	86,73	74,72	77,98	55,45
4	87,53	85,52	77,86	76,38	55,89

Na Tabela D.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade.

Tabela D.6 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	4	360,41	90,10	1,11E+01
VD10	4	339,36	84,84	5,22E+00
VD20	4	316,92	79,23	1,62E+01
VD30	4	299,14	74,79	8,07E+00
VD50	4	235,22	58,81	1,34E+01

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela D.7.

Tabela D.7 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 7 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	2290,05	4	572,51	53,03	1,13E-08	3,06
Dentro dos grupos	161,93	15	10,80			
Total	2451,97	19		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela D.8.

Tabela D.8 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 7 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	SIM	SIM	SIM
VD10			NÃO	SIM	SIM
VD20				NÃO	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 28 DIAS

Na Tabela D.9 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios estudados aos 28 dias de idade.

Tabela D. 9 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Nº CP	Resistência à compressão axial - 28 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	123,12	119,29	111,76	113,24	80,58
2	122,77	119,56	105,15	115,85	93,32
3	100,84	115,99	116,08	101,82	91,20
4	78,75*	122,75	121,30	111,71	67,16*

Obs.: * Valores eliminados.

Na Tabela D.10 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Tabela D.10 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	3	346,73	115,58	1,63E+02
VD10	4	477,58	119,40	7,63E+00
VD20	4	454,28	113,57	4,68E+01
VD30	4	442,62	110,66	3,76E+01
VD50	3	265,10	88,37	4,66E+01

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela D.11.

Tabela D.11 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 28 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1901,08	4	475,27	8,89	1,10E-03	3,18
Dentro dos grupos	695,11	13	53,47			
Total	2596,19	17			Conclusão: Rejeitar H_0	

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela D.12.

Tabela D.12 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 28 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	NÃO	SIM
VD10			NÃO	NÃO	SIM
VD20				NÃO	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 91 DIAS

Na Tabela D.13 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios estudados aos 91 dias de idade.

Tabela D.13 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Nº CP	Resistência à compressão axial - 91 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	134,23	142,92	149,52	143,59	111,16
2	141,91	155,75	136,09	150,57	135,96
3	135,33	128,54	153,16	135,94	127,47
4	107,20*	134,93	141,02	117,92*	113,61

Obs.: * Valores eliminados.

Na Tabela D.14 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Tabela D.14 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	3	411,48	137,16	1,73E+01
VD10	4	562,14	140,53	1,37E+02
VD20	4	579,79	144,95	6,07E+01
VD30	3	430,10	143,37	5,36E+01
VD50	4	488,20	122,05	1,38E+02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela D.15.

Tabela D.15 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 91 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1316,49	4	329,12	3,72	3,13E-02	3,18
Dentro dos grupos	1148,91	13	88,38			
Total	2465,40	17			Conclusão: Rejeitar H_0	

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela D.16.

Tabela D.16 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 91 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
VD10			NÃO	NÃO	NÃO
VD20				NÃO	SIM
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 365 DIAS

Na Tabela D.17 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios estudados aos 365 dias de idade.

Tabela D.17 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 365 dias de idade.

Nº CP	Resistência a compressão axial – 365 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	161,91	161,05	159,49	156,92	137,95
2	173,95	151,06	164,57	149,54	137,05
3	95,91*	150,90	156,21	160,34	140,20

Obs.: * Este ensaio foi realizado com 3 corpos de prova para cada traço. Para o traço referência um dos valores foi eliminado por aumentar muito o desvio padrão.

Na Tabela D.18 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 365 dias de idade.

Tabela D.18 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 365 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	2	335,87	167,93	7,25E+01
VD10	3	463,00	154,33	3,38E+01
VD20	3	480,27	160,09	1,77E+01
VD30	3	466,81	155,60	3,05E+01
VD50	3	415,19	138,40	2,63E+00

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 365 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela D.19.

Tabela D.19 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 365 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1235,96	4	308,99	11,50	1,38E-03	3,63
Dentro dos grupos	241,76	9	26,86			
Total	1477,72	13			Conclusão: Rejeitar H_0	

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela D.20.

Tabela D.20 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 365 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	NÃO	SIM
VD10			NÃO	NÃO	SIM
VD20				NÃO	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

APÊNDICE E

No Apêndice E são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

ANÁLISE AOS 28 DIAS

Na Tabela E.1 são apresentados os valores de resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios estudados aos 28 dias de idade.

Tabela E.1 – Resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Nº CP	Tração por compressão diametral - 28 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	11,59	10,73	10,83	9,29	9,69
2	11,00	11,07	10,98	10,61	9,54
3	10,64	11,02	11,27	10,31	10,22

Na Tabela E.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Tabela E.2 – Valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	3	33,23	11,08	2,30E-01
VD10	3	32,82	10,94	3,37E-02
VD20	3	33,08	11,03	5,00E-02
VD30	3	30,21	10,07	4,79E-01
VD50	3	29,45	9,82	1,28E-01

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela E.3.

Tabela E.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,26	4	1,06	5,78	1,13E-02	3,48
Dentro dos grupos	1,84	10	0,18			
Total	6,10	14			Conclusão: Rejeitar H_0	

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela E.4.

Tabela E.4 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	NÃO	SIM
VD10			NÃO	NÃO	NÃO
VD20				NÃO	SIM
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 180 DIAS

Na Tabela E.5 são apresentados os valores de resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios estudados aos 180 dias de idade.

Tabela E.5 – Resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Nº CP	Tração por compressão diametral - 180 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	12,58	10,99	11,08	10,93	10,43
2	12,61	12,81	12,33	11,74	10,42
3	10,83	10,34	10,63	13,37	9,84

Na Tabela E.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Tabela E.6 – Valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	3	36,02	12,01	1,04E+00
VD10	3	34,14	11,38	1,64E+00
VD20	3	34,04	11,35	7,76E-01
VD30	3	36,04	12,01	1,54E+00
VD50	3	30,69	10,23	1,14E-01

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela E.7.

Tabela E.7 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à tração por compressão diametral aos 180 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,35	4	1,59	1,55	2,61E-01	3,48
Dentro dos grupos	10,22	10	1,02			
Total	16,57	14		Conclusão: Aceitar H_0		

Obs.: Não foi necessário fazer o teste de Tukey, pois $F_{\text{calculado}} < F_{\text{crítico}}$.

A partir dos dados da ANOVA dos resultados de 180 dias de resistência à tração por compressão diametral, chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve aceitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, não há diferença significativa em relação as médias das populações.

APÊNDICE F

No Apêndice F são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO**

ANÁLISE AOS 28 DIAS

Na Tabela F.1 são apresentados os valores de resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios estudados aos 28 dias de idade.

Tabela F.1 – Resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Nº CP	Tração por flexão - 28 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	22,55	21,03	21,96	20,39	19,65
2	25,45	23,20	20,48	20,85	18,46
3	21,36	21,54	20,80	18,14	18,06

Na Tabela F.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Tabela F.2 – Valores estatísticos descritivos da resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	3	69,36	23,12	4,43E+00
VD10	3	65,77	21,92	1,29E+00
VD20	3	63,24	21,08	6,06E-01
VD30	3	59,38	19,79	2,10E+00
VD50	3	56,17	18,72	6,84E-01

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela F.3.

Tabela F.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à tração por flexão aos 28 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	35,90	4	8,98	4,93	1,86E-02	3,48
Dentro dos grupos	18,21	10	1,82			
Total	54,11	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela F.4.

Tabela F.4 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à tração por flexão aos 28 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	NÃO	SIM
VD10			NÃO	NÃO	NÃO
VD20				NÃO	NÃO
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

APÊNDICE G

No Apêndice G são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO**

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ANÁLISE AOS 28 DIAS

No ensaio de módulo de elasticidade dinâmico são obtidos dois valores de módulo, devido a maneira como é feita a excitação no corpo de prova. O valor final de módulo de elasticidade dinâmico é uma média dos valores obtidos no ensaio. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela G.1.

Tabela G.1 – Valores obtidos de módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Nº CP	Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico - 28 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	53,92	52,13	51,84	52,10	49,62
2	52,64	52,66	52,40	52,33	49,89
3	53,37	51,67	52,06	52,68	49,75

Na Tabela G.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos dos módulos de elasticidade dinâmicos dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Tabela G.2 – Valores estatísticos descritivos do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	3	159,92	53,31	4,09E-01
VD10	3	156,45	52,15	2,43E-01
VD20	3	156,30	52,10	8,09E-02
VD30	3	157,10	52,37	8,51E-02
VD50	3	149,25	49,75	1,89E-02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela G.3.

Tabela G.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	20,74	4	5,19	30,98	1,31E-05	3,48
Dentro dos grupos	1,67	10	0,17			
Total	22,42	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela G.4.

Tabela G.4 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		SIM	SIM	NÃO	SIM
VD10			NÃO	NÃO	SIM
VD20				NÃO	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO **ANÁLISE AOS 28 DIAS**

A Tabela G.5 apresenta os valores de módulo de elasticidade estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias obtidos nos ensaios.

Tabela G.5 – Valores obtidos de módulo de elasticidade estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Nº CP	Ensaio do módulo de elasticidade estático - 28 dias				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	45,11	48,34	38,06	42,58	42,39
2	43,82	47,01	42,55	46,36	40,88
3	41,50	41,97	45,11	40,97	42,17

Na Tabela G.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos dos módulos de elasticidade estáticos dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Tabela G.6 – Valores estatísticos descritivos do módulo de elasticidade estático aos 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	3	130,43	43,48	3,35E+00
VD10	3	137,32	45,77	1,13E+01
VD20	3	125,72	41,91	1,27E+01
VD30	3	129,91	43,30	7,66E+00
VD50	3	125,44	41,81	6,65E-01

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do módulo de elasticidade estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela G.7.

Tabela G.7 – ANOVA para os compósitos cimentícios do módulo de elasticidade estático aos 28 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	30,87	4	7,72	1,08	4,16E-01	3,48
Dentro dos grupos	71,39	10	7,14			
Total	102,26	14				

Obs.: Não foi necessário fazer o teste de Tukey, pois $F_{\text{calculado}} < F_{\text{crítico}}$.

A partir dos dados da ANOVA dos resultados de 28 dias do módulo de elasticidade estático, chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve aceitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, não há diferença significativa em relação as médias das populações.

APÊNDICE H

No Apêndice H são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **POROSIDADE APARENTE**

ANÁLISE AOS 7 DIAS

A Tabela H.1 apresenta os valores de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 7 dias obtidos nos ensaios.

Tabela H. 1 – Valores obtidos de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade.

N° CP	Porosidade - 7 dias (%)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	2,269	4,155	2,686	3,573	4,861
2	2,160	4,255	2,687	3,407	4,820
3	1,302	4,072	2,784	3,418	5,064

Na Tabela H.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade.

Tabela H.2 – Valores estatísticos descritivos de porosidade aparente aos 7 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (%)	Média (%)	Variância (%) ²
REF	3	5,731	1,910	2,81E-01
VD10	3	12,481	4,160	8,40E-03
VD20	3	8,157	2,719	3,15E-03
VD30	3	10,399	3,466	8,67E-03
VD50	3	14,744	4,915	1,71E-02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela H.3.

Tabela H.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 7 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	16,66	4	4,17	65,48	3,91E-07	3,48
Dentro dos grupos	0,64	10	0,06			
Total	17,30	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela H.4.

Tabela H.4 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 7 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		SIM	SIM	SIM	SIM
VD10			SIM	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					SIM

Obs.: SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 28 DIAS

A Tabela H.5 apresenta os valores de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias obtidos nos ensaios.

Tabela H.5 – Valores obtidos de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

N° CP	Porosidade - 28 dias (%)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	2,128	2,251	2,455	3,077	3,551
2	2,399	2,491	2,726	3,507	3,439
3	2,376	2,568	2,745	3,214	3,555

Na Tabela H.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Tabela H.6 – Valores estatísticos descritivos de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (%)	Média (%)	Variância (%) ²
REF	3	6,904	2,301	2,25E-02
VD10	3	7,310	2,437	2,72E-02
VD20	3	7,927	2,642	2,63E-02
VD30	3	9,798	3,266	4,82E-02
VD50	3	10,545	3,515	4,31E-03

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela H.7.

Tabela H.7 – ANOVA para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 28 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,39	4	0,85	32,94	9,86E-06	3,48
Dentro dos grupos	0,26	10	0,03			
Total	3,64	14			Conclusão: Rejeitar H_0	

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela H.8.

Tabela H.8 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 28 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	SIM	SIM
VD10			NÃO	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 91 DIAS

A Tabela H.9 apresenta os valores de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 91 dias obtidos nos ensaios.

Tabela H.9 – Valores obtidos de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Nº CP	Porosidade - 91 dias (%)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	3,289	3,710	3,810	4,610	4,705
2	3,549	3,802	4,161	4,758	4,869
3	3,541	4,265	4,222	4,659	4,870

Na Tabela H.10 são apresentados os valores estatísticos descritivos da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Tabela H.10 – Valores estatísticos descritivos de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (%)	Média (%)	Variância (%) ²
REF	3	10,380	3,460	2,19E-02
VD10	3	11,777	3,926	8,82E-02
VD20	3	12,193	4,064	4,94E-02
VD30	3	14,027	4,676	5,70E-03
VD50	3	14,443	4,814	9,05E-03

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela H.11.

Tabela H.11 – ANOVA para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 91 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,73	4	0,93	26,78	2,53E-05	3,48
Dentro dos grupos	0,35	10	0,03			
Total	4,08	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela H.12.

Tabela H.12 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 91 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	SIM	SIM	SIM
VD10			NÃO	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 180 DIAS

A Tabela H.13 apresenta os valores de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 180 dias obtidos nos ensaios.

Tabela H.13 – Valores obtidos de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Nº CP	Porosidade - 180 dias (%)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	4,509	4,598	4,925	5,664	6,225
2	4,892	4,834	5,351	5,779	6,272
3	4,720	5,116	5,194	5,751	6,293

Na Tabela H.14 são apresentados os valores estatísticos descritivos da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Tabela H.14 – Valores estatísticos descritivos de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (%)	Média (%)	Variância (%) ²
REF	3	14,121	4,707	3,69E-02
VD10	3	14,548	4,849	6,73E-02
VD20	3	15,471	5,157	4,63E-02
VD30	3	17,194	5,731	3,59E-03
VD50	3	18,790	6,263	1,20E-03

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela H.15.

Tabela H.15 – ANOVA para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 180 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,04	4	1,26	40,58	3,76E-06	3,48
Dentro dos grupos	0,31	10	0,03			
Total	5,35	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela H.16.

Tabela H.16 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 180 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	SIM	SIM
VD10			NÃO	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 365 DIAS

A Tabela H.17 apresenta os valores de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 365 dias obtidos nos ensaios.

Tabela H.17 – Valores obtidos de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 365 dias de idade.

N° CP	Porosidade - 365 dias (%)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	4,830	5,069	5,307	6,072	6,265
2	4,998	5,163	5,680	6,512	6,607
3	4,907	5,369	5,507	6,283	6,355

Na Tabela H.18 são apresentados os valores estatísticos descritivos da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 365 dias de idade.

Tabela H.18 – Valores estatísticos descritivos de porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 365 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (%)	Média (%)	Variância (%) ²
REF	3	14,735	4,912	7,04E-03
VD10	3	15,601	5,200	2,34E-02
VD20	3	16,494	5,498	3,47E-02
VD30	3	18,867	6,289	4,85E-02
VD50	3	19,228	6,409	3,14E-02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da porosidade aparente dos compósitos cimentícios aos 365 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela H.19.

Tabela H.19 – ANOVA para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 365 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,26	4	1,32	45,35	2,23E-06	3,48
Dentro dos grupos	0,29	10	0,03			
Total	5,55	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela H.20.

Tabela H.20 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios de porosidade aparente aos 365 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	SIM	SIM	SIM
VD10			NÃO	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

APÊNDICE I

No Apêndice I são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **DENSIDADE APARENTE**

ANÁLISE AOS 28 DIAS

A Tabela I.1 apresenta os valores de densidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias obtidos nos ensaios.

Tabela I.1 – Valores obtidos de densidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Nº CP	Densidade - 28 dias (g/cm³)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	2,389	2,373	2,355	2,329	2,283
2	2,387	2,368	2,346	2,319	2,290
3	2,395	2,366	2,350	2,322	2,285

Na Tabela I.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da densidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Tabela I.2 – Valores estatísticos descritivos de densidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm³)	Média (g/cm³)	Variância (g/cm³)²
REF	3	7,171	2,390	1,66E-05
VD10	3	7,108	2,369	1,34E-05
VD20	3	7,050	2,350	2,06E-05
VD30	3	6,970	2,323	2,53E-05
VD50	3	6,858	2,286	1,22E-05

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da densidade aparente dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela I.3.

Tabela I.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios de densidade aparente aos 28 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,98E-02	4	4,95E-03	280,72	3,19E-10	3,48
Dentro dos grupos	1,76E-04	10	1,76E-05			
Total	2,00E-02	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela I.4.

Tabela I.4 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios de densidade aparente aos 28 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		SIM	SIM	SIM	SIM
VD10			SIM	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					SIM

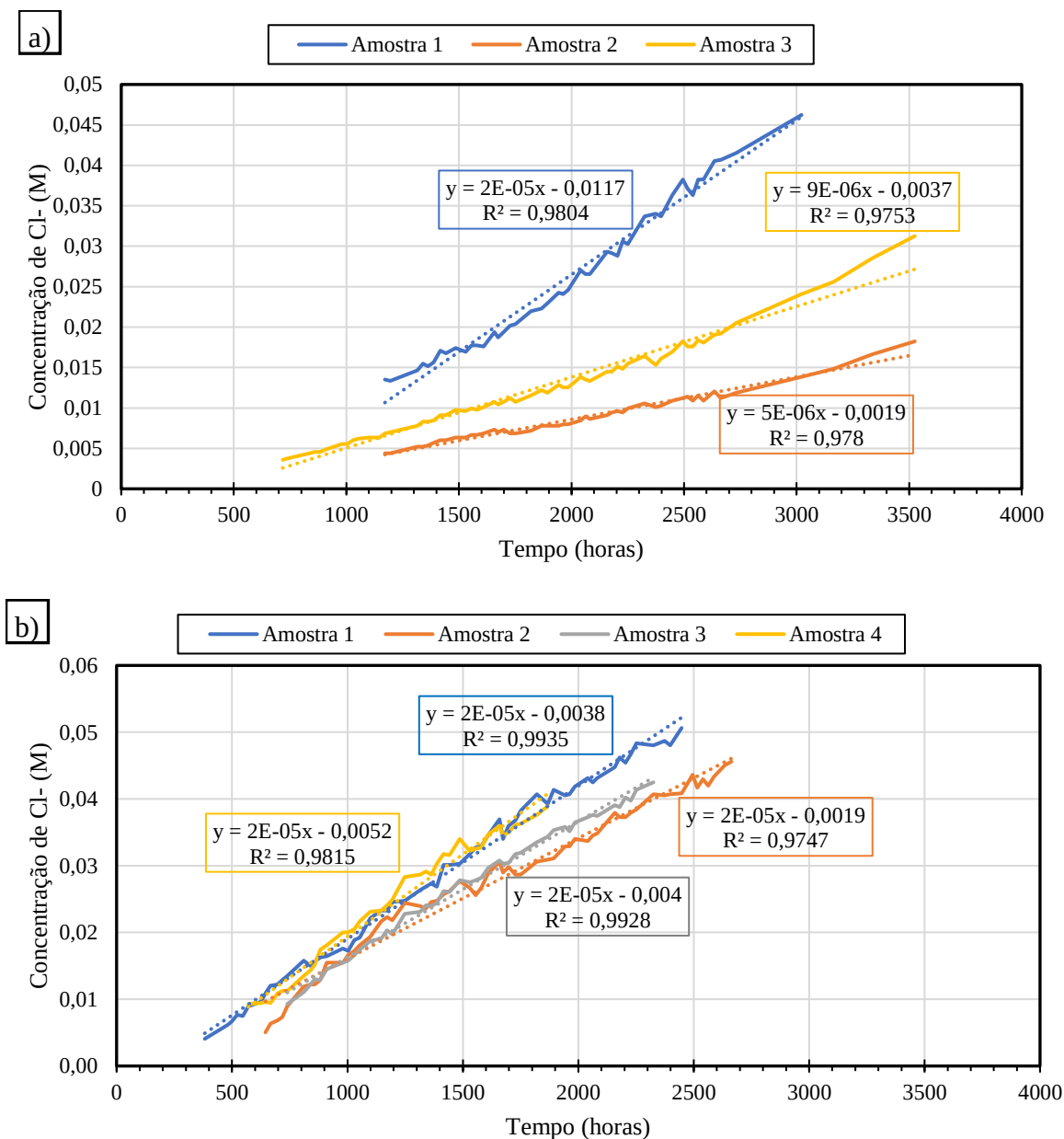
Obs.: SIM = há diferença significativa.

APÊNDICE J

No Apêndice J são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **MIGRAÇÃO DE CLORETOS**

Para o cálculo do *time lag* foram determinadas as curvas correspondentes ao estado não estacionário do ensaio de migração de cloretos com os respectivos valores do R^2 . Na Figura J.1 apresentam-se as curvas para determinação do *time lag* das amostras REF e VD50 utilizadas no ensaio de migração.

Figura J.1 – Curvas para determinação dos *time lag*. a) amostras de referência; b) amostras VD50.



ANÁLISE DO FLUXO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS – JCL

A Tabela J.1 apresenta os valores do fluxo de migração de cloretos dos compósitos cimentícios obtidos no ensaio.

Tabela J.1 – Valores do fluxo de migração de cloretos (Jcl) dos compósitos cimentícios.

Nº Amostras	Jcl (mol/s.cm ²)	
	REF	VD50
1	1,533E-10	1,955E-10
2	5,098E-11	1,742E-10
3	8,548E-11	1,816E-10
4	6,133E-11*	1,983E-10

Obs.: * Valores eliminados.

Na Tabela J.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos do fluxo de migração de cloretos dos compósitos cimentícios.

Tabela J.2 – Valores estatísticos descritivos do fluxo de migração de cloretos (Jcl) dos compósitos cimentícios.

Grupo	Contagem	Soma (mol/s.cm ²)	Média (mol/s.cm ²)	Variância (mol/s.cm ²) ²
REF	3	2,90E-10	9,66E-11	2,71E-21
VD50	4	7,50E-10	1,87E-10	1,31E-22

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do fluxo de migração de cloretos dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela J.3.

Tabela J.3 – ANOVA para os valores do fluxo de migração de cloretos (Jcl) dos compósitos cimentícios.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,41E-20	1	1,41E-20	12,14	1,76E-02	6,61
Dentro dos grupos	5,82E-21	5	1,16E-21			
Total	1,99E-20	6		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela J.4.

Tabela J.4 – Teste de Tukey para fluxo de migração de cloretos (Jcl) dos compósitos cimentícios.

Amostras	REF	VD50
REF		SIM

Obs.: SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS NO ESTADO ESTACIONÁRIO – DS

A Tabela J.5 apresenta os valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios.

Tabela J.5 – Valores do coeficiente de difusão no estado estacionário (Ds) dos compósitos cimentícios.

Nº Amostras	Ds (cm ² /s)	
	REF	VD50
1	9,724E-10	1,240E-09
2	3,233E-10	1,104E-09
3	5,420E-10	1,152E-09
4	3,889E-10*	1,257E-09

Obs.: * Valores eliminados.

Na Tabela J.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos do coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário dos compósitos cimentícios.

Tabela J.6 – Valores estatísticos descritivos do coeficiente de difusão no estado estacionário (Ds) dos compósitos cimentícios.

Grupo	Contagem	Soma (cm ² /s)	Média (cm ² /s)	Variância (cm ² /s) ²
REF	3	1,84E-09	6,13E-10	1,09E-19
VD50	4	4,75E-09	1,19E-09	5,27E-21

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do coeficiente de difusão de cloretos dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela J.7.

Tabela J.7 – ANOVA para os valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário (Ds) dos compósitos cimentícios.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,68E-19	1	5,68E-19	12,14	1,76E-02	6,61
Dentro dos grupos	2,34E-19	5	4,68E-20			
Total	8,02E-19	6		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela J.8.

Tabela J.8 – Teste de Tukey para os valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário (Ds) dos compósitos cimentícios.

Amostras	REF	VD50
REF		SIM

Obs.: SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS NO ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO – DNS

A Tabela J.9 apresenta os valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios.

Tabela J.9 – Valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário (Dns) dos compósitos cimentícios.

Nº Amostras	Dns (cm ² /s)	
	REF	VD50
1	7,486E-09	2,246E-08
2	1,347E-08	4,492E-08
3	1,172E-08	2,156E-08
4	1,540E-08*	3,369E-08

Obs.: * Valores eliminados.

Na Tabela J.10 são apresentados os valores estatísticos descritivos do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios.

Tabela J.10 – Valores estatísticos descritivos do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário (Dns) dos compósitos cimentícios.

Grupo	Contagem	Soma (cm ² /s)	Média (cm ² /s)	Variância (cm ² /s) ²
REF	3	3,27E-08	1,09E-08	9,48E-18
VD50	4	1,23E-07	3,07E-08	1,21E-16

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela J.11.

Tabela J.11 – ANOVA para os valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário (Dns) dos compósitos cimentícios.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,70E-16	1	6,70E-16	8,78	3,14E-02	6,61
Dentro dos grupos	3,81E-16	5	7,63E-17			
Total	1,05E-15	6		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela J.12.

Tabela J.12 – Teste de Tukey para os valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário (Dns) dos compósitos cimentícios.

Amostras	REF	VD50
REF		SIM

Obs.: SIM = há diferença significativa.

APÊNDICE K

No Apêndice K são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **DIFUSÃO DE CLORETOS**

Nas Tabelas K.1 a K.5 apresentam-se os valores da medição de penetração de cloretos após o ensaio de difusão dos compósitos cimentícios.

Tabela K.1 – Valores de penetração de cloretos do traço REF.

Penetração de cloretos - REF (mm)								
Medida	CP1		CP2		CP3		CP4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	0,99	1,12	0,98	0,99	2,00	1,11	1,17	1,42
2	1,53	1,34	0,85	1,61	1,48	0,89	1,03	1,50
3	1,25	0,94	1,00	1,24	1,63	0,90	1,20	1,30
4	1,41	0,94	0,84	1,07	1,04	1,20	1,39	0,67
5	1,30	0,76	1,00	1,27	1,40	1,33	1,21	0,95
6	1,45	1,00	0,78	1,49	1,21	1,21	1,34	0,97
7	1,09	0,87	0,99	1,11	1,42	1,30	1,24	0,79
Média (mm)	1,14		1,09		1,29		1,16	

Tabela K.2 – Valores de penetração de cloretos do traço VD10.

Penetração de cloretos - VD10 (mm)								
Medida	CP1		CP2		CP3		CP4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1,76	0,94	1,05	1,05	1,24	1,22	1,12	1,31
2	1,38	1,01	1,49	0,73	1,54	1,24	0,84	1,07
3	1,61	1,16	1,58	1,15	1,47	1,35	0,83	0,88
4	1,44	1,34	0,98	1,38	1,29	0,88	0,83	0,86
5	1,37	1,00	1,31	1,37	0,83	0,96	0,74	1,33
6	1,11	1,20	0,79	1,39	0,66	0,93	0,74	1,15
7	1,10	1,26	1,37	1,16	1,13	0,77	0,98	1,11
Média (mm)	1,26		1,20		1,11		0,99	

Tabela K.3 – Valores de penetração de cloretos do traço VD20.

Penetração de cloretos - VD20 (mm)								
Medida	CP1		CP2		CP3		CP4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	0,99	0,98	1,31	1,65	1,46	1,62	1,40	1,56
2	1,52	1,86	0,93	1,38	1,74	1,91	1,16	1,81
3	1,28	1,36	1,61	1,09	1,81	2,27	1,79	1,53
4	1,95	1,82	1,33	1,67	1,56	1,75	1,56	1,80
5	0,95	1,48	1,81	1,08	1,50	2,07	1,53	1,78
6	1,59	1,95	1,26	1,70	1,47	1,56	1,68	1,80
7	1,74	1,40	1,16	1,27	1,54	2,24	1,42	1,47
Média (mm)	1,49		1,38		1,75		1,59	

Tabela K.4 – Valores de penetração de cloretos do traço VD30.

Penetração de cloretos - VD30 (mm)								
Medida	CP1		CP2		CP3		CP4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1,51	1,39	2,00	1,47	1,08	1,29	1,65	1,28
2	2,26	1,34	1,77	1,20	1,35	1,45	2,20	1,04
3	2,10	1,39	1,40	1,26	1,78	1,08	1,91	1,84
4	1,79	1,02	1,06	1,35	0,75	0,84	2,14	1,91
5	2,40	2,59	1,03	0,96	0,87	1,16	1,31	1,30
6	1,81	1,92	2,02	0,68	1,13	1,12	1,69	2,02
7	1,17	1,51	1,55	0,85	1,14	1,09	1,44	1,23
Média (mm)	1,73		1,33		1,15		1,64	

Tabela K.5 – Valores de penetração de cloretos do traço VD50.

Penetração de cloretos - VD50 (mm)								
Medida	CP1		CP2		CP3		CP4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1,66	1,65	1,23	1,80	1,49	1,54	1,69	2,41
2	1,74	1,54	1,84	1,72	1,47	1,35	1,28	1,74
3	1,74	1,91	1,08	1,85	1,76	1,75	1,67	1,54
4	1,26	1,29	1,28	1,58	1,86	1,61	1,59	1,66
5	1,99	1,26	1,52	1,67	1,99	1,73	1,66	1,69
6	1,60	1,60	1,22	1,87	1,73	1,53	1,89	1,52
7	1,55	1,02	1,59	1,75	1,62	1,76	2,40	1,54
Média (mm)	1,56		1,57		1,66		1,73	

DIFUSÃO DE CLORETOS - Frente de penetração de cloretos**ANÁLISE AOS 28 DIAS**

Na Tabela K.6 apresentam-se os valores médios da frente de penetração de cloretos dos compósitos cimentícios obtidos durante o ensaio.

Tabela K.6 – Média dos valores da frente de penetração de cloretos dos compósitos cimentícios

Nº CP	Frente de penetração de cloretos (mm)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	1,142	1,263	1,491	1,729	1,558
2	1,087	1,200	1,375	1,329	1,571
3	1,294	1,108	1,750	1,152	1,656
4	1,156	0,985	1,592	1,640	1,734

Na Tabela K.7 são apresentados os valores estatísticos descritivos da frente de penetração de cloretos dos compósitos cimentícios.

Tabela K.7 – Valores estatísticos descritivos da frente de penetração de cloretos dos compósitos cimentícios.

Grupo	Contagem	Soma (mm)	Média (mm)	Variância (mm) ²
REF	4	4,68	1,17	7,76E-03
VD10	4	4,56	1,14	1,46E-02
VD20	4	6,21	1,55	2,53E-02
VD30	4	5,85	1,46	7,22E-02
VD50	4	6,52	1,63	6,74E-03

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela K.8.

Tabela K. 8 – ANOVA para os valores da frente de penetração de cloretos dos compósitos cimentícios.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,02E-01	4	2,01E-01	7,92	1,22E-03	3,06
Dentro dos grupos	3,80E-01	15	2,53E-02			
Total	1,18E+00	19		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela K.9.

Tabela K.9 – Teste de Tukey para os valores da frente de penetração de cloretos dos compósitos cimentícios.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	SIM	NÃO	SIM
VD10			SIM	NÃO	SIM
VD20				NÃO	NÃO
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

DIFUSÃO DE CLORETOS - Coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário **ANÁLISE AOS 28 DIAS**

Na Tabela K.10 apresentam-se os valores dos coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios de difusão de cloretos.

Tabela K.10 – Valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios.

Nº CP	Coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário ($10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	0,190	0,217	0,134	0,320	0,321
2	0,178	0,204	0,122	0,232	0,325
3	0,222	0,184	0,163	0,193	0,347
4	0,193	0,158	0,146	0,300	0,367

Na Tabela K.11 são apresentados os valores estatísticos descritivos dos coeficientes de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios.

Tabela K.11 – Valores estatísticos descritivos do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios.

Grupo	Contagem	Soma ($10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$)	Média ($10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$)	Variância ($10^{-12}\text{m}^2/\text{s})^2$
REF	4	0,783	0,196	3,55E-04
VD10	4	0,763	0,191	6,69E-04
VD20	4	0,565	0,141	3,15E-04
VD30	4	1,046	0,261	3,49E-03
VD50	4	1,361	0,340	4,56E-04

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela K.12.

Tabela K.12 – ANOVA para os valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,46E-02	4	2,36E-02	22,35	3,55E-06	3,06
Dentro dos grupos	1,59E-02	15	1,06E-03			
Total	1,10E-01	19		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela K.13.

Tabela K.13 – Teste de Tukey para os valores do coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário dos compósitos cimentícios.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	NÃO	SIM
VD10			NÃO	NÃO	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

APÊNDICE L

No Apêndice L são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **RESISTIVIDADE ELÉTRICA**

ANÁLISE AOS 7 DIAS

Na Tabela L.1 apresentam-se os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios aos 7 dias de idade.

Tabela L.1 – Valores da resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade.

Nº CP	Resistividade - 7 dias (kΩ.cm)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	23,02	21,72	18,64	16,47	11,36
2	22,64	21,82	18,82	16,30	11,31
3	22,75	21,62	18,93	16,35	11,46

Na Tabela L.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios.

Tabela L.2 – Valores estatísticos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (kΩ.cm)	Média (kΩ.cm)	Variância (kΩ.cm) ²
REF	3	68,41	22,80	3,84E-02
VD10	3	65,16	21,72	9,66E-03
VD20	3	56,40	18,80	2,21E-02
VD30	3	49,12	16,37	7,30E-03
VD50	3	34,12	11,37	5,65E-03

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela L.3.

Tabela L.3 – ANOVA para os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 7 dias de idade

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	251,60	4	62,90	3786,35	7,50E-16	3,48
Dentro dos grupos	0,17	10	0,02			
Total	251,76	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela L.4.

Tabela L.4 – Teste de Tukey para os valores da resistividade dos compósitos cimentícios aos 7 dias.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		SIM	SIM	SIM	SIM
VD10			SIM	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 28 DIAS

Na Tabela L.5 apresentam-se os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios aos 28 dias de idade.

Tabela L.5 – Valores da resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Nº CP	Resistividade - 28 dias (kΩ.cm)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	162,71	168,42	171,43	128,00	112,94
2	162,71	162,71	174,55	126,32	111,63
3	165,52	165,52	174,55	118,52	112,94

Na Tabela L.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Tabela L.6 – Valores estatísticos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (kΩ.cm)	Média (kΩ.cm)	Variância (kΩ.cm) ²
REF	3	490,94	163,65	2,62E+00
VD10	3	496,65	165,55	8,15E+00
VD20	3	520,52	173,51	3,24E+00
VD30	3	372,83	124,28	2,56E+01
VD50	3	337,51	112,50	5,75E-01

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela L.7.

Tabela L.7 – ANOVA para os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	9078,29	4	2269,57	282,46	3,10E-10	3,48
Dentro dos grupos	80,35	10	8,03			
Total	9158,64	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela L.8.

Tabela L.8 – Teste de Tukey para os valores da resistividade dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	SIM	SIM	SIM
VD10			SIM	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 91 DIAS

Na Tabela L.9 apresentam-se os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios aos 91 dias de idade.

Tabela L.9 – Valores da resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Nº CP	Resistividade - 91 dias (kΩ.cm)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	246,15	290,91	300,00	252,63	177,78
2	259,46	282,35	282,35	252,63	195,92
3	266,67	300,00	282,35	252,63	195,92

Na Tabela L.10 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Tabela L.10 – Valores estatísticos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (kΩ.cm)	Média (kΩ.cm)	Variância (kΩ.cm) ²
REF	3	772,28	257,43	1,08E+02
VD10	3	873,26	291,09	7,79E+01
VD20	3	864,71	288,24	1,04E+02
VD30	3	757,89	252,63	0,00E+00
VD50	3	569,61	189,87	1,10E+02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela L.11.

Tabela L.11 – ANOVA para os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	19969,45	4	4992,36	62,46	4,90E-07	3,48
Dentro dos grupos	799,34	10	79,93			
Total	20768,79	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela L.12.

Tabela L.12 – Teste de Tukey para os valores da resistividade dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		SIM	SIM	NÃO	SIM
VD10			NÃO	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 180 DIAS

Na Tabela L.13 apresentam-se os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios aos 180 dias de idade.

Tabela L.13 – Valores da resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Nº CP	Resistividade - 180 dias (kΩ.cm)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	417,39	320,00	259,46	266,67	218,18
2	355,56	300,00	252,63	259,46	246,15
3	384,00	266,67	252,63	246,15	208,70

Na Tabela L.14 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Tabela L.14 – Valores estatísticos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (kΩ.cm)	Média (kΩ.cm)	Variância (kΩ.cm) ²
REF	3	1156,95	385,65	9,58E+02
VD10	3	886,67	295,56	7,26E+02
VD20	3	764,72	254,91	1,55E+01
VD30	3	772,28	257,43	1,08E+02
VD50	3	673,03	224,34	3,79E+02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela L.15.

Tabela L.15 – ANOVA para os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	46729,57	4	11682,39	26,71	2,56E-05	3,48
Dentro dos grupos	4373,94	10	437,39			
Total	51103,51	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela L.16.

Tabela L.16 – Teste de Tukey para os valores da resistividade dos compósitos cimentícios aos 180 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		SIM	SIM	SIM	SIM
VD10			NÃO	NÃO	SIM
VD20				NÃO	NÃO
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE AOS 230 DIAS

Na Tabela L.17 apresentam-se os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios aos 230 dias de idade.

Tabela L.17 – Valores da resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 230 dias de idade.

Nº CP	Resistividade -230 dias (kΩ.cm)				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	331,03	300,00	320,00	300,00	208,70
2	331,03	320,00	300,00	274,29	213,33
3	331,03	309,68	300,00	274,29	204,26

Na Tabela L.18 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 230 dias de idade.

Tabela L.18 – Valores estatísticos de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 230 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (kΩ.cm)	Média (kΩ.cm)	Variância (kΩ.cm) ²
REF	3	993,10	331,03	0,00E+00
VD10	3	929,68	309,89	1,00E+02
VD20	3	920,00	306,67	1,33E+02
VD30	3	848,57	282,86	2,20E+02
VD50	3	626,28	208,76	2,06E+01

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela L.19.

Tabela L.19 – ANOVA para os valores de resistividade elétrica dos compósitos cimentícios aos 230 dias de idade.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	26954,30	4	6738,57	71,02	2,65E-07	3,48
Dentro dos grupos	948,76	10	94,88			
Total	27903,06	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela L.20.

Tabela L.20 – Teste de Tukey para os valores da resistividade dos compósitos cimentícios aos 230 dias de idade.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	SIM	SIM
VD10			NÃO	SIM	SIM
VD20				NÃO	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

APÊNDICE M

No Apêndice M são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA OS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

ANÁLISE DE pH

Na Tabela M.1 apresentam-se os valores de pH dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios.

Tabela M.1 – Ensaio de pH para compósitos cimentícios.

Nº CP	pH - Compósitos cimentícios				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	12,42	12,59	12,31	12,47	12,15
2	12,48	12,66	12,42	12,53	12,30
3	12,31	12,49	12,24	12,36	12,11

Na Tabela M.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos de pH dos compósitos cimentícios.

Tabela M.2 – Valores estatísticos descritivos do pH dos compósitos cimentícios.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REF	3	37,21	12,40	7,43E-03
VD10	3	37,74	12,58	7,30E-03
VD20	3	36,97	12,32	8,23E-03
VD30	3	37,36	12,45	7,43E-03
VD50	3	36,56	12,19	1,00E-02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de pH dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela M.3.

Tabela M.3 – ANOVA para os valores do pH dos compósitos cimentícios.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,26	4	0,06	7,98	3,71E-03	3,48
Dentro dos grupos	0,08	10	0,01			
Total	0,34	14			Conclusão: Rejeitar H_0	

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela M.4.

Tabela M.4 – Teste de Tukey para os valores de pH dos compósitos cimentícios.

Análise estatística - pH - Compósitos cimentícios					
Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
VD10			SIM	NÃO	SIM
VD20				NÃO	NÃO
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Na Tabela M.5 apresentam-se os valores de condutividade elétrica dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios.

Tabela M.5 – Valores de condutividade elétrica dos compósitos cimentícios.

Nº CP	Condutividade (mS/cm) - Compósitos cimentícios				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	5,35	8,14	4,26	6,09	3,59
2	5,22	8,04	4,15	5,86	3,31
3	5,04	7,87	3,98	5,13	3,04

Na Tabela M.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos de condutividade elétrica dos compósitos cimentícios.

Tabela M.6 – Valores estatísticos descritivos de condutividade elétrica dos compósitos cimentícios.

Grupo	Contagem	Soma (mS/cm)	Média (mS/cm)	Variância (mS/cm) ²
REF	3	15,61	5,20	2,42E-02
VD10	3	24,05	8,02	1,86E-02
VD20	3	12,39	4,13	1,99E-02
VD30	3	17,08	5,69	2,51E-01
VD50	3	9,94	3,31	7,56E-02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de condutividade elétrica dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela M.7.

Tabela M.7 – ANOVA para os valores de condutividade elétrica dos compósitos cimentícios.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	38,57	4	9,64	123,73	1,80E-08	3,48
Dentro dos grupos	0,78	10	0,08			
Total	39,35	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela M.8.

Tabela M.8 – Teste de Tukey para os valores de condutividade elétrica dos compósitos cimentícios.

Análise estatística - Condutividade - Compósitos cimentícios					
Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		SIM	SIM	NÃO	SIM
VD10			SIM	SIM	SIM
VD20				SIM	SIM
VD30					SIM

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

APÊNDICE N

No Apêndice N são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA para **pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA AS SOLUÇÕES DE ÁGUA NOS POROS**

ANÁLISE DE pH

Na Tabela N.1 apresentam-se os valores de pH para as soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios.

Tabela N.1 – Valores de pH para soluções de água nos poros.

Nº CP	pH - Soluções de água nos poros				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	12,30	12,28	12,21	12,16	12,14
2	12,43	12,43	12,43	12,39	12,37
3	12,48	12,47	12,46	12,43	12,38

Na Tabela N.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos de pH para as soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios.

Tabela N.2 – Valores estatísticos descritivos do pH para soluções de água nos poros.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REF	3	37,21	12,40	8,63E-03
VD10	3	37,18	12,39	1,00E-02
VD20	3	37,10	12,37	1,86E-02
VD30	3	36,98	12,33	2,12E-02
VD50	3	36,89	12,30	1,84E-02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de pH para soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela N.3.

Tabela N.3 – ANOVA para os valores do pH para soluções de água nos poros.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,02	4	0,01	0,40	8,07E-01	3,48
Dentro dos grupos	0,15	10	0,02			
Total	0,18	14		Conclusão: Aceitar H_0		

Obs.: Não foi necessário fazer o teste de Tukey, pois $F \text{ calculado} < F \text{ crítico}$.

A partir dos dados da ANOVA dos resultados do pH para soluções de água nos poros, chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve aceitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, não há diferença significativa em relação as médias das populações.

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Na Tabela N.4 apresentam-se os valores de condutividade elétrica para soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios obtidos nos ensaios.

Tabela N.4 – Valores de condutividade elétrica das soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios.

Nº CP	Condutividade (mS/cm) - Soluções de água nos poros				
	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
1	8,67	7,66	6,36	6,99	5,56
2	8,12	7,22	7,18	6,86	5,63
3	7,64	7,84	7,00	5,69	6,08

Na Tabela N.5 são apresentados os valores estatísticos descritivos de condutividade elétrica para soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios.

Tabela N.5 – Valores estatísticos descritivos de condutividade elétrica das soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios.

Grupo	Contagem	Soma (mS/cm)	Média (mS/cm)	Variância (mS/cm) ²
REF	3	24,43	8,14	2,66E-01
VD10	3	22,72	7,57	1,02E-01
VD20	3	20,54	6,85	1,86E-01
VD30	3	19,54	6,51	5,13E-01
VD50	3	17,27	5,76	7,96E-02

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de condutividade elétrica para as soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios. O resultado pode ser observado na Tabela N.6.

Tabela N.6 – ANOVA para os valores de condutividade elétrica das soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	10,31	4	2,58	11,25	1,01E-03	3,48
Dentro dos grupos	2,29	10	0,23			
Total	12,60	14			Conclusão: Rejeitar H_0	

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os resultados podem ser observados na Tabela N.7.

Tabela N.7 – Teste de Tukey para os valores de condutividade elétrica das soluções de água nos poros dos compósitos cimentícios.

Amostras	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF		NÃO	SIM	SIM	SIM
VD10			NÃO	NÃO	SIM
VD20				NÃO	NÃO
VD30					NÃO

Obs.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.