

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

EFEITO DO PÓ DE VIDRO NA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO

Taís Oliveira Gonçalves Freitas

São Carlos
2019

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

EFEITO DO PÓ DE VIDRO NA MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO

Taís Oliveira Gonçalves Freitas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

São Carlos
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação


Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Tais Oliveira Gonçalves Freitas, realizada em 06/11/2019:



Prof. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira
UFSCar



Prof. Dra. Nicole Pagan Hasparyk
UFG



Prof. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro
EESC/USP

Aos meus pais, José Mauro e Adriana, por todo amor e dedicação e por sempre acreditarem nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por todas as bênçãos concedidas, pela minha saúde, por me iluminar sendo minha luz e me mostrando o melhor caminho quando eu pensei que já não havia mais solução, obrigada Senhor por ouvir todas as minhas orações!

Aos meus pais por sempre estarem ao meu lado em todas as circunstâncias, por acreditarem em meus sonhos e sonharem comigo, por me darem forças mesmo à distância, por se sacrificarem para que eu tenha a melhor educação, por todo amor, dedicação e paciência! Vocês são o meu maior exemplo de vida, minha maior inspiração, minha maior vontade de ser cada dia uma pessoa melhor! Sem vocês com toda a certeza eu nada seria. Eu os amo muito, minha eterna gratidão a vocês!

À minha orientadora, Prof.^a. Dr.^a. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira, pela orientação, amizade, dedicação, ensinamentos, pela paciência e principalmente pela sensibilidade que têm com cada um de seus orientandos, sua forma de ensinar é uma inspiração para mim, muito obrigada por tudo.

Em nome dos meus irmãos e sobrinhos, agradeço também a toda a minha família que sempre está ao meu lado em todas as fases da minha vida, torcendo e comemorando comigo cada uma das etapas vencidas. Todo o meu amor por vocês.

Agradeço também aos meus amigos que estão sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida me apoiando e me auxiliando. Agradeço também aos amigos que fiz durante o período do mestrado, vocês são demais.

Agradeço às minhas companheiras de apartamento por esses quase dois anos juntas.

Ao Matheus, por todo amor, companheirismo, amizade e paciência durante esse período, você foi imprescindível! Obrigada por tudo.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais e Componentes em especial ao José Roberto, à Silvete e ao Adalberto que foram imprescindíveis no desenvolvimento de todo esse trabalho, mas principalmente pela amizade construída. E aos demais, Mariana, Mariane, Alexandre e Juliana.

À banca da minha qualificação, Prof.^a. Dr.^a. Alessandra Lorenzetti de Castro e Prof.^a. Dr.^a. Nicole Pagan Hasparyk, por toda contribuição e ensinamento durante a minha qualificação.

Ao Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira, por todo ensinamento e por sempre estar disposto a colaborar com a nossa pesquisa abrindo as portas dos seus laboratórios.

Ao Prof. Dr. José Américo Alves Salvador Filho, por todos ensinamento e disposição em nos ajudar.

Agradeço também ao Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian e ao Ricardo Luiz Canato, que disponibilizaram o laboratório de Sistemas Estruturais para que realizássemos todos os ensaios mecânicos.

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.

Em nome do químico Fabiano Ferreira Chotoli, agradeço ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo por se disponibilizarem em realizar alguns dos ensaios deste trabalho.

Agradeço ao Antônio Luiz Quinelato coordenador do LAPOC, 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.

Em nome 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.

E a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

“A lei da mente é implacável. O que você pensa, você cria. O que você sente, você atrai. O que você acredita, torna-se realidade”

(BUDA)

RESUMO

FREITAS, TAÍS O. G. **Efeito do pó de vidro na mitigação da reação álcali-sílica de compósitos cimentícios de alto desempenho**. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

Há alguns anos pesquisas vem abordando a substituição de parte do cimento utilizado em concretos e argamassas por materiais alternativos como o pó de vidro moído. Essa alternativa reduz a emissão de CO_2 , já que é utilizada uma parcela menor de cimento. Para que essa substituição seja considerada viável e aplicável no mercado, deve-se analisar diversos fatores e possíveis problemas que esta incorporação pode acarretar. Um dos problemas que pode comprometer a durabilidade do concreto é a reação álcali-agregado. Essa reação causa expansão e fissuração dos elementos de concreto, pela reação química entre o agregado reativo, íons alcalinos do concreto e íons hidroxila, na presença de umidade. Assim, este trabalho tem o objetivo de avaliar o efeito da incorporação de pó de vidro moído em compósitos cimentícios na reação álcali-agregado. Foram confeccionados compósitos cimentícios com cimento CPV, sílica ativa, aditivos, areia com dimensão máxima de 1,2 mm, água (relação água/cimento de 0,18) e incorporação de pó de vidro nos teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 50% em substituição volumétrica ao cimento. Foram realizados ensaios para a caracterização dos compósitos cimentícios, resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade estático e dinâmico. Foram realizados ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado com o objetivo de avaliar a mitigação das expansões. Os resultados mostram que a incorporação de pó de vidro não interferiu na trabalhabilidade da mistura, além de ter reduzido o teor de ar incorporado na mistura. Observou-se uma melhoria de propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios a partir dos 28 dias, como por exemplo, uma diminuição na absorção de água por capilaridade. Avaliando a resistência à compressão axial, obteve-se o maior valor para o compósito com incorporação de 30% de pó de vidro em 129,03 MPa e módulos de elasticidade altos, na ordem de 45 a 50 GPa, características do concreto de alto desempenho. Em relação aos resultados encontrados para os compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro, estes alcançaram valores próximos aos do material de referência. Já para os ensaios específicos de reação álcali-sílica, nota-se que os teores de 10 e 20% de incorporação de pó de vidro aumentaram as expansões nas barras de argamassa estudadas e os teores de 30 e 50% diminuíram as expansões, chegando a variações dimensionais próximas de 0%. Portanto, o comportamento frente à reação álcali-sílica variou de acordo com o teor de pó de vidro das misturas. Foi possível constatar que 30 e 50% de incorporação são os teores ótimos de substituição em relação à reação álcali-sílica.

Palavras-chave: Compósito cimentício; reação álcali-sílica; pó de vidro; mitigação.

ABSTRACT

FREITAS, TAÍS O. G. Effect of glass powder on the mitigation of alkali-silica reaction of high performance cementitious composites. 151p. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Federal University of São Carlos. São Carlos, 2019.

For some years researches has been addressing the replacement of part of the cement used in concrete and mortars with alternative materials such as ground glass powder. This alternative reduces CO_2 , emissions since it's used a smaller portion of concrete. In order for this substitution to be considered viable and applicable on the market, several factors and possible problems that this incorporation may result should be examined. One of the problems that can compromise the durability of concrete is the Alkali-Aggregate Reaction. This reaction causes expansion and fissure of concrete elements, by the chemical reaction between the reactive aggregate, alkaline concrete ions and hydroxyl ions, in the presence of moisture. So, this work aims to evaluate the effect of the incorporation of ground glass powder into cemented composites in the Alkali-Aggregate Reaction. Cementitious composites were made with CPV cement, active silica, additives, sand with a maximum dimension of 1.2 mm, water (water/cement ratio of 0.18) and incorporation of glass powder in the contents of 0%,10%,20%,30% and 50% in volumetric replacement to cement. Tests were performed to characterize cementitious composites, axial compression resistance, capillarity water absorption, tensile strength by diametric compression, tensile strength in flexion, static elasticity module and dynamic. Expansion tests were performed in mortar bars by the accelerated method in order to evaluate the mitigation of expansions. The results show that the incorporation of glass powder did not interfere in the workability of the mixture in the fresh state, and reduced the air content incorporated into the mixture. There was an improvement in the mechanical and physical properties of cementitious composites from 28 days, such as a decrease in water absorption by capillarity and resistance to axial compression, obtaining the highest value for composite with 30% of glass powder in 129.03 MPa and high elasticity modules, in order of 45 to 50 GPa, characteristics of high performance concrete. Concerning the results found for cementitious composites with incorporation of glass powder, they reached values close to those of the reference material. Already for the specific tests of Alkali-Silica Reaction, it is noted that the contents of 10 and 20% of glass powder incorporation increased expansions in the mortar bars studied and the contents of 30 and 50% decreased to expansions, reaching dimensional variations close to 0%. Therefore, the behavior in the face of the Alkali-Silica Reaction varied according to the glass powder content of the mixtures. It was found that 30 and 50% of incorporation are the optimal substitution levels in relation to the alkali-silica reaction.

Keywords: Cement composite; alkali-silica reaction; glass powder; mitigation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	21
1.1.1 Geral	21
1.1.2 Específicos	22
1.2 JUSTIFICATIVA	22
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	27
2.1.1 Tipos de reação álcali-agregado	29
2.1.2 Mecanismo de formação da RAA	30
2.1.3 Medidas de mitigação da expansão devida a RAA	32
2.2 VIDRO	33
2.2.1 Histórico da utilização do vidro	33
2.2.2 Tipos de vidro e sua composição química	34
2.2.3 Pozolanicidade e RAA	36
2.3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	38
2.3.1 Cimento Portland	40
2.3.2 Sílica ativa	40
2.3.3 Agregados	42
2.3.4 Relação água/aglomerante	42
2.3.5 Aditivos	43
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	45
3.1.1 Cimento	47
3.1.2 Cimento padrão	48
3.1.3 Sílica ativa	48
3.1.4 Pó de vidro	48
3.1.5 Agregado miúdo	51
3.1.6 Aditivos	52
3.2 ESTUDOS EM PASTA	52
3.2.1 Miniabatimento	52
3.2.2 Tempo de pega	53
3.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	55
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	59
3.4.1 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado	60
3.4.2 Determinação da absorção de água por capilaridade	60
3.4.3 Propriedades mecânicas	61
3.4.4 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico	62
3.4.5 Determinação do módulo de elasticidade estático	63
3.5 ENSAIOS DE REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA	64

3.5.1	Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado	64
3.5.2	Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado	66
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	68
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	70
4.1.1	Cimento CP V e cimento padrão	70
4.1.2	Sílica ativa	73
4.1.3	Pó de vidro	74
4.1.4	Morfologia dos aglomerantes	77
4.1.5	Granulometria dos aglomerantes	77
4.1.6	Agregado miúdo	79
4.1.7	Aditivos	81
4.2	ESTUDOS EM PASTA	81
4.2.1	Miniabatimento	81
4.2.2	Tempo de pega	84
4.3	DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS	85
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	86
4.4.1	Densidade de massa e teor de ar incorporado	86
4.4.2	Absorção de água por capilaridade	87
4.4.3	Resistência à compressão axial	89
4.4.4	Resistência à tração por compressão diametral	92
4.4.5	Resistência à tração por flexão	94
4.4.6	Módulo de elasticidade dinâmico e estático	96
4.4.7	Expansão das barras de argamassa	97
4.4.8	Mitigação da expansão da barras de argamassa	99
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
5.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		111
APÊNDICES		120
APÊNDICE A – GRANULOMETRIAS DOS AGLOMERANTES		121
APÊNDICE B – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE		123
ANEXO C - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL		133
APÊNDICE D – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL		138
APÊNDICE E – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO		141
APÊNDICE F – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO		143
APÊNDICE G – REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA		146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 a) e b) Estruturas afetadas pela RAA na UHE Jaguari - SP.....	27
Figura 2.2 - Principais componentes desencadeadores da RAA.	28
Figura 2.3 - Estrutura básica dos silicatos.....	30
Figura 2.4 a) Representação 2D da estrutura atômica do quartzo. b) Mecanismo de formação. c) Formação do gel da RAA.	32
Figura 2.5 – Composição química geral do vidro	35
Figura 2.6 - Ensaio de expansão em barras.....	37
Figura 2.7 – Gráfico de expansão de RAA.....	38
Figura 2.8 – Resistência à compressão de concretos convencionais em função da relação a/c.....	42
Figura 3.1 Esquematisação do programa experimental	45
Figura 3.2 - Ensaio de caracterização dos materiais.....	46
Figura 3.3 a) Preparação da amostra para o ensaio de granulometria. 3.3 b) Aparelhagem para a realização do ensaio de granulometria.	47
Figura 3.4 a) Lavagem e retirada dos rótulos das garrafas; b) Secagem ao ar das garrafas; c) Quebra das garrafas em cacos em uma betoneira com bolas de aço; d) Moagem final em moinho de bolas; e) Produto final obtido da moagem.....	49
Figura 3.5 - Moinho descarregando o pó de vidro.....	49
Figura 3.6 - Peneirador mecânico utilizado no peneiramento do pó de vidro.....	50
Figura 3.7 a) Realização do ensaio do miniabatimento. b) Medição de dois diâmetros da pasta.	53
Figura 3.8 - Determinação do índice de consistência da pasta referência.	54
Figura 3.9 a) Realização do espalhamento (Flow table). b) Medição de dois diâmetros para espalhamento.	56
Figura 3.10 - Procedimento de mistura REF-SA.	57
Figura 3.11 - Procedimento de mistura dos compósitos com incorporação de pó de vidro.	57
Figura 3.12 a) Argamassadeira utilizada no procedimento de mistura dos materiais. b) Argamassadeira durante ensaio.	58
Figura 3.13 - Corpos de prova em câmara úmida.....	58
Figura 3.14 a) Procedimento de ensaio de determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. b) Pesagem da amostra.....	60
Figura 3.15 a) Corpos de prova em estufa até constância de massa. b) Corpos de prova em recipientes com água no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	61
Figura 3.16 a) Retífica dos corpos de prova. b) Corpo de prova sendo ensaiado à compressão axial.	61
Figura 3.17 Modos de ruptura à compressão axial.	62
Figura 3.18 - Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.	63
Figura 3.19 - Ensaio de Módulo de Elasticidade Estático.	63
Figura 3.20 a) Barras de argamassa em recipiente; b) Recipientes em estufa ventilada.....	65
Figura 3.21 a) Preparo da solução de NaOH; b) Recipientes com água e com NaOH.	65
Figura 3.22 a) – Retirada do excesso de solução; b) Leitura da barra.....	66
Figura 3.23 -Barra de argamassa fixada no comparador de comprimento.	68
Figura 4.1 - Difratoograma da amostra de Cimento Portland CPV ARI.....	72
Figura 4.2 - Difratoograma da amostra de sílica ativa utilizada.....	74

Figura 4.3 - Difratoograma da amostra do pó de vidro utilizado.....	75
Figura 4.4 – Micrografia dos aglomerantes	77
Figura 4.5 – Curvas de distribuição granulométrica dos aglomerantes.....	78
Figura 4.6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.	80
Figura 4.7 – Área de espalhamento do compósito referência com diferentes teores de SP.	82
Figura 4.8 – Área de espalhamento da pasta de referência e com incorporação de pó de vidro com 2,25% de superplastificante.....	83
Figura 4.9 - Determinação dos tempos de início e fim de pega.	84
Figura 4.10 - Gráfico com os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.	86
Figura 4.11 – 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.....	89
Figura 4.12 - Comparação dos resultados à compressão axial dos compósitos cimentícios.	90
Figura 4.13 - Resultados de tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios.	93
Figura 4.14 - Resultados de resistência à tração na flexão.....	95
Figura 4.15 - Tração por compressão diametral e tração por flexão aos 28 dias.....	95
Figura 4.16 - Comparação dos módulo de elasticidade dinâmico e estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias.....	96
Figura 4.17 – Comparativo das expansões médias entre os cimentos CP V e Padrão.	98
Figura 4.18 – Comportamento médio das expansões com cimento padrão e vidro como adição além da sílica ativa.	100
Figura 4.19 – Barras de argamassa de Cimento Padrão + VD10.	101
Figura 4.20 – Barras de argamassa de Cimento Padrão + VD20.	101
Figura 4.21 – Comparação da expansão das barras de argamassa do material referência e das misturas ternárias.	103
Figura 4.22 – Comparação dos módulos de elasticidade dinâmicos das barras de argamassa do material referência e das misturas ternárias com cura imersa em $Ca(OH)_2$ e em cura agressiva de $NaOH$	106
Figura 4.23 – a) Micrografia das barras de REF-SA aos 30 dias submetidas à cura agressiva. b) Micrografia das barras de VD20 aos 30 dias submetidas à cura agressiva. c) Micrografia das barras de VD50 aos 30 dias submetidas à cura agressiva.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Estatísticas globais anuais da produção de cimento (em milhões de toneladas).....	23
Tabela 1.2 – Produção de cimento no Brasil (em toneladas).....	23
Tabela 2.1 – Composição e características de alguns vidros comerciais comuns. ...	34
Tabela 2.2 - Composição química dos vidros por cor (em %).	35
Tabela 2.3 - Tipo de liga e porcentagem de SiO_2	41
Tabela 3.1 - Detalhamento da moagem do pó de vidro.	50
Tabela 3.2 - Dados do peneiramento do pó de vidro.	51
Tabela 3.3 – Condições do ensaio de tempo de início e fim de pega.	54
Tabela 3.4 – Nomenclatura adotada para os traços estudados.	55
Tabela 3.5 – Consumo de materiais em kg/m^3	56
Tabela 3.6 - Ensaio realizados em compósitos cimentícios.	59
Tabela 3.7 – Nomenclatura adotada para cada traço estudado - expansão	64
Tabela 3.8 – Frações de agregado miúdo utilizadas neste estudo.	64
Tabela 3.9 – Nomenclatura adotada para cada traço estudado – mitigação da expansão.....	67
Tabela 4.1 - Características físicas do cimento CP V e do cimento padrão.	70
Tabela 4.2 - Características químicas do cimento CP V e do cimento padrão.....	71
Tabela 4.3 - Propriedades físicas e químicas da sílica ativa.	73
Tabela 4.4 - Composição química da sílica ativa.	73
Tabela 4.5 - Composição química do pó de vidro.	74
Tabela 4.6 - Índice de atividade pozolânica do pó de vidro.....	76
Tabela 4.7 – Ensaio de Chapelle modificado	77
Tabela 4.8 – Caracterização física do agregado miúdo.	79
Tabela 4.9 - Composição química do agregado miúdo.	79
Tabela 4.10 - Composição granulométrica do agregado utilizado.....	80
Tabela 4.11 – Propriedades do aditivo superplastificante de base de policarboxilato.	81
Tabela 4.12 - Propriedades do ativo redutor de retração.	81
Tabela 4.13 – Áreas de espalhamento com diferentes teores de SP.....	82
Tabela 4.14 - Miniabatimento dos traços com 2,25% de SP.....	83
Tabela 4.15 - Traço unitário e índice de consistência.	85
Tabela 4.16 - Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.	86
Tabela 4.17 – Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 7, 28 e 180 dias.....	87
Tabela 4.18 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 2, 7, 28 e 180 dias.....	90
Tabela 4.19 – Eficiência do consumo de cimento e aglomerantes em relação à resistência à compressão dos compósitos cimentícios aos 28 dias.....	92
Tabela 4.20 - Resistência à tração por compressão diametral dos compósitos com 28 e 180 dias de idade.	93
Tabela 4.21 - Resultados de resistência à tração por flexão.....	94
Tabela 4.22 – Módulos de elasticidade dinâmico e estático aos 28 dias de idade....	96
Tabela 4.23 – Variações dimensionais das barras de argamassa de referência submetidas à cura agressiva de $NaOH$	97
Tabela 4.24 – Variações dimensionais das barras de argamassa de cimento padrão com sílica e cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.	99

Tabela 4.25 – Mitigação da reação álcali-sílica de acordo com a ABNT NBR 15577-5 (ABNT, 2018) das barras de argamassa com cimento padrão com sílica e cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.....	102
Tabela 4.26 – Variações dimensionais das barras de argamassa do traço referência e das misturas com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.....	102
Tabela 4.27 – Mitigação da reação álcali-sílica de acordo com a ABNT NBR 15577-5 (2018) das barras de argamassa do traço referência e das misturas com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.....	104
Tabela 4.28 - Resultado do módulo de elasticidade dinâmico das barras de argamassa do traço referência e das misturas com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.....	105
Tabela 4.29 - Comparação dos módulos de elasticidade dinâmicos nos compósitos cimentícios sem e com cura agressiva ao fim do ensaio.	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1-0-50	Cimento CPV + 50% de vidro em substituição volumétrica ao cimento + água
1-8-50	Cimento CPV + 8% em massa de sílica ativa + 50% de vidro em substituição volumétrica ao cimento + água
a/agl	Relação água/aglomerante
a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Concreto de alto desempenho
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
Cim. P.	Cimento padrão + agregado miúdo + água
1-8-0	Cimento CPV + 8% em massa de sílica ativa + água
1-0-0	Cimento CPV + água
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CP	Corpo de prova
CP I	Cimento Portland comum
CP II	Cimento Portland composto
CP III	Cimento Portland de alto-forno
CP IV	Cimento Portland pozolânico
CPR	Concreto de pós reativos
CP V	Cimento Portland de alta resistência inicial
CPV	CPV + agregado miúdo + água
DRX	Difratometria de raios-X
FRX	Fluorescência de raios-X
IFSC	Instituto de Física de São Paulo
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LAPOC	Laboratório de Poços de Caldas
LE-EESC	Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos
LMC	Laboratório de Materiais e Componentes
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil

LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NR	Norma regulamentadora
RAA	Reação álcali-agregado
RAC	Reação álcali-carbonato
RAS	Reação álcali-sílica
REF-SA	Traço referência com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante, 0% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl: 0,194)
RR	Redutor de retração
S/A	Sociedade anônima
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SP	Aditivo superplastificante
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UHE	Usina Hidrelétrica
USP	Universidade de São Paulo
V1	Velocidade baixa
V2	Velocidade alta
VD10	Traço com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante e substituição volumétrica do cimento por 10% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl: 0,194)
VD20	Traço com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante e substituição volumétrica do cimento por 20% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl: 0,194)
VD30	Traço com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante e substituição volumétrica do cimento por 30% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl: 0,194)
VD50	Traço com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante e substituição volumétrica do cimento por 50% de pó de vidro,

agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água
(a/agl: 0,194).

WBCSD

World Bussiness Council for Sustainable Development

1. INTRODUÇÃO

Durante a produção do cimento é gerada uma grande quantidade de CO₂, gás nocivo à saúde e ao meio ambiente. Segundo o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2009), as usinas de cimento são responsáveis por gerar cerca de 5% do total das emissões de CO₂ no mundo. Como o cimento é um produto que não pode ser reciclado, para cada nova construção é utilizado um novo cimento. Segundo Quéré *et al* (2018), no relatório global de carbono, as emissões globais de dióxido de carbono no ano de 2018 apontaram para um recorde de 2,7% a mais de emissões do principal gás do aquecimento global do que no ano de 2017, cerca de 37,1 bilhões de toneladas.

A incorporação de materiais suplementares no concreto, em substituição parcial ao cimento, vem sendo estudada por muitos pesquisadores, e se mostra uma alternativa sustentável para a indústria da construção civil, que é uma indústria de importância tanto para o meio ambiente quanto para a economia de um país.

Existem muitas pesquisas sobre materiais alternativos incorporados ao concreto: cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno, entre outros (LEE *et al.*, 2018). A reciclagem de subprodutos industriais reduz ainda mais a exploração de recursos naturais e, ao reduzir o consumo de recursos finitos, não há apenas benefícios ao meio ambiente, mas pode-se ter também a economia de custos, além dos benefícios econômicos reais.

Muitas pesquisas vêm abordando o pó de vidro como material viável na substituição de parte do cimento. No Brasil, o vidro é um produto que é produzido em larga escala e possui um baixo reaproveitamento. De acordo com o CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem, s.d.), o Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro e reutiliza somente 45% destas embalagens. Outro número expressivo é que no Brasil, de acordo com a Ambiental Lenum e o Cempre no Relatório Técnico Acordo Setorial de Embalagens em Geral (2017), em média 2,4% de todos os resíduos urbanos são feitos com vidro.

Alguns estudos como os de Dyer e Dhir (2001), Idir; Cyr e Tagnit-hamou (2010), Serpa *et al.* (2013) Chandra Paul; Šavija e Babafemi (2018), Guo *et al.* (2018) abordam a incorporação do pó de vidro ao cimento em substituição a parte deste e também

sobre a utilização do pó de vidro como agregado miúdo. Dependendo do tamanho das partículas de vidro utilizadas no concreto, e se ele é utilizado como material pozolânico ou como agregado, pode-se observar dois comportamentos antagônicos: reação pozolânica, melhorando as propriedades do concreto; e a reação álcali-agregado, que envolve efeitos negativos.

Uma pesquisa realizada por Afshinnia e Rangaraju (2015) mostrou que o pó de vidro finamente moído, com tamanho da partícula média de 17 a 70 μm e em substituição ao cimento nas proporções de 10 a 20%, apresentou uma capacidade significativa na mitigação da reação álcali-agregado.

Nos estudos sobre a utilização do pó de vidro como agregado, a reação álcali-agregado (RAA) é citada comumente (ZHENG, 2016; IBRAHIM; MEAWAD, 2018; RASHIDIAN-DEZFOULI; AFSHINNIA; RANGARAJU, 2018). Esse fenômeno já foi intensamente estudado devido a sua importância, pois já afetou centenas de estruturas de concreto no mundo todo. No Brasil foi criado um Comitê Técnico de Reação Álcali-agregado (CT-201) do IBRACON, com a participação de cerca de 20 especialistas que criaram o Guia de Prevenção da Reação Álcali – Agregado- Prática Recomendada IBRACON (2018). Esse comitê anteriormente contribuiu para a criação da NBR 15577 (ABNT, 2018), norma que trata sobre essa manifestação patológica. Essa reação causa expansão e fissuração dos elementos de concreto, pela reação química entre o agregado reativo, íons alcalinos do cimento e íons hidroxila.

A reação tem início no ataque dos hidróxidos alcalinos da água contida nos poros das estruturas, aos materiais silicosos dos agregados, e tem como resultado a formação de um gel álcali-silicato nos planos de clivagem, nos poros dos agregados ou nas superfícies das partículas (NEVILLE, 2016).

De acordo com Isaia (2011), devido à formação do gel e, conseqüentemente, à fissuração, o primeiro efeito da RAA é no módulo de elasticidade do material, podendo ser reduzido consideravelmente devido às intensas fissurações; em seqüência as resistências à tração e compressão também são afetadas. O tempo para a ocorrência da reação varia muito e depende de fatores internos (presença de água nos poros) e externos (umidade e temperatura) à estrutura.

As conseqüências da ocorrência da RAA são dispendiosas, devido ao alto custo das tecnologias que envolvem a recuperação, e também ao fato de que em algumas vezes torna-se necessário interditar os locais para a intervenção. Portanto, a

recuperação de estruturas afetadas pela RAA, pode ser muitas vezes considerada inviável.

Neste estudo abordar-se-á os efeitos na reação álcali-sílica (RAS) do pó de vidro moído, em substituição parcial ao cimento. O pó de vidro que será utilizado é o passante na peneira #200, que segundo pesquisas como a de Shao *et al.* (2000), Shi *et al.* (2005) e Soares; Ferreira e Salvador Filho (2018), apresenta atividade pozolânica e pode mitigar a expansão da RAA.

Segundo Zheng (2016), embora a reação do vidro aumente a concentração de álcalis na solução de poros dos compósitos cimentícios, grãos finos de vidro mitigam eficientemente a expansão induzida pela RAS. Este efeito mitigatório segundo o estudo é devido ao aumento da concentração de Al^{3+} na solução de poros, o que reduz a dissolução da sílica reativa do agregado, controlando a reação álcali-sílica, sendo essa reação a grande responsável pela ocorrência das expansões da RAA.

Compósitos cimentícios de alto desempenho com incorporação de pó de vidro, podem atingir resistências elevadas, baixa permeabilidade, bons resultados de durabilidade e sob o viés da sustentabilidade têm-se a substituição de 50% de cimento por pó de vidro sem comprometimento das propriedades físicas e mecânicas desses compósitos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Analisar o efeito da incorporação de pó de vidro passante na peneira de malha 200, com abertura de 75 μ m, nas características de compósitos cimentícios de alto desempenho: estado fresco, estado endurecido e nas propriedades de mitigação da reação álcali-agregado.

1.1.2 ESPECÍFICOS

- Caracterizar o pó de vidro;
- Caracterizar os compósitos cimentícios, verificando as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios com o teor de incorporação de pó de vidro em 10%, 20%, 30% e 50% em substituição volumétrica ao cimento, comparando com o material referência;
- Verificar se o pó de vidro é capaz de mitigar as expansões devido a reação álcali-sílica;
- Verificar se há um teor ótimo de adição do pó de vidro para que este seja efetivo na mitigação das expansões da reação álcali-sílica.

1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização do cimento como principal material na construção civil está associada à alta poluição ambiental em decorrência dos elevados teores de CO_2 gerados na sua produção e ao alto consumo de energia. Considerando as limitações dos recursos de combustíveis fósseis e as rigorosas regulamentações ambientais, alcançar uma produção sustentável de cimento é uma iniciativa fundamental a ser seguida (JOKAR; MOKHTAR, 2018).

Outra necessidade dentro da indústria da construção civil é a de obtenção de estruturas mais duráveis. A degradação muitas vezes precoce das estruturas é um problema mundial e está ligado muitas vezes com a má execução, baixa qualidade de materiais, falta de projeto e manutenção.

A indústria de cimento é responsável pela emissão de 7% do total global de gases do efeito estufa e no Brasil em função de várias políticas implementadas ao longo de anos, esta participação é em torno de 2,6% da média mundial (SNIC, 2019).

De acordo com Hills *et al.* (2016), cerca de 880 kg de CO_2 é gerado por tonelada de clínquer na produção de um cimento comum. Dados apresentados na Tabela 1.1, mostram estatísticas globais anuais de produção de cimento, do ano de 2003 até o ano de 2012.

Tabela 1.1 - Estatísticas globais anuais da produção de cimento (em milhões de toneladas).

País	2003	2005	2007	2009	2011	2012
China	865,2	1079,6	1377,8	1637,1	2100,0	2150,0
Índia	126,7	146,8	172,9	193,1	240,0	250,0
Estados Unidos	92,9	99,4	95,5	71,9	68,6	74,0
Brasil	35,3	39,2	47,2	52,3	64,1	69,0
Irã	30,5	32,6	40,0	56,3	61,0	65,0
Vietnã	24,1	30,8	35,7	48,0	59,0	65,0
Turquia	38,1	45,6	50,8	57,6	63,4	60,0
Federação Russa	41,4	49,5	59,9	47,2	55,6	60,0
Japão	73,8	72,7	71,4	59,6	51,3	52,0
Coréia do Sul	59,7	49,1	54,4	52,2	48,3	49,0
Egito	32,7	38,9	40,1	46,9	44,0	44,0
Arábia Saudita	24,1	26,1	30,3	37,8	48,4	43,0
México	31,8	36,7	39,9	37,1	35,4	36,0
Alemanha	33,6	31,9	33,4	30,4	33,5	34,0
Tailândia	35,6	37,9	43,2	37,7	36,7	33,0
Itália	43,5	46,4	47,5	36,2	33,1	32,0
Paquistão	11,3	15,8	26,3	30,9	32,0	32,0
Indonésia	34,9	36,1	39,9	39,1	30,0	31,0
Espanha	44,8	50,3	54,7	30,6	22,2	20,0
Outros Países	-	-	-	-	470,0	500,0
Total no Mundo	-	-	-	-	3600,0	3700,0

Fonte: Adaptado e traduzido de OH *et al.* (2014).

No ano de 2012, o Brasil encontrava-se em quarto lugar como produtor nas estatísticas anuais globais de produção de cimento. A produção no País e sua evolução até o ano de 2017, pode ser observada na Tabela 1.2, pelos dados obtidos do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2018).

Tabela 1.2 – Produção de cimento no Brasil (em toneladas).

Ano	Total
2012	68.809.299
2013	70.160.775
2014	71.254.045
2015	65.282.970
2016	57.556.901
2017	54.003.893
2018	52.847.636

Fonte: Adaptado SNIC (2019).

Os estudos sobre alternativas para diminuição do uso de recursos finitos na produção de cimento vêm sendo abordadas por diversos autores. Como melhorias na eficiência energética, recuperação de calor residual, redução da relação clínquer/cimento, uso de matérias-primas alternativas, substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas de energia (MIKULČIĆ *et al.*, 2016).

De acordo com Jokar e Mokhtar (2018), a redução da produção de clínquer pela adição de materiais substitutos pode reduzir em mais de 15 milhões de toneladas de emissão de CO_2 até 2034 e tem o maior impacto na redução de emissões de CO_2 , em torno de 11%. Em contraste às outras políticas de mitigação, como uso de combustíveis alternativos que possui impacto de 7% e a recuperação de calor residual que não possui impacto na redução das emissões de CO_2 .

Segundo Krstic e Davalos (2019), a indústria de cimento dos Estados Unidos enfrenta um sério problema devido à escassez e ao alto custo de materiais cimentícios suplementares como a cinza volante e a escória de alto forno. Com o intuito de avaliar o potencial do pó de vidro como material cimentício suplementar os pesquisadores desenvolveram as pesquisas em laboratório, e obtiveram resistência à compressão axial próximo a 50 MPa, e módulo de elasticidade de até 40 GPa com a incorporação de 20% de pó de vidro. No estudo também aplicaram os compósitos cimentícios em calçadas no bairro do Queens, na cidade de Nova York.

A produção em larga escala de pozolana a partir do vidro pode ser muito benéfica para a indústria de reciclagem de vidro, podendo fornecer um material cimentício suplementar alternativo para o concreto, com contribuições significativas para a redução e reutilização de resíduos de vidro como material de construção sustentável com valor agregado. Em uma substituição típica de cimento por 30% de material cimentício suplementar isso representa potencialmente cerca de 1 milhão de toneladas (907.000 toneladas) por ano de pozolana de vidro (redução de 1 milhão de toneladas de CO_2), utilizando 6 bilhões de garrafas de pós-consumo e criando um mercado de 1 bilhão de dólares (KRSTIC; DAVALOS, 2019).

Além de diminuir o impacto ambiental, outra utilidade para o material desenvolvido é seu uso em estruturas que possam vir a ser afetadas pela reação álcali-agregado (RAA). Esse fenômeno da RAA afeta estruturas de grande porte na maioria das vezes, como usinas hidrelétricas, blocos de fundações, pontes e barragens,

acarretando gastos exorbitantes para sua recuperação ou até mesmo interdição temporária ou definitiva, dependendo do estágio do fenômeno.

O assunto já vem sendo abordado por diversos pesquisadores, (CHANDRA PAUL; ŠAVIJA; BABAFEMI, 2018; ELAQRA; RUSTOM, 2018; IBRAHIM; MEAWAD, 2018; MOSABERPANAH; EREN; TARASSOLY, 2018; RASHIDIAN-DEZFOULI; AFSHINNIA; RANGARAJU, 2018; RODIER; SAVASTANO, 2018), mas existem também muitas divergências nos resultados encontrados, que depende muitas vezes se será utilizado como material cimentício suplementar ou agregado, e também do tamanho das partículas, como apontado nos estudos de Dyer e Dhir (2001), Idir; Cyr e Tagnit-hamou (2010), Serpa *et al.* (2013) Chandra Paul; Šavija e Babafemi (2018), Guo *et al.* (2018).

De acordo com Krstic e Davalos (2019) uma norma para pozolana obtida a partir do vidro vêm sendo elaborada nos Estados Unidos, com previsão de aprovação para o ano de 2019. Segundo os autores as futuras aplicações de campo para 2019 incluem um segmento de faixa de ônibus e um projeto de calçada em Manhattan, Nova York.

Para que esse uso seja melhor compreendido, deve-se realizar mais estudos a fim de analisar diversos fatores e possíveis problemas que essa substituição parcial do cimento pelo pó de vidro possa vir acarretar.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, que se encontram organizados conforme a descrição a seguir.

No capítulo um é apresentada uma visão geral do conteúdo abordado, bem como uma introdução, os objetivos e justificativas para o desenvolvimento da pesquisa.

No capítulo dois é apresentada uma revisão da bibliografia, em que foi feito o embasamento teórico da pesquisa, sendo apresentados e discutidos basicamente a reação álcali-agregado, a utilização do pó de vidro como material cimentício suplementar e concretos de alto desempenho.

No terceiro capítulo apresenta-se todo o programa experimental, contemplando-se as metodologias utilizadas para obter os resultados experimentais, detalhamento de quantidades e dimensões dos corpos de prova analisados.

Os resultados obtidos pelo programa experimental são apresentados no quarto capítulo, bem como as análises e discussão dos resultados.

No quinto capítulo são apresentadas as considerações finais e algumas respostas dos questionamentos levantados no decorrer da pesquisa, bem como, sugestões para futuras pesquisas.

Por fim, apresenta-se toda a bibliografia utilizada neste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Os primeiros estudos sobre reação álcali-agregado (RAA) tiveram início em meados de 1940, por Stanton¹, conforme citado por Mehta e Monteiro (2014). De acordo com os autores desde então inúmeros casos de deterioração de estruturas de concreto em todo o mundo começaram a ser relatados e estudados com o intuito de comprovar a ligação destes com a RAA.

Segundo Sbrighi Neto, Quitete e Battagin (2018), estima-se que mais de 500 casos de RAA já foram relatados no meio técnico, envolvendo diversos tipos de estruturas, fora aqueles casos que não tiveram relato.

Na Figura 2.1 a) e b), é possível observar as consequências da RAA na estrutura da Usina Hidrelétrica de Jaguari, São Paulo, onde Salles (2010) realizou um estudo de caso apresentado no 52º Congresso Brasileiro do Concreto.

Figura 2.1 a) e b) Estruturas afetadas pela RAA na UHE Jaguari - SP.

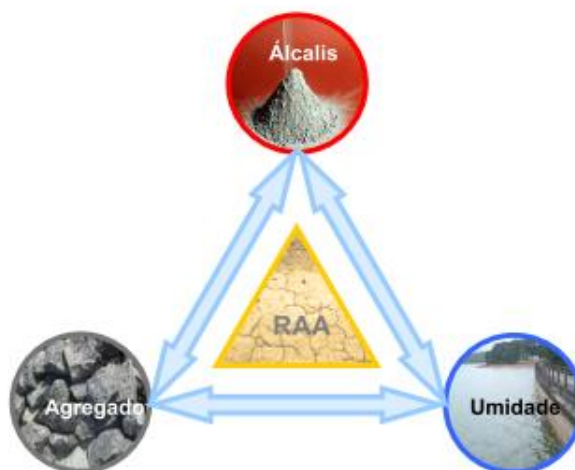


Fonte: Salles (2010).

¹ STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. In: Proceedings of American Society of Civil Engineers. v. 66, n. 10. Dec. 1940, p. 1781- 1811.

A RAA é definida pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018) como sendo uma reação química que ocorre em concretos e argamassas, envolvendo íons hidroxila, agregados reativos e álcalis presentes no cimento, na presença de umidade; a Figura 2.2 apresenta os principais fatores desencadeadores da RAA.

Figura 2.2 - Principais componentes desencadeadores da RAA.



Fonte: Couto (2008).

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que são cinco fatores importantes que influenciam diretamente no fenômeno:

“...(1) o teor de álcalis do cimento e consumo de cimento no concreto; (2) a contribuição do íon alcalino de outras fontes, como aditivos, adições, agregados contaminados com sal, e penetração de água do mar ou solução de sais de degelo no concreto; (3) a quantidade, dimensão e reatividade dos constituintes reativos presentes no agregado; (4) a disponibilidade de umidade para a estrutura de concreto; e (5) a temperatura ambiente.” (MEHTA E MONTEIRO, 2014, p. 175).

O produto da RAA é um gel higroscópico que se expande após a hidratação e pode introduzir fissuras no concreto circundante, reduzindo, assim, as propriedades mecânicas da estrutura, afetando a vida útil e aumentando o custo para a sociedade. O tempo necessário antes que o dano da RAA comece varia de alguns meses a várias décadas, dependendo do tipo do agregado, tipo de ligante e clima de exposição (WIGUM; LINDGARD, 2011).

De acordo com Isaia (2011), devido à formação do gel e, conseqüentemente, à fissuração, o primeiro efeito da RAA é no módulo de elasticidade do material, podendo

ser reduzido consideravelmente devido às intensas fissurações; em sequência, as resistências à tração e à compressão também são afetadas. O tempo para a ocorrência da reação varia muito e depende de fatores internos (presença de água nos poros) e externos (umidade e temperatura) à estrutura. Hasparyk (2011) verificou que o módulo de elasticidade foi a primeira propriedade afetada pela RAA. No entanto, pode-se dizer que as propriedades mecânicas em geral foram afetadas.

Existem dois tipos de RAA, e sua caracterização é dada de acordo com a origem do agregado reativo.

2.1.1 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), existem dois tipos de RAA. As reações álcali-carbonato (RAC) e as reações álcali-sílica (RAS). A reação é classificada dependendo do mineral reativo presente nos agregados.

A reação álcali-carbonato é definida pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018) da seguinte maneira:

“Reação entre hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento Portland ou outras fontes, e certos agregados calcários dolomíticos argilosos, acompanhada de desdolomitização, que, sob certas condições, pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa. A reação dos agregados carbonáticos que resulta somente em desdolomitização, sem expansão deletéria, não é chamada de reação álcali-carbonato.”

E a reação álcali-sílica é definida como sendo uma:

“Reação entre hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento Portland ou outras fontes com certas rochas silicosas ou minerais silicosos, como opalas, cherts, quartzo microcristalino, quartzo deformado, vidro vulcânico, vidros reciclados e outras, presentes em alguns agregados, que gera, como produto da reação, gel álcali-sílica, que pode causar expansão anormal e fissuração do concreto em serviço.”

Determinar o potencial reativo dos agregados utilizados nos compósitos cimentícios é de grande importância. No Brasil a reação álcali-sílica é a mais estudada devido a formação dos agregados utilizados no país.

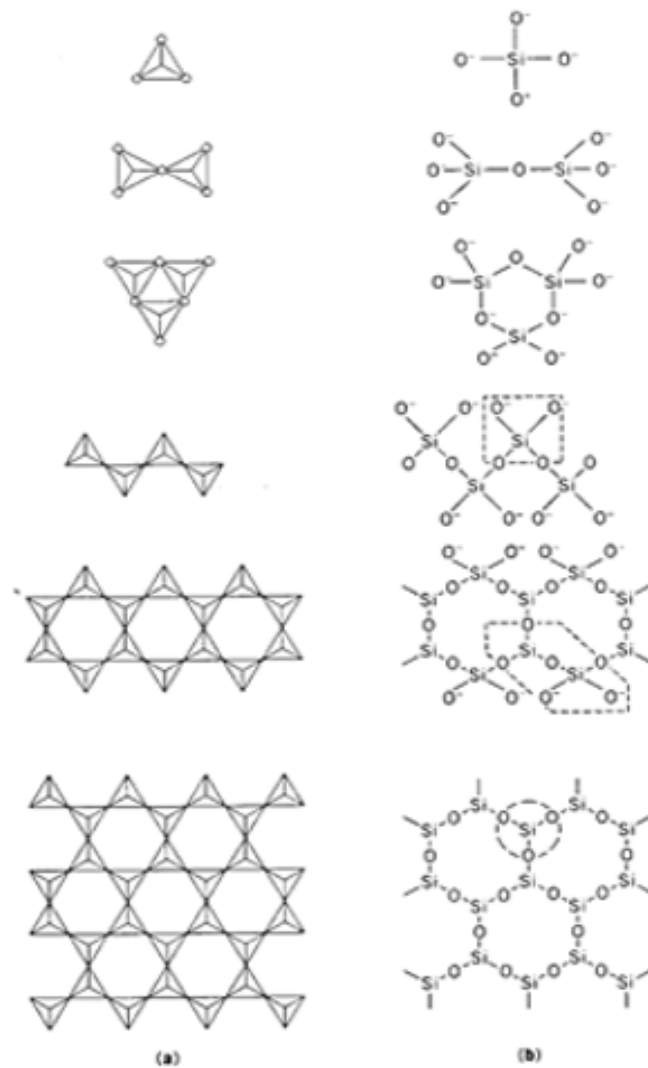
De acordo com La Serna e Rezende (2009), existe mineração de areias, cascalhos e rochas para brita utilizadas como agregado em todas as regiões brasileiras. Rochas basálticas são comumente utilizadas nas localidades próximas a Bacia do Paraná. Granitos, gnaisses e calcários são utilizados principalmente em regiões litorâneas, bem como, no interior de São Paulo, Goiás e Estados do Nordeste.

Já a areia natural ocorre em cursos d'água, em depósitos de arenitos inconsolidados, antigos aluviões, depósitos residuais, solos de alteração e em locais de intemperismo de rochas ricas em quartzo.

2.1.2 MECANISMO DE FORMAÇÃO DA RAA

O mecanismo de formação da reação álcali-agregado já foi intensamente estudado e envolve diversas reações químicas. A estrutura básica dos silicatos pode ser observada na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Estrutura básica dos silicatos

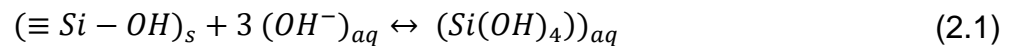


Fonte: Zirtec (s.d).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os géis silicatos alcalinos se formam na presença de íons alcalinos e hidroxila, e dependem do grau de desordem estrutural do agregado, da porosidade e da dimensão das partículas. Na pasta de cimento hidratada há uma grande quantidade de hidróxido de cálcio; em consequência, a concentração de íons hidroxila se mantém elevada mesmo com um cimento com baixo teor de álcalis.

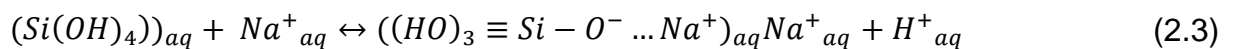
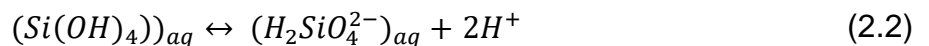
Rajabipour *et al.* (2015) reuniram diversos estudos para explicar o mecanismo da reação álcali agregado.

1) No ambiente alcalino, os íons hidroxila OH^- atacam progressivamente as ligações $\equiv Si - OH$, presentes na superfície da sílica, Equação 2.1.

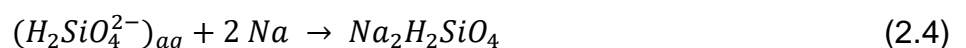


É importante destacar que a solubilidade aumenta com a temperatura e a redução na cristalinidade da sílica.

2) Com o intuito de diminuir o pH, ocorrem as trocas iônicas, Equação 2.2. Em seguida o composto formado reage com os íons Na^+ e K^+ , contidos na solução básica pasta de cimento, e o gel é formado, de acordo com a Equação 2.3.

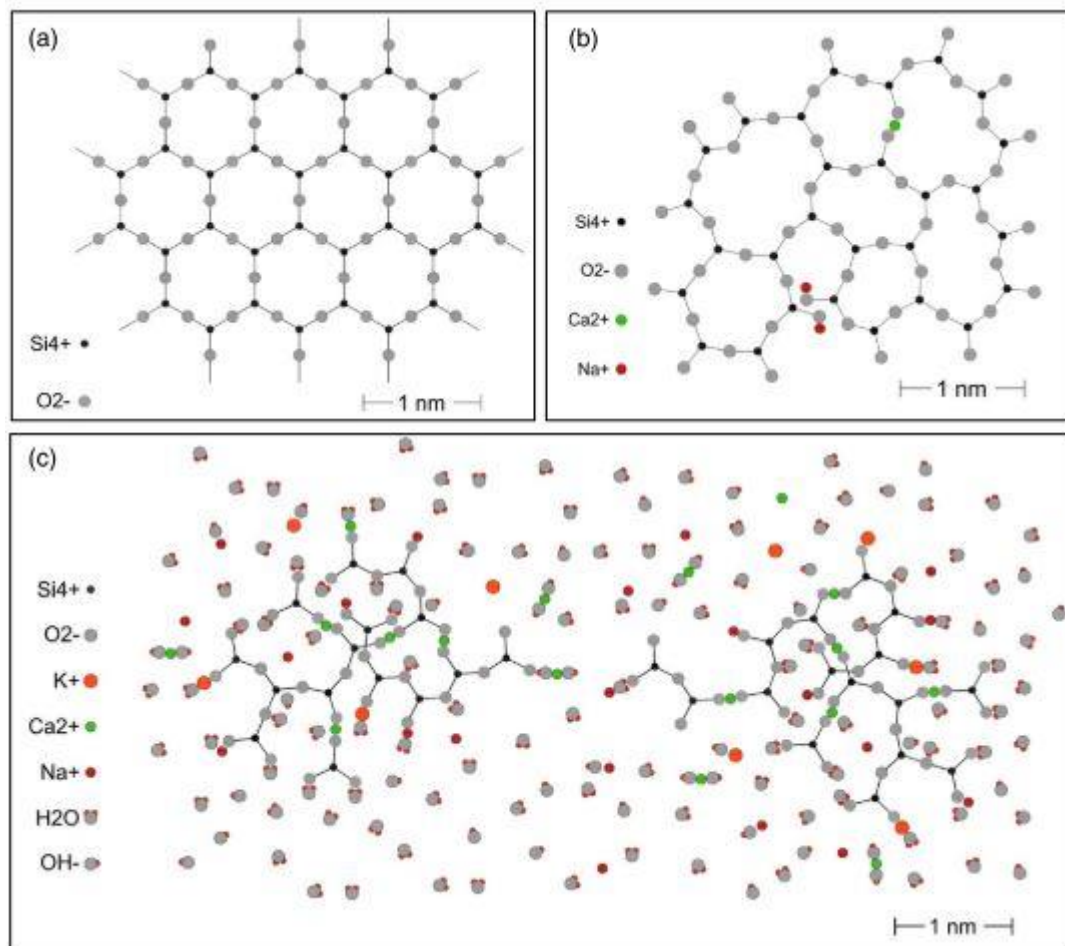


As composição dos géis formados podem ser observados nas Equações 2.4, 2.5 e 2.6.



A Figura 2.4 apresenta o mecanismo da RAA e a formação do gel.

Figura 2.4 a) Representação 2D da estrutura atômica do quartzo. b) Mecanismo de formação. c) Formação do gel da RAA.



Fonte: Rajabipour *et al.* (2015).

2.1.3 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DA EXPANSÃO DEVIDA A RAA

A NBR 15577-1 (ABNT, 2018) classifica as estruturas de acordo com a severidade e consequência caso a RAA ocorra, avaliando condições de exposição da estrutura, utilização, dimensões do elemento estrutural e a reatividade do agregado. O intuito é determinar medidas mitigadoras à RAA. A norma apresenta detalhadamente o processo de classificação das estruturas e dos agregados.

A NBR 15577-1 (ABNT, 2018) traz opções de medidas mitigadoras que devem ser empregadas em função do grau de intensidade. Entre as medidas, se encontram:

- Trabalhar e limitar o teor de álcalis do concreto;
- Fazer uso de cimentos Portland compostos, como os CP II-E e CP II-Z, o cimento de alto forno (CP III) e o cimento pozolânico (CP IV);
- Empregar materiais inibidores mitigadores da reatividade, fazendo uso do método dos prismas em concreto por 2 anos. Nesse sentido se encontram a sílica ativa, metacaulim, ou outra pozolana em combinação com o cimento.

Os teores das adições empregadas devem ser suficientes para mitigar as expansões.

Este trabalho trata especificamente de medidas de mitigação relacionadas a um novo material pozolânico, classificado pela NBR 12653 (ABNT, 2014) como Classe E.

O pó de vidro é uma pozolana em potencial para utilização como material cimentício suplementar e segundo estudos de Shao *et al.* (2000), Shi *et al.* (2005) e Soares; Ferreira e Salvador Filho (2018), o vidro passante na peneira #200, com abertura de 75 µm, apresenta atividade pozolânica e pode ser incorporado em compósitos cimentícios como material suplementar.

2.2 VIDRO

2.2.1 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DO VIDRO

Segundo Macfarlane e Martin (2004), não se sabe ao certo quando e nem como se originou o vidro. Existem indícios de vitrificação na cerâmica por volta de 8000 a.C. Certamente o vidro foi descoberto ao acaso. Segundo um historiador romano Plínio (23-79 dC.), comerciantes fenícios notaram que um líquido claro se formou na alta temperatura das fogueiras, fundindo a areia da praia com as conchas (calcário). Já por volta de 1500 a.C. artesãos egípcios desenvolveram métodos para produção de vasos de vidro. E foi por volta de 650 a.C. que o primeiro manual de fabricação de vidro apareceu em tábuas de pedras sírias. Já no século 13 a ascensão de Veneza permitiu que a cidade se tornasse o maior centro de fabricação de vidro no Ocidente. Mas foi durante a Revolução Industrial que a utilização do vidro ganhou força, onde novas tecnologias permitiram a produção em massa de instrumentos científicos de vidros, de garrafas, vidraças, entre outros milhares de itens.

2.2.2 TIPOS DE VIDRO E SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O vidro é um material transparente fabricado pela fusão de uma mistura de areia de sílica e outros materiais a altas temperaturas, seguido de resfriamento brusco (JALEEL; AL-AZZAWY; AL-KARAWAI, 2015).

A composição e as características de alguns vidros comerciais mais comuns são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição e características de alguns vidros comerciais comuns.

Tipo de vidro	Composição (%p)						Características e aplicações
	SiO_2	Na_2O	CaO	Al_2O_3	B_2O_3	Outros	
Sílica fundida	> 99,5	-	-	-	-	-	Elevada temperatura de fusão, coeficiente de expansão muito pequeno (resistente a choques térmicos)
96% de sílica (Vycor)	96,0	-	-	-	4,0	-	Resistente a choques térmicos e a ataques químicos – vidrarias de laboratório
Borossilicato (Pyrex)	81,0	3,5	-	2,5	13,0	-	Resistente a choques térmicos e a ataques químicos – usado em vidros para forno
Recipientes (sodocálcico)	74,0	16,0	5,0	1,0	-	4 MgO	Baixa temperatura de fusão, trabalhabilidade e durável
Fibra de vidro	55,0	-	16,0	15,0	10,0	4 MgO	Facilmente estirada na forma de fibras – compósitos de fibras de vidro e resina
Sílex óptico	54,0	1,0	-	-	-	37 PbO , 8 K_2O	Alta massa específica e alto índice de refração -lentes ópticas
Vitrocerâmico (Pyroceram)	43,5	14,0	-	30,0	5,5	6,5 TiO_2 0,5 As_2O_3	Facilmente fabricada; resistente; resiste a choques térmicos – vidros para fornos

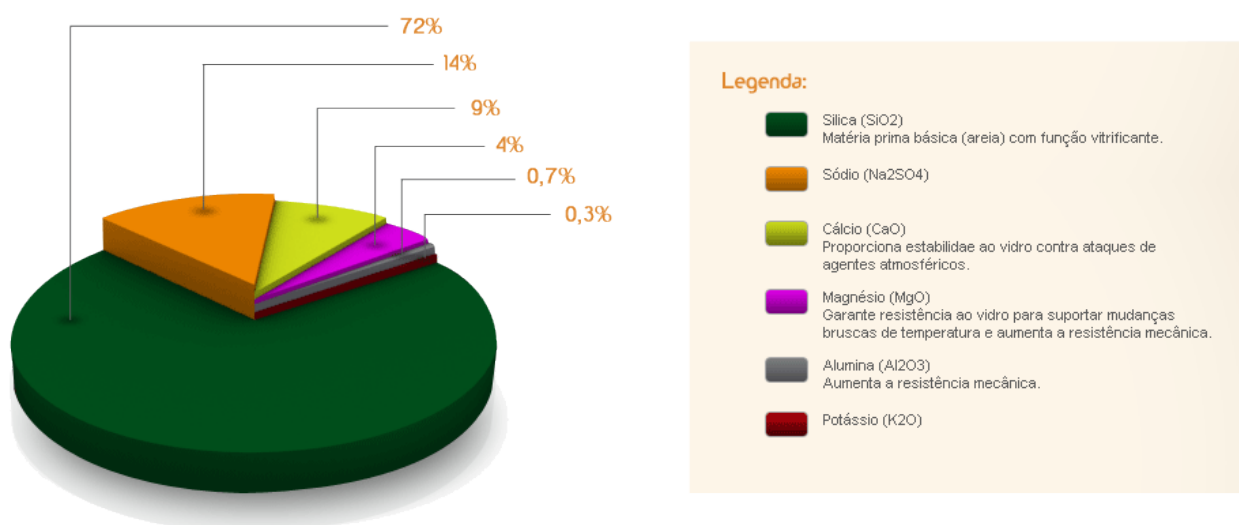
Fonte: Callister Jr. e Rethwisch (2018).

Os vidros de sodocálcico (sem cor e coloridos) e os de borossilicato são os tipos de vidro mais utilizados. O vidro de sodocálcico é comumente usado para produzir recipientes de vidro (embalagem, frascos), vidro plano (janelas de edifícios) e vidro doméstico (copos, louças). Já o vidro de borossilicato é utilizado para

equipamentos de laboratório, uso farmacêutico e iluminação (como lâmpadas de alta potência), de acordo com Vieitez *et al.* (2011).

A composição química deste material varia de acordo com o tipo de vidro utilizado e a sua utilidade. No entanto, existe uma composição química básica do material. Essa composição química pode ser observada na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Composição química geral do vidro



Fonte: CEBRACE (s.d.).

Dentro dos vários tipos, existem também as cores diferentes. Os mais utilizados são os vidros transparentes, os de cor âmbar e o vidro verde. A composição química de acordo com a cor do material pode ser observada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição química dos vidros por cor (em %).

Componente	Vidro transparente	Vidro âmbar	Vidro verde
SiO ₂	72,42	72,21	72,38
Al ₂ O ₃	1,44	1,37	1,49
TiO ₂	0,03	0,04	0,04
Cr ₂ O ₃	0,00	0,03	0,13
Fe ₂ O ₃	0,07	0,26	0,29
CaO	11,50	11,57	11,26
MgO	0,32	0,46	0,54
Na ₂ O	13,64	13,75	13,52
K ₂ O	0,35	0,20	0,27
SO ₃	0,21	0,10	0,07

Fonte: Adaptado de Jaleel, Al-Azzawy e Al-Karawai (2015).

2.2.3 POZOLANICIDADE E RAA

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), materiais pozolânicos podem ser descritos como sendo: materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente moídos e na presença de água, reagem à temperatura ambiente, formando compostos com propriedade ligantes.

O vidro é um material formado principalmente de sílica e age como os materiais pozolânicos, que não tem propriedades conectivas, mas quando é finamente moído com presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperatura ambiente para formar compostos com as propriedades do cimento. Os materiais pozolânicos reduzem a taxa de ganho de velocidade da resistência do concreto nas primeiras idades, de modo que os cimentos que contêm materiais pozolânicos, como o vidro, adquirem uma resistência lenta, por isso devem ter cura por um período mais longo. Em idades mais avançadas o valor da resistência à compressão axial é semelhante à resistência do compósito somente com cimento (JALEEL; AL-AZZAWY; AL-KARAWAI, 2015).

Um estudo realizado por Santur (1974)², citado por Jaleel, Al-Azzawy e Al-Karawai (2015), já naquela época apresentava resultados de que o pó de vidro moído passante na peneira #200 e abertura de 75 µm possuía propriedades pozolânicas, sendo capaz de reduzir a expansão causada pela reação álcali-agregado.

De acordo com Serpa *et al.* (2013), o vidro quando utilizado como material fino (partículas menores que 75 µm) tem a solubilidade em água aumentada com a redução do tamanho das partículas, e a sua sílica é rapidamente dissolvida, reagindo com a portlandita e atuando como um material pozolânico. Esse comportamento foi confirmado por Shao *et al.* (2000); Shayan e Xu (2004) e Shi *et al.* (2005).

O tamanho da partícula de vidro é o principal parâmetro que controla os valores de expansão da reação álcali-sílica. Um limiar ótimo de tamanho de grão em torno de 0,9 a 1 mm foi observado, sob o qual nenhuma expansão ocorreu. Apenas classes de tamanho de partícula grossa entre 2,5–5 mm e 1,25–2,5 mm, levaram a uma expansão significativa nos prismas de concreto. O tamanho das partículas abaixo

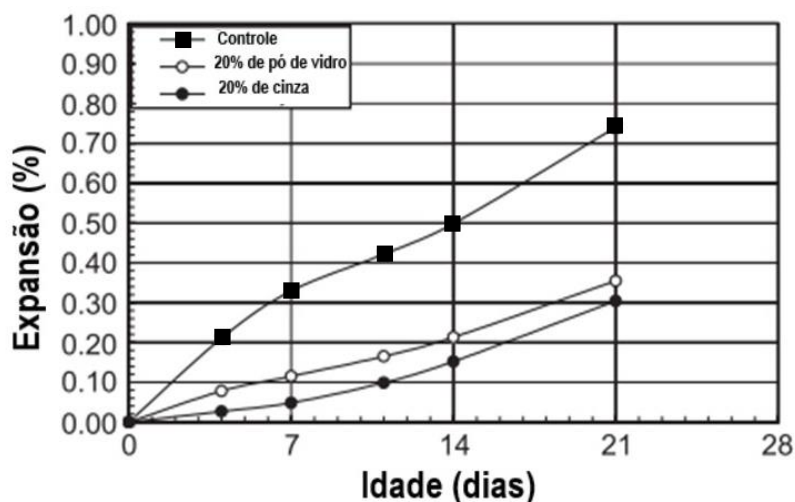
² SANTUR H. R. Glass recycling and reuse, University of Wisconsin, Madin institute for. Environmental studies, v. 17, Mar. 1974.

desse limiar não teve efeito nas variações de comprimento (IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2010).

Jin (1998)³ citado por Guo *et al.* (2018), explica que o teor de sílica no agregado de vidro quando adicionado ao compósito cimentício pode reagir com a solução alcalina dos poros do compósito cimentício e, assim, levar ao dano da reação álcali-agregado.

No entanto, um estudo realizado por Shi *et al.* (2005), onde os autores substituíram 20% do cimento por pó de vidro finamente moído, com partículas entre 40 e 700 μm , e com superfície específica Blaine de 467 m^2/kg , após a realização do ensaio pelo método acelerado em barras de argamassa, foi possível constatar uma diminuição na expansão de RAS. A redução foi na ordem de 50% em relação à amostra de controle, que apresentou uma expansão de 0,50% em 14 dias. Na Figura 2.6 é possível observar os resultados obtidos nos estudos.

Figura 2.6 - Ensaio de expansão em barras.

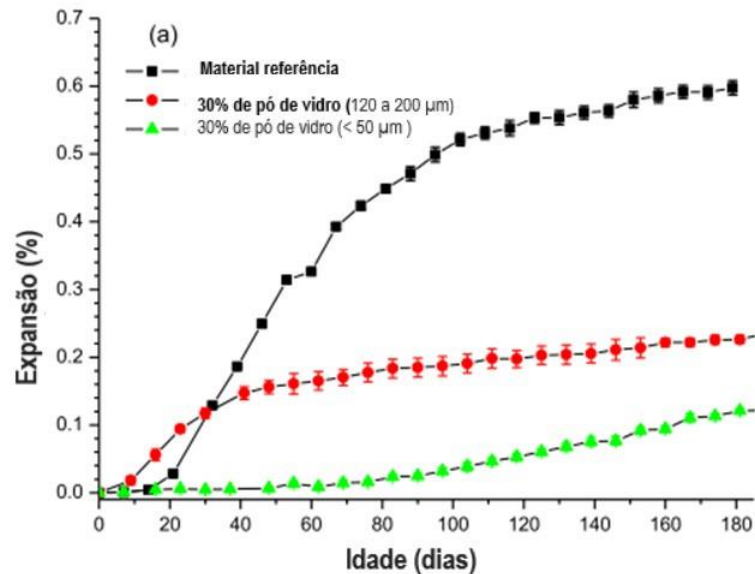


Fonte: Traduzido de Shi *et al.* (2005).

Zheng (2016) realizou estudos da expansão de barras de argamassa, com pós de vidro de diferentes granulometrias. Um mais fino, com partículas menores que 50 μm , e um mais grosso com partículas de 120 a 200 μm . Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 2.7. Todos os compósitos cimentícios foram moldados com agregado reativo (material referência).

³ JIN, W. Alkali-silica Reaction in Concrete with Glass Aggregate: a Chemo- physico-mechanical Approach, 1998.

Figura 2.7 – Gráfico de expansão de RAA.



Fonte: Zheng (2016).

A redução da expansão é expressiva para os dois materiais utilizados. No entanto, o que apresentou melhores resultados foi o de incorporação de 30% de grãos mais finos.

A explicação da eficácia do vidro em mitigar a reação álcali-agregado, por Zheng (2016), é a seguinte:

- “1) A reação pozolânica do vidro sodocálcico, não só consome portlandita para formar C-S-H, como também leva a uma diminuição do monossulfato.
- 2) A reação pozolânica do pó de vidro aumenta as concentrações de Na, Si, Al e S e diminui a concentração de Ca. O Si dissolvido produz C-S-H precipitado, enquanto o Si despolimerizado, mas retido, produz C-S-H in situ, que desenvolve um rebordo em torno dos grãos de vidro.
- 3) O aumento de Al e S na solução de poros é derivado da fase sólida do monossulfato. A razão da diminuição do monossulfato ainda não está clara, pode ser devido às altas concentrações de Na, Si e baixa concentração de Ca na solução de poros.
- 4) Embora a reação do vidro aumente a concentração de álcalis na solução de poros, partículas finas de vidro mitigam eficientemente a expansão induzida pela RAS. Este efeito mitigatório é devido ao aumento da concentração de Al na solução de poros, o que reduz a dissolução da sílica reativa, controlando a reação álcali-sílica.”

2.3 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Segundo Neville (2016), o concreto de alto desempenho (CAD) utiliza componentes já utilizados em outros concretos, não sendo um material revolucionário

ou inédito. As características desse material consistem em um aperfeiçoamento das características de concretos convencionais.

Uma alta resistência não é a única característica requisitada nesses materiais. Estes vem sendo desenvolvidos para alcançar-se também um material com um módulo de elasticidade alto, uma alta densidade, baixa permeabilidade, e resistência a algumas formas de ataque, aumentando, assim, a durabilidade da estrutura. Outra vantagem do CAD é que com o aumento da resistência, há diminuição das dimensões de elementos estruturais que utilizam esse tipo de material. Em uma obra de grandes dimensões há ganho de espaço, diminuição do peso total da obra e, conseqüentemente, uma menor carga nas fundações (NEVILLE; AITCIN, 1998).

De acordo com Isaia (2011), o Concreto de ultra alto desempenho (CUAD), assim como o CAD, é uma evolução dos concretos convencionais, podendo ser conhecido também como concreto de pós reativos (CPR). Sua utilização baseia-se em aumentar a resistência à compressão dos concretos, de modo a se obter um material tão resistente e durável quanto uma rocha.

A produção de tais compósitos só foi possível devido ao progresso da tecnologia de ligantes minerais, maior disponibilidade de aditivos superplastificantes altamente eficazes e amplo reconhecimento da influência das adições minerais na microestrutura e propriedades gerais de compósitos cimentícios (ZDEB, 2013).

Segundo Neville e Aitcin (1998), geralmente os concretos de alto desempenho são compostos por sílica ativa ou outras adições minerais como cinzas volantes e escórias de alto forno, os agregados são cuidadosamente escolhidos tendo sua dimensão máxima menor do que a de um concreto convencional, alto consumo de cimento, uma baixa relação água/cimento e uso de aditivos superplastificantes.

Os materiais utilizados no CAD são basicamente os mesmo no CUAD. No entanto, o princípio do CUAD está na ausência de agregado graúdo, onde neste as partículas de agregado têm tamanho médio de 0,2 mm, o que justifica seu nome de concreto de pós reativos, sendo uma argamassa e não um concreto, do ponto de vista granulométrico. Nesses concretos também podem ser adicionadas fibras. As propriedades apresentadas são as mesmas do concreto, mesmo sendo uma argamassa em grau muito mais elevado, o nome concreto prevaleceu devido ao desempenho do material (ISAIA, 2011).

2.3.1 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é resultado da calcinação do clínquer, que é uma mistura de calcário, argila e outros componentes químicos que aprimoram suas características, como por exemplo, o gesso que retarda o tempo de pega. Esse material é constituído por cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), uma certa proporção de magnésia (MgO), uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO_3), e ainda uma pequena porcentagem na composição de óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), óxido de titânio (TiO_2) e outras substâncias de menor importância (BAUER, 2015).

De acordo com Isaia (2011), os principais compostos formados pelas combinações químicas na pulverização do clínquer são:

- Silicato tricálcico ($3CaO . SiO_2 = C_3S$);
- Silicato dicálcico ($2CaO . SiO_2 = C_2S$);
- Aluminato tricálcico ($3CaO . Al_2O_3 = C_3A$);
- Ferro aluminato tetracálcico ($4CaO . Al_2O_3 . Fe_2O_3 = C_4AF$).

Em concretos de alto desempenho e ultra alto desempenho, geralmente a alta resistência é uma das características requisitadas e o cimento mais utilizado é o de alta resistência inicial, que tem maiores proporções de C_3S e maior finura (NEVILLE; AITCIN, 1998).

Richard e Cheyrezy (1995) apresentam dosagens típicas do CUAD, onde o consumo de cimento e sílica ativa por metro cúbico de concreto é em torno de 960 kg e 240 kg, respectivamente.

2.3.2 SÍLICA ATIVA

A sílica ativa é um material pozzolânico, que é um subproduto do processo de fundição na indústria de silício e ferrosilício. A redução de quartzo de alta pureza para silício a temperaturas de até 2000 °C produz vapores de SiO_2 , que se oxidam e condensam na zona de baixa temperatura para partículas minúsculas que consistem em sílica não cristalina. Os subprodutos da produção de silício metálico e das ligas de

ferrosilício com teor de silício de 75% ou mais, contêm 85-95% de sílica não cristalina. O subproduto da produção de liga de ferro silício com 50% de silício tem um teor de sílica muito menor e é menos pozolânico (Tabela 2.3). Portanto, a quantidade de SiO_2 da sílica ativa está relacionada ao tipo de liga utilizada na produção do subproduto (SIDDIQUE, 2011).

Tabela 2.3 - Tipo de liga e porcentagem de SiO_2 .

Tipo de liga	% de
50% ferrosilício	61-84
75% ferrosilício	84-91
Silício metálico	87-98

Fonte: adaptado ACI 234 (1995).

As vantagens do uso da sílica ativa em compósitos cimentícios são diversas: alta resistência à compressão, alta resistência à tração, alta resistência à flexão e alto módulo de elasticidade, maior tenacidade (quando utilizada com fibras), alta resistência de adesão, maior durabilidade, baixa permeabilidade e baixa penetração de agentes agressivos, como cloreto e água, maior resistência à abrasão, resistência elevada a ataques químicos e alta resistividade elétrica (SIDDIQUE, 2011).

A superfície específica da sílica, segundo Isaia (2011), varia de 13.000 a 30.000 m^2/kg , ficando em torno de 20.000 m^2/kg , valor muito superior à superfície do cimento que é de 350 a 600 m^2/kg . Esse fator influencia diretamente na elevadíssima reatividade da sílica. Segundo Neville (2016), devido a essa reatividade é possível utilizar a sílica em substituição a uma pequena parcela de cimento, como material pozolânico.

Os efeitos benéficos do uso da sílica são vários, mas para compósitos cimentícios de alto desempenho que precisam ter uma durabilidade elevada, os dois principais efeitos são: a reação pozolânica e o efeito físico de preenchimento de vazios, ambos de grande importância.

O efeito físico de preenchimento dos poros ocorre quando partículas extremamente finas de sílica se acomodam na interface entre agregado e pasta de cimento, provocando uma melhor densificação dos componentes, provocando uma diminuição da porosidade do compósito cimentício (NEVILLE, 2016).

2.3.3 AGREGADOS

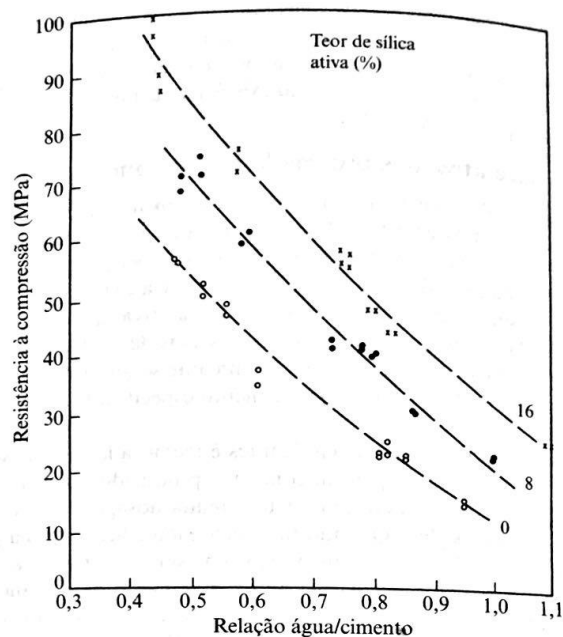
Para um melhor desempenho do compósito, torna-se necessário uma avaliação criteriosa de todos os materiais utilizados, incluindo os agregados, que devem ser de boa qualidade e ter uma distribuição granulométrica contínua. Realizar o empacotamento de todos os constituintes do material permite uma melhor escolha e dosagem dos agregados, visando a obtenção de um menor índice de vazios.

Segundo Isaia (2011), os agregados devem ter dimensão máxima reduzida, menores que 2 mm, de modo a aumentar a homogeneidade da mistura e eliminar a zona de transição, obtendo-se, assim, um ótimo empacotamento das partículas, pela utilização das partículas finas.

2.3.4 RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE

A relação água/aglomerante (a/agl) de compósitos cimentícios de alto desempenho é extremamente baixa. Os valores não ultrapassam 0,35, podendo chegar até em 0,10, de maneira que quanto menores as relações maiores são as resistências atingidas. Essa relação para concretos convencionais, com relação a/c de 0,4 a 1,1, pode ser observada na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Resistência à compressão de concretos convencionais em função da relação a/c.



Fonte: Bauer (2015).

Em função da baixa relação água/aglomerante, o compósito cimentício de alto desempenho pode perder água necessária para o desenvolvimento das reações químicas, podendo sofrer auto dessecação e retração autógena. As consequências são a ocorrência de fissuras nos compósitos (ZHUTOVSKY; KOVLER, 2017).

A perda de água para o ambiente, as altas temperaturas iniciais, devido a finura elevada dos grãos do cimento de alta resistência inicial e o alto consumo de cimento utilizado em materiais de ultra alto desempenho, podem causar a retração do material e, conseqüentemente, a sua fissuração. Outro problema é a perda de trabalhabilidade que essa baixa relação água/cimento pode acarretar, tornando necessária a utilização de aditivos.

Assim é de extrema importância que a cura dos compósitos cimentícios seja realizada criteriosamente, a fim de não comprometer o desempenho do material desenvolvido (NEVILLE; AITCIN, 1998).

2.3.5 ADITIVOS

Segundo Aïtcin e Flatt (2016), diferentes fórmulas foram desenvolvidas para a família de aditivos plastificantes, sendo os primeiros os aditivos plastificantes de base orgânica, ligassulfonatos; em seguida os superplastificantes de base de polinaftaleno e melamina, e os mais utilizados nos últimos anos são os superplastificantes com base policarboxilato éster.

Os aditivos superplastificantes melhoram a trabalhabilidade e o índice de consistência da pasta, possibilitando a redução da água de amassamento, melhorando a resistência para determinada trabalhabilidade. De acordo com Corrêa (2010), o mecanismo de ação dos superplastificantes é baseado na redução da tensão superficial da água e na repulsão eletrostática instalada entre o cimento e a água. O produto apresenta uma grande capacidade de dispersão dos grãos da mistura e aumento da plasticidade.

Já de acordo com Mehta e Monteiro (2014), os aditivos redutores de retração, têm como princípio básico a redução da tensão capilar gerada na retração por secagem dos compósitos cimentícios. Ele altera os tempos de início e fim de pega dos materiais, podendo diminuir também a resistência à compressão do material.

Nos estudos de Freitas (2009), o teor de 1% de redutor de retração foi o que apresentou efeito mais benéfico, apresentando queda significativa na retração das argamassas.

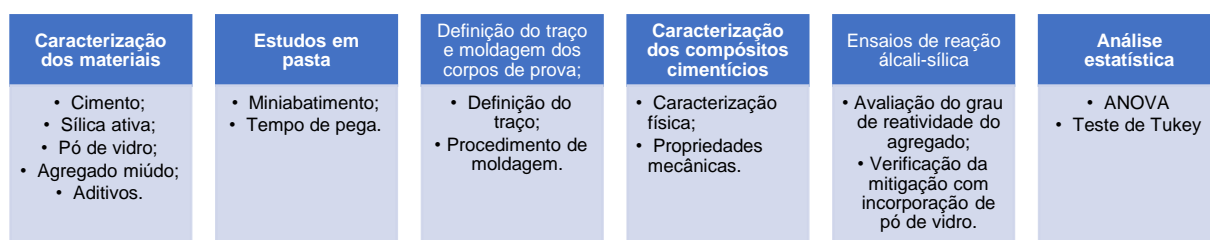
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o intuito de analisar o efeito da incorporação do pó de vidro em compósitos cimentícios de alto desempenho, o programa experimental visa determinar propriedades físicas, mecânicas e de comportamento frente à reação álcali-sílica desse tipo de material.

Essa pesquisa é relacionada a outras pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Materiais e Componentes da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), do Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana. O grupo de pesquisa composto pela presente autora, por Silvete Mari Soares, aluna de doutorado e por Adalberto Oliveira Júnior, aluno de mestrado, publicaram um artigo com os resultados em comum desta pesquisa (SOARES *et al.*, 2019).

O programa experimental foi dividido em sete partes. São elas: a caracterização química e física dos materiais, os ensaios em pasta, a definição do traço e moldagem dos corpos de prova, a caracterização física e mecânica dos compósitos cimentícios de alto desempenho, ensaios de reação álcali-sílica e análise estatística. Essas etapas foram realizadas de acordo com a Figura 3.1.

Figura 3.1 Esquematização do programa experimental



Fonte: Autor (2019).

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

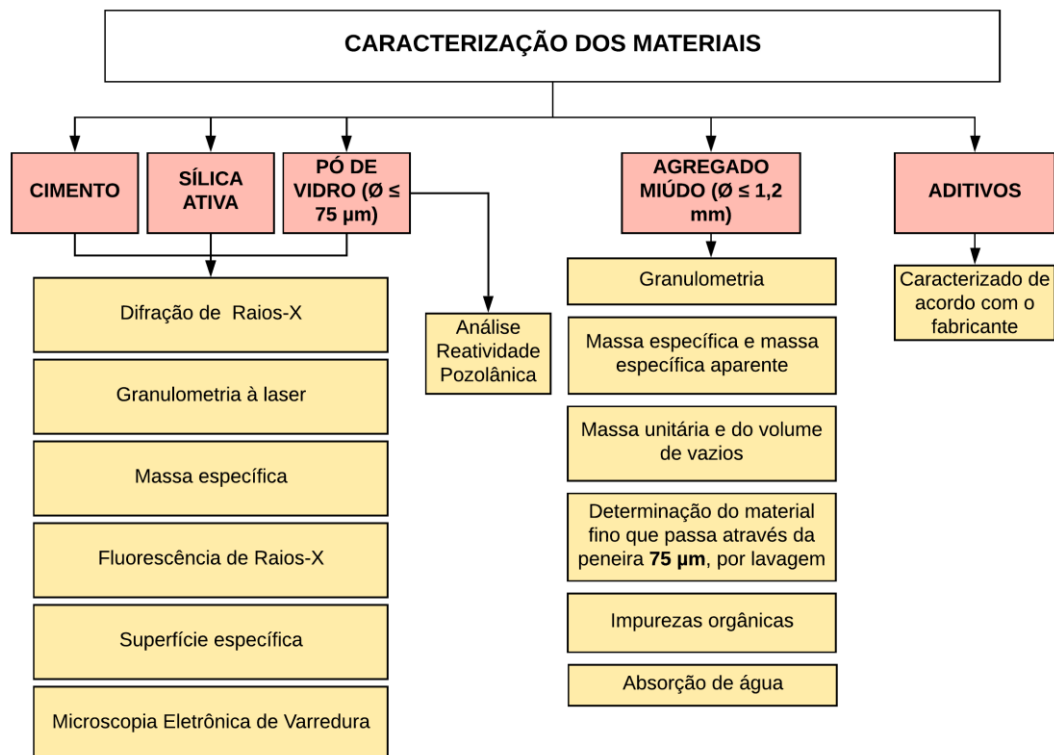
Os materiais utilizados no estudo foram:

- Cimento CPV-ARI (Holcim do Brasil S/A);

- Cimento padrão fornecido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP);
- Sílica ativa em pó do tipo microsílica 920 U (Elkem);
- Pó de vidro passante na peneira de malha #200 (abertura de 75 μm);
- Agregado miúdo natural, quartzoso, de areia de rio, da região de São Carlos-SP, com dimensão máxima de 1,2 mm;
- Aditivo superplastificante TEC-FLOW 8000 (Grace);
- Aditivo redutor de retração ECLIPSE (Grace);
- Água proveniente da rede de abastecimento local;
- Água deionizada.

Inicialmente foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, esses podem ser observados na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Ensaios de caracterização dos materiais.



3.1.1 CIMENTO

O cimento utilizado nesta pesquisa experimental foi o Cimento Portland CP V ARI, fabricado pela Holcim do Brasil S/A. O cimento foi especificado de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018).

A granulometria do cimento, foi determinada por granulometria à laser. O ensaio foi realizado na Universidade de São Paulo, no Laboratório de Engenharia de Materiais, em São Carlos. Para realização do ensaio foi colocada uma pequena quantidade do material em um líquido dispersante, Figura 3.3 a), em seguida colocado no equipamento, Figura 3.3 b).

Figura 3.3 a) Preparação da amostra para o ensaio de granulometria. 3.3 b) Aparelhagem para a realização do ensaio de granulometria.



Fonte: Autor (2018).

Outro ensaio realizado no laboratório de materiais da Universidade de São Paulo, campus de São Carlos, foi o de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no qual as imagens obtidas pelo ensaio fornecem informações referentes à morfologia e topografia dos materiais.

Já a análise mineralógica foi realizada para o cimento utilizando a técnica de difratometria de raios X (DRX). O objetivo do ensaio foi caracterizar as fases mineralógicas do material analisado. Os ensaios foram realizados no Instituto de Física da Universidade de São Paulo – IFSC/USP, localizado na cidade de São Carlos.

Para a realização do ensaio foi utilizada uma unidade de Raios-X: - Rigaku Rotaflex, modelo: - RU200B; 2theta/theta, varredura normal de 3 a 120°, passo 0.0200/segundo; Varredura de 2°/min; Tensão de 40 kv e 60 mA, Ânodo de *Cu*.

Para a caracterização química dos materiais foi realizado o ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), técnica não destrutiva para identificar os elementos químicos do material. O ensaio foi realizado no CNEN/LAPOC na cidade de Poços de Caldas. Foram utilizados três métodos, a espectrometria por Plasma com Emissão Ótica-ICP-OES, espectrometria por FRX e gravimetria.

A determinação da massa específica do cimento foi realizada de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017) e a determinação da finura e superfície específica deste material foi determinada pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine), de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015).

3.1.2 CIMENTO PADRÃO

O cimento padrão utilizado foi caracterizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Esse cimento tem por finalidade ser utilizado para a avaliação do grau de reatividade de um determinado agregado, de acordo com as metodologias da NBR 15577-4 (ABNT, 2018) e NBR 15577-6 (ABNT, 2018).

Foram realizadas caracterizações: química, físico-mecânica e de resistência à compressão, de acordo com textos normativos nacionais.

3.1.3 SÍLICA ATIVA

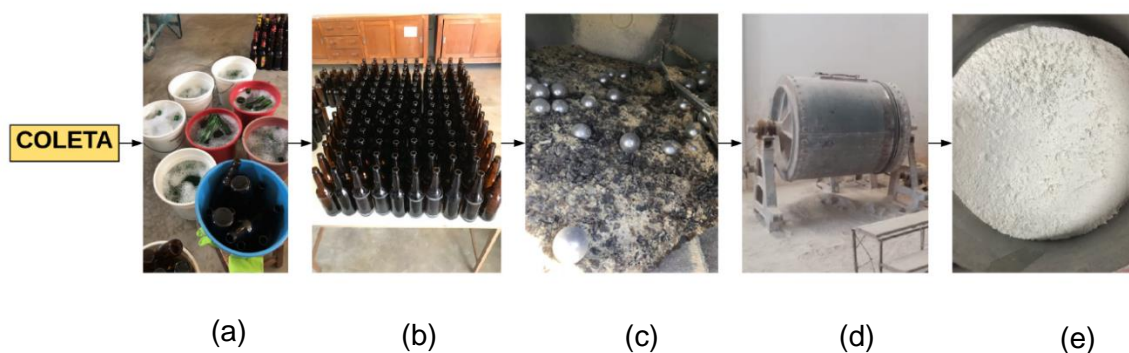
Foi utilizada a Microsilica® 920 U da Elkem. A sílica foi analisada de acordo com a NBR 13956 (ABNT, 2012). Os ensaios de granulometria, DRX, MEV, FRX, massa específica e superfície específica deste material foram realizados de acordo com o procedimento descrito no item 3.1.1.

3.1.4 PÓ DE VIDRO

O pó de vidro utilizado, classificado como sodocálcico, foi obtido a partir de garrafas de bebidas de pós consumo de cor âmbar. As garrafas foram lavadas, com

rótulos e cola removidos. Em seguida quebradas em cacos em uma betoneira com esferas de aço. Logo após a quebra o vidro foi processado em um moinho de bolas. O produto obtido é um pó de vidro passante na peneira #200, com abertura de 75 μm . O processo de obtenção do material pode ser observado na Figura 3.4, sendo descrito a seguir. Destaca-se que o peneiramento final foi realizado no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), da Universidade Federal de São Carlos.

Figura 3.4 a) Lavagem e retirada dos rótulos das garrafas; b) Secagem ao ar das garrafas; c) Quebra das garrafas em cacos em uma betoneira com bolas de aço; d) Moagem final em moinho de bolas; e) Produto final obtido da moagem.



Fonte: Autor (2018).

- **Moagem**

O moinho utilizado possui revestimento de sílex, rocha sedimentar silicatada, e as bolas utilizadas para o processo de moagem são do mesmo material. Observa-se na Figura 3.5, o moinho descarregando o material moído.

Figura 3.5 - Moinho descarregando o pó de vidro



Fonte: Autor (2018).

Foram moídos, a seco, 250 kg de pó de vidro em uma única moagem. A partir dos dados do motor obtidos com o fabricante e dos detalhes da moagem, foi possível calcular o consumo total desse processo, apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Detalhamento da moagem do pó de vidro.

Potência do motor (cv)	Rendimento do motor (%-Fabricante)	Consumo (KWh/h)	Horas de moagem	Valor do KWh em São Carlos (set. 2018)	Gasto total (R\$)
7,5	89,1	6,195	14	0,336	29,14

Fonte: Autor (2018).

- **Peneiramento**

O peneiramento foi realizado no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), da Universidade Federal de São Carlos, como mencionado anteriormente. Inicialmente o pó de vidro foi seco em estufa na temperatura de $110(\pm 5)$ °C por 24 horas. Em seguida, realizou-se o peneiramento. Foram colocadas em torno de 400 gramas de material nas peneiras; em seguida o peneirador, foi ligado, sendo o material peneirado por 30 minutos. Na Figura 3.6 é apresentado o peneirador utilizado.

Figura 3.6 - Peneirador mecânico utilizado no peneiramento do pó de vidro.



Fonte: Autor (2018).

A porcentagem de material passante na peneira com abertura de 75 μm , foi de aproximadamente 64%, ou seja, em torno de 256 gramas de material por peneiramento.

Para o peneiramento de 250 kg de material, estimou-se o consumo apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dados do peneiramento do pó de vidro.

Potência do motor (cv)	Rendimento do motor (%-Fabricante)	Consumo (KWh/h)	Horas de peneiramento	Valor do KWh em São Carlos (set. 2018)	Gasto total (R\$)
0,33	71	0,342	31,25	0,336	3,64

Fonte: Autor (2018).

Para caracterização do pó de vidro, foram realizados os ensaios de granulometria, Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV), DRX, FRX, massa específica e superfície específica (Método de Blaine), cujos procedimentos foram os mesmos utilizados para o cimento.

Ensaio adicionais foram realizados para determinação da atividade pozolânica do pó de vidro. Foi feita a determinação do desempenho com cal aos 7 dias e com cimento Portland aos 28 dias, conforme a NBR 5751 (ABNT, 2015) e a NBR 5752 (ABNT, 2014), respectivamente. O ensaio de Chapelle modificado foi realizado conforme a NBR 15895 (ABNT, 2010), sendo esta determinação feita no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

3.1.5 AGREGADO MIÚDO

Foi utilizado agregado miúdo natural, areia de rio, disponível na região de São Carlos, peneirado, com dimensão máxima de 1,2 mm. A caracterização foi realizada a partir dos seguintes ensaios:

- Absorção de água (%) – NBR NM 30 (ABNT, 2001);
- Massa específica (g/cm^3) – NBR NM 52 (ABNT, 2009);
- Massa unitária (kg/m^3) - NBR NM 45 (ABNT, 2006);

- Impurezas orgânicas – NBR NM 49 (ABNT, 2001);
- Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem (%) – NBR NM 46 (ABNT, 2003);
- Determinação da composição granulométrica – NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.1.6 ADITIVOS

Foi adicionado à mistura do compósito cimentício, um superplastificante TECFLOW 8000, à base de policarboxilato e um aditivo redutor de retração ECLIPSE, utilizado devido ao alto consumo de cimento por kg/m³, ambos fabricados e caracterizados pela Grace (GCP Applied Technologies). O ensaio de pH dos aditivos foi realizado no Laboratório de Materiais e Componentes da Universidade Federal de São Carlos.

3.2 ESTUDOS EM PASTA

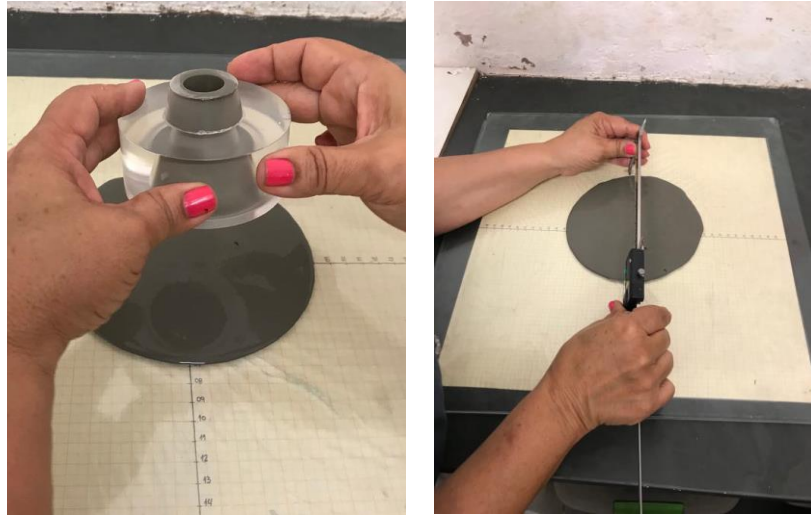
Para verificar a compatibilidade entre o aditivo superplastificante, o cimento e o pó de vidro, foram realizados o ensaio de miniabatimento e a determinação do tempo de pega.

3.2.1 MINIABATIMENTO

O ensaio de miniabatimento foi realizado para a determinação da consistência da pasta de cimento, da pasta de cimento com vidro, ambos com o superplastificante. O ensaio foi realizado inicialmente variando os teores de SP na pasta referência. A pasta foi colocada em um molde tronco-cônico. Após a remoção do molde, Figura 3.7 a), foram realizadas duas medidas de diâmetro da pasta, Figura 3.7 b). Em seguida calcula-se a média dos dois valores medidos obtendo, assim, a área de espalhamento

da pasta. Após a mistura do cimento com a água foi verificada a manutenção do abatimento aos 10, 30, 40 e 60 minutos.

Figura 3.7 a) Realização do ensaio do miniabatimento. b) Medição de dois diâmetros da pasta.



Fonte: Autor (2018).

3.2.2 TEMPO DE PEGA

O ensaio foi realizado de acordo a NBR 16607 (ABNT, 2017), que estabelece o método para determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland utilizando o aparelho de Vicat. O tempo de início de pega ocorre a partir do momento da adição de água ao cimento até o momento em que a agulha estabiliza a (6 ± 2) mm de penetração na pasta. Já o tempo de fim de pega é o intervalo de tempo entre o cimento entrar em contato com a água até o momento em que a agulha de Vicat penetre 0,5 mm na pasta. Inicialmente foi realizado o índice de consistência normal da pasta, como mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Determinação do índice de consistência da pasta referência.



Fonte: Autor (2018).

A nomenclatura das pastas foi determinada pela quantidade de material presente na composição no formato de números X-Y-Z, sendo X correspondente ao cimento CPV, Y correspondente à quantidade de sílica ativa em porcentagem e Z à quantidade de vidro em porcentagem. As condições do ensaio para as pastas de início e fim de pega estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Condições do ensaio de tempo de início e fim de pega.

Nomenclatura das pastas	Composição
1-0-0	Cimento CPV + água (30% consistência normal)
1-8-0	Cimento CPV + 8% em massa de sílica ativa em relação aos aglomerantes + água (30% consistência normal)
1-0-50	Cimento CPV + 50% de vidro em substituição volumétrica ao cimento + água (30% consistência normal)
1-8-50	Cimento CPV + 8% em massa de sílica ativa em relação aos aglomerantes +50% de vidro em substituição volumétrica ao cimento + água (30% consistência normal)

Fonte: Autor (2019).

3.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

O traço utilizado é uma continuação dos estudos realizados por Salvador Filho *et al.*(2017), onde estes dividiram os estudos em duas partes, sendo a primeira uma análise das propriedades dos compósitos cimentícios com diferentes consumos de cimento, determinando parâmetros como o aumento da homogeneidade dos compósitos com a eliminação de agregado graúdo, a utilização de sílica ativa com o intuito de aumentar a compacidade do compósito cimentício, o empacotamento dos agregados miúdos e o uso de superplastificantes para obtenção de compósitos com alta trabalhabilidade. O pó de vidro foi considerado como aglomerante no cálculo da relação a/agl , e essa relação não foi alterada pois nos estudos a consistência com a incorporação do pó de vidro não foi modificada.

Os parâmetros que se mantiveram fixos ao longo do estudo foram: o tipo de cimento, o consumo de sílica ativa (8% em massa), o agregado miúdo e a água.

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. As nomenclaturas utilizadas são descritas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Nomenclatura adotada para os traços estudados.

Nomenclatura do traço	Composição
REF-SA	Traço referência com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante, 0% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl : 0,194).
VD10	Traço com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante e substituição volumétrica do cimento por 10% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl : 0,194).
VD20	Traço com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante e substituição volumétrica do cimento por 20% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl : 0,194).
VD30	Traço com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante e substituição volumétrica do cimento por 30% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl : 0,194).
VD50	Traço com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante e substituição volumétrica do cimento por 50% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl : 0,194).

Fonte: Autor (2019).

O consumo de materiais em kg/m^3 dos compósitos cimentícios utilizados neste estudo pode ser observado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Consumo de materiais em kg/m³.

Traços	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	Água*	SP**	RR***
REF-SA	1035,69	82,86	0,00	1112,33	200,92	24,86	11,39
VD10	928,86	83,60	83,60	1105,34	204,35	22,29	10,22
VD20	831,41	83,14	166,28	1114,09	199,54	16,63	8,31
VD30	724,50	79,70	253,58	1108,49	202,86	14,49	7,25
VD50	516,78	82,68	418,59	1111,08	201,54	10,34	5,17

*Valor de água corrigida em relação aos 46% de sólidos do superplastificante.

**SP = superplastificante

***RR = redutor de retração

Fonte: Autor (2019).

Foi realizada uma verificação da consistência dos compósitos cimentícios, sendo adotada uma consistência mínima de 310 mm, 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). Os equipamentos utilizados para o ensaio foram: a mesa para índice de consistência, molde tronco cônico, paquímetro, soquete metálico e régua metálica, (Figura 3.9 a). Foram colocadas três camadas da mistura no molde tronco cônico com alturas aproximadamente iguais, e aplicado 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 3.9 b), e o valor adotado foi uma média desses dois valores.

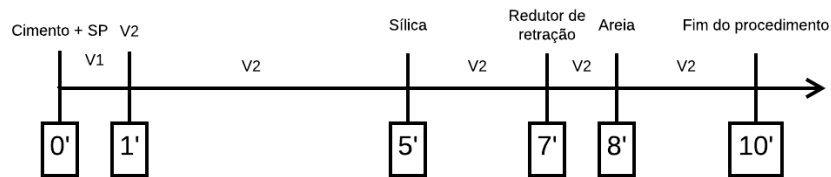
Figura 3.9 a) Realização do espalhamento (Flow table). b) Medição de dois diâmetros para espalhamento.



Fonte: Autor (2018).

O procedimento de mistura adotado para os compósitos cimentícios de referência (sem pó de vidro), foi testado de diversas maneiras e o que apresentou melhor resultado na mistura dos materiais, é o apresentado na Figura 3.10. Destaca-se que V1 corresponde à velocidade baixa da argamassadeira e V2 à velocidade alta.

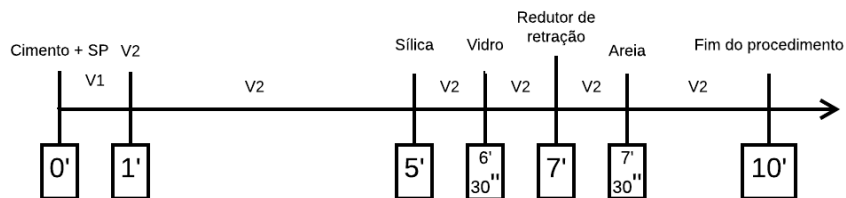
Figura 3.10 - Procedimento de mistura REF-SA.



Fonte: Autor (2019).

Já para as misturas com incorporação de pó de vidro, adotou-se procedimento apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Procedimento de mistura dos compósitos com incorporação de pó de vidro.



Fonte: Autor (2019).

A argamassadeira utilizada nos ensaios pode ser observada na Figura 3.12.

Figura 3.12 a) Argamassadeira utilizada no procedimento de mistura dos materiais. b) Argamassadeira durante ensaio.



Fonte: Autor (2018).

Os corpos de prova cilíndricos (CP) foram moldados com três camadas com altura aproximadamente iguais, em cada camada aplicou-se 30 golpes uniformemente. Já os corpos de prova prismáticos foram moldados com duas camadas de altura aproximadamente iguais e aplicados 30 golpes, distribuídos uniformemente.

A cura foi realizada de acordo com o indicado na NBR 7215 (ABNT, 1996), onde os corpos de prova foram mantidos inicialmente no molde em câmara úmida, com a face superior protegida por uma placa de vidro, como na Figura 3.13, por 24 horas.

Figura 3.13 - Corpos de prova em câmara úmida.



Fonte: Autor (2018).

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

A caracterização dos compósitos cimentícios foi dividida em 2 etapas, sendo elas, determinação de propriedades físicas e propriedades mecânicas.

Os ensaios realizados em compósitos cimentícios podem ser observados na Tabela 3.6, bem como o estado, fresco ou endurecido, a metodologia, a quantidade e dimensão dos CPs.

Tabela 3.6 - Ensaios realizados em compósitos cimentícios.

Característica	Estado	Metodologia	Quantidade de CP's/idade/traço	Dimensão dos CP's
Densidade de massa (kg/m ³)	Fresco	NBR 13278 (ABNT,2005)	2 verificações	Cilíndrico – 80x85 mm
Teor de ar incorporado (%)	Fresco	NBR 13278 (ABNT,2005)	2 verificações	Cilíndrico – 80x85 mm
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	Endurecido	NBR 9779 (ABNT, 2012)	3	Cilíndrico – 50x100 mm
Resistência à compressão axial (MPa)	Endurecido	NBR 5739 (ABNT, 2007)	4	Cilíndrico – 50x100 mm
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Endurecido	NBR 7222 (ABNT,2011)	3	Cilíndrico – 50x100 mm
Resistência à tração na flexão e à compressão (MPa)	Endurecido	NBR 13279 (ABNT, 2005)	3	Prismático 40x40x160 mm
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Endurecido	ASTM E1876-01 (2001) e ASTM C215-02 (2003)	3	Cilíndrico – 50x100 mm
Módulo de elasticidade estático (GPa)	Endurecido	NBR 8522 (ABNT, 2017)	5, sendo 3 para o módulo e 2 para compressão axial	Cilíndrico – 50x100 mm
Expansão das barras pelo método acelerado	Endurecido	NBR 15577:4 (ABNT, 2018)	3	Prismático 25x25x285 mm
Mitigação da expansão pelo método acelerado	Endurecido	NBR 15577:5 (ABNT, 2018)	3	Prismático 25x25x285 mm

Fonte: Autor (2018).

As idades analisadas em cada ensaio serão apresentadas nos respectivos itens a seguir.

3.4.1 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MASSA E DO TEOR DE AR INCORPORADO

Foram realizados ensaios no compósito cimentício no estado fresco de determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005), Figura 3.14.

Figura 3.14 a) Procedimento de ensaio de determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. b) Pesagem da amostra.



Fonte: Autor (2018).

3.4.2 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A absorção de água nos compósitos cimentícios por capilaridade foi realizada nas idades de 7, 28 dias e 180 dias, conforme especificações da NBR 9779 (ABNT, 2012). Os corpos de prova logo após a desmoldagem, permaneceram em cura imersa em água saturada com cal até a idade de ensaio. Posteriormente na data determinada para cada idade os corpos de prova foram colocados em estufa à temperatura de (105 ± 5) °C, até constância de massa, (Figura 3.15 a). Em seguida, foram determinadas as massas secas de cada um dos corpos de prova e iniciado o ensaio em recipientes com água. Na Figura 3.15 b) pode ser observado a disposição dos corpos de prova no recipiente com a camada especificada de água pela norma.

Figura 3.15 a) Corpos de prova em estufa até constância de massa. b) Corpos de prova em recipientes com água no ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: Autor (2018).

3.4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os ensaios para verificação da resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de 2, 7, 28, 91 e 180 dias. Os corpos de prova foram retificados antes da ruptura para uma distribuição uniforme da carga, sendo o processo de retífica mostrado na Figura 3.16 a). Em seguida; os corpos de prova foram ensaiados na Máquina Universal de Ensaio EMIC com capacidade de carga de 600 kN (Figura 3.16 b).

Figura 3.16 a) Retífica dos corpos de prova. b) Corpo de prova sendo ensaiado à compressão axial.



Fonte: Autor (2018).

Os modos de ruptura dos corpos de prova podem ser observados na Figura 3.17.

Figura 3.17 Modos de ruptura à compressão axial.



Fonte: Autor (2018).

Os modos de ruptura não foram todos iguais, variando entre o tipo B – Cônica e bipartida e cônica com mais de uma partição, tipo D – cônica e cisalhada, e tipo E – cisalhada.

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, o ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011), nos compósitos cimentícios com idade de 28 dias.

Já para a determinação da resistência à tração na flexão, o ensaio foi realizado conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005) em corpos de prova prismáticos com idade de 28 dias.

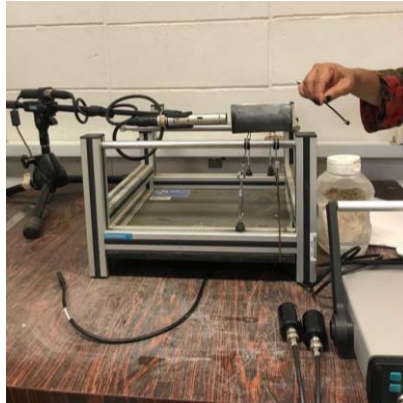
3.4.4 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

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, de acordo com os textos normativos ASTM E1876-01 (2001) e ASTM C215-02 (2003). O ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas da Universidade de São Paulo, campus de São Carlos. A leitura foi realizada nos corpos de prova com idade de 28 dias.

Primeiramente as amostras foram pesadas, em seguida posicionadas no pórtico de ensaio, Figura 3.18, acionando o microfone que captura a frequência natural dos corpos de prova. 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, a partir das dimensões e da massa do corpo de prova, calcula os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos e o do coeficiente de Poisson dinâmico.

Figura 3.18 - Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Autor (2018).

3.4.5 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

O ensaio foi realizado de acordo com a metodologia A da NBR 8522 (ABNT, 2017), por módulo secante. 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 3.19. Em seguida o ensaio foi realizado na máquina de ensaios EMIC, com capacidade de carga de 600 kN.

Figura 3.19 - Ensaio de Módulo de Elasticidade Estático.



Fonte: Autor (2018).

3.5 ENSAIOS DE REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

3.5.1 DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO

Esse ensaio foi realizado de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT, 2018), onde foram moldados três prismas de argamassa de seção quadrada de 25x25 mm e comprimento de 285 mm, para cada composição estudada. A nomenclatura adotada é apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Nomenclatura adotada para cada traço estudado - expansão

Nomenclatura do traço	Composição
Cim. P.	Cimento padrão + agregado miúdo + água (Traço 1:2,25:0,47)
CPV	CPV + agregado miúdo + água (Traço 1:2,25:0,47)

Fonte: Autor (2019).

A NBR 15577-4 (ABNT, 2018) indica as frações de agregado miúdo que devem ser utilizadas para a moldagem dos corpos de prova. Como o agregado utilizado neste estudo tem dimensão máxima de 1,2 mm acumulou-se na maior fração indicada pela norma. Na Tabela 3.8 pode-se verificar as frações utilizadas neste estudo.

Tabela 3.8 – Frações de agregado miúdo utilizadas neste estudo.

Peneiras		Quant.	
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 µm	60	594,00
600 µm	300 µm	25	247,50
300 µm	150 µm	15	148,50

Fonte: Autor (2019).

As barras foram moldadas dentro do tempo total de até 2 min e 15 s, do momento em que a argamassa ficou pronta até a moldagem do terceiro corpo de prova.

Em seguida as barras foram mantidas nos moldes por 24 horas. Posteriormente foram desmoldadas, identificadas, Figura 3.20 a), 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 , Figura 3.20 b).

Figura 3.20 a) Barras de argamassa em recipiente; b) Recipientes em estufa ventilada.



Fonte: Autor (2019).

Ao término das 24 horas foi realizada a leitura inicial zero dos corpos de prova e em seguida, as barras foram imersas em um recipiente com solução de NaOH a 1N, Figura 3.21 a), retornando as barras para a estufa em temperatura de $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$, Figura 3.21 b).

Figura 3.21 a) Preparo da solução de NaOH; b) Recipientes com água e com NaOH.



Fonte: Autor (2019).

Foram efetuadas leituras zero, nas idades de 16 e 30 dias e em duas idades intermediárias, aos 5 e aos 18, todas realizadas aproximadamente na mesma hora do

dia. Inicialmente retirou-se o excesso de solução, Figura 3.22 a) e em seguida foram realizadas as medidas, Figura 3.22 b).

Figura 3.22 a) – Retirada do excesso de solução; b) Leitura da barra.



Fonte: Autor (2019).

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

3.5.2 DETERMINAÇÃO DA MITIGAÇÃO DA EXPANSÃO EM BARRAS DE ARGAMASSA PELO MÉTODO ACELERADO

O ensaio de determinação da mitigação da expansão foi realizado de acordo com a NBR 15577-5 (ABNT, 2018) nas condições apresentadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Nomenclatura adotada para cada traço estudado – mitigação da expansão.

Nomenclatura do traço	Composição
Cim. P. + 8SA.	Cimento padrão + 8% de sílica ativa + agregado miúdo + água
Cim. P.+ VD10	Cimento padrão + VD10 (10% de substituição volumétrica de cimento por pó de vidro) + agregado miúdo + água
Cim. P.+ VD20	Cimento padrão + VD20 (20% de substituição volumétrica de cimento por pó de vidro) + agregado miúdo + água (a/agl: 0,47)
Cim. P.+ VD30	Cimento padrão + VD30 (30% de substituição volumétrica de cimento por pó de vidro) + agregado miúdo + água (a/agl: 0,47)
Cim. P.+ VD50	Cimento padrão + VD50 (50% de substituição volumétrica de cimento por pó de vidro) + agregado miúdo + água (a/agl: 0,47)
REF-SA*	Traço referência com adição de 8% de sílica ativa em massa de aglomerante, 0% de pó de vidro, agregado miúdo, superplastificante, redutor de retração e água (a/agl: 0,194).
VD10*	CPV + 8% de sílica ativa + 10% de substituição volumétrica de cimento por pó de vidro + agregado miúdo + superplastificante + redutor de retração + água (a/agl:0,194)
VD20*	CPV + 8% de sílica ativa em massa de aglomerante + 20% de substituição volumétrica de cimento por pó de vidro + agregado miúdo + superplastificante + redutor de retração + água (a/agl:0,194)
VD30*	CPV + 8% de sílica ativa em massa de aglomerante + 30% de substituição volumétrica de cimento por pó de vidro + agregado miúdo + superplastificante + redutor de retração + água (a/agl:0,194)
VD50*	CPV + 8% de sílica ativa em massa de aglomerante + 50% de substituição volumétrica de cimento por pó de vidro + agregado miúdo + superplastificante + redutor de retração + água (a/agl:0,194)

*Para confecção desses prismas foi realizada uma adaptação da NBR 15577:4 (ABNT, 2018). As quantidades de materiais e o método de moldagem seguem os determinados na caracterização dos compósitos cimentícios.

Fonte: Autor (2019).

A descrição do método utilizado para moldagem dos corpos de prova e andamento do ensaio é descrita no item 3.3.7.

A partir dos dados obtidos com o ensaio foram calculados os resultados de redução da expansão, equação 3.1.

$$R = (100 (E_4 - E_5))/E_4 \quad (3.1)$$

Onde:

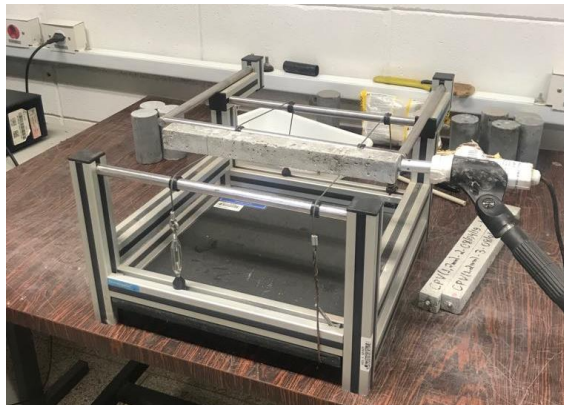
R: é a redução da expansão em porcentagem (%);

E_4 : expansão média das barras em porcentagem (%), de acordo com o método 3.3.6;

E_5 : expansão média das barras em porcentagem (%), de acordo com este método.

Ao final dos ensaios de expansão foram realizados ensaios de acordo com o item 3.4.4 de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, Figura 3.23, para todas as barras de argamassa submetidas à cura agressiva.

Figura 3.23 -Barra de argamassa fixada no comparador de comprimento.



Fonte: Autor (2019).

A realização deste ensaio teve o intuito de comparar o módulo de elasticidade do compósito sem cura agressiva, com o do compósito submetido à cura agressiva com $NaOH$, de modo a determinar a degradação do compósito cimentício aos 30 dias.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os dados dos ensaios em compósitos cimentícios foram analisados pela Análise de Variância (ANOVA), metodologia utilizada para comparar três ou mais tratamentos. Posteriormente 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 entre 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:

H0 – Não existe diferença estatisticamente significativa;

H1 – Há pelo menos um valor com diferente estatisticamente.

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

Se p-valor $\geq \alpha$, aceita-se H0 (não existem diferenças significativas);

Se p-valor $< \alpha$, rejeita-se H0 (há diferenças significativas).

Para os casos onde H0 foi rejeitado realizou-se o teste de Tukey utilizando o software de análises estatísticas Past, de forma a determinar quais valores da amostragem possuem diferenças estatísticas significativas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste estudo, sendo eles de caracterização dos materiais, estudos em pasta, ensaios em compósitos cimentícios e sua devidas análises estatísticas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 CIMENTO CP V E CIMENTO PADRÃO

As características físicas do cimento CP V – ARI e do cimento padrão utilizados na pesquisa, podem ser observadas na Tabelas 4.1.

O cimento padrão foi fornecido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pertence ao lote nº ABCP: 211708 de 2018.

O equivalente alcalino do cimento é dado pela equação 4.1.

$$\text{Equivalente alcalino} = Na_2O + 0,658 K_2O \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 - Características físicas do cimento CP V e do cimento padrão.

Características e propriedades	Valores obtidos para o CPV	Valores obtidos para o cimento padrão***	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)
Massa específica NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,16 g/cm ³	3,07 g/cm ³	*
Início de pega NBR 16607 (ABNT, 2017)	135 min	145 min	≥ 60 min
Fim de pega NBR 16607 (ABNT, 2017)	210 min	225 min	≤ 600 min
Água para pasta de consistência normal	31,0 %	31,6 %	*
Equivalente alcalino	1,88 %	0,85 %	

Tabela 4.1 - Características físicas do cimento CP V e do cimento padrão (continuação).

Características e propriedades		Valores obtidos para o CPV	Valores obtidos para o cimento padrão***	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)
Finura	Retido 75µm (#200)	0,10 %	0,20 %	≤ 6,0%
	Área específica	665 m ² /kg**	491 m ² /kg	*
Resistência à compressão (f_{cj})	1 dia	27,5 MPa	30,6 MPa	≥ 14,0 MPa
	3 dias	42,0 MPa	38,7 MPa	≥ 24,0 MPa
	7 dias	48,7 MPa	42,5 MPa	≥ 34,0 MPa
	28 dias	52,2 MPa	52,9 MPa	*

* Não existem limites estabelecidos na NBR 16697 (ABNT, 2018).

**Ensaio realizado no IPT (2019).

***Ensaio realizado na ABCP (2019).

Fonte: Autor (2019).

As características químicas dos cimentos utilizados podem ser observadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características químicas do cimento CP V e do cimento padrão.

Componentes	Valores obtidos para o CPV (% em massa)	Valores obtidos para o cimento padrão (% em massa) ***	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018) (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	4,05	3,94	≤ 6,5
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	4,31	4,91	*
Óxido de cálcio (CaO)	61,4	61,20	*
Resíduo insolúvel – RI	0,12	0,29	*
Óxido férrico (Fe_2O_3)	2,49	2,68	*
Óxido de potássio (K_2O)	1,74**	0,81	*
Óxido de sódio (Na_2O)	0,74**	0,32	
Óxido fosfórico (P_2O_5)	0,52	-	*
Anidrido silícico (SiO_2)	23,0	18,70	*
Trióxido de enxofre (SO_3)	2,97	3,62	≤ 4,5
Dióxido de tório (ThO_2)	< 0,01	-	*
Óxido de estrôncio (SrO)	0,27	-	*
Anidrido carbônico (CO_2)	-	2,75	
Uraninita (U_3O_8)	< 0,01	-	*

* Não existem limites estabelecidos na NBR 16697 (ABNT, 2018).

** Ensaio realizado IPT (2019).

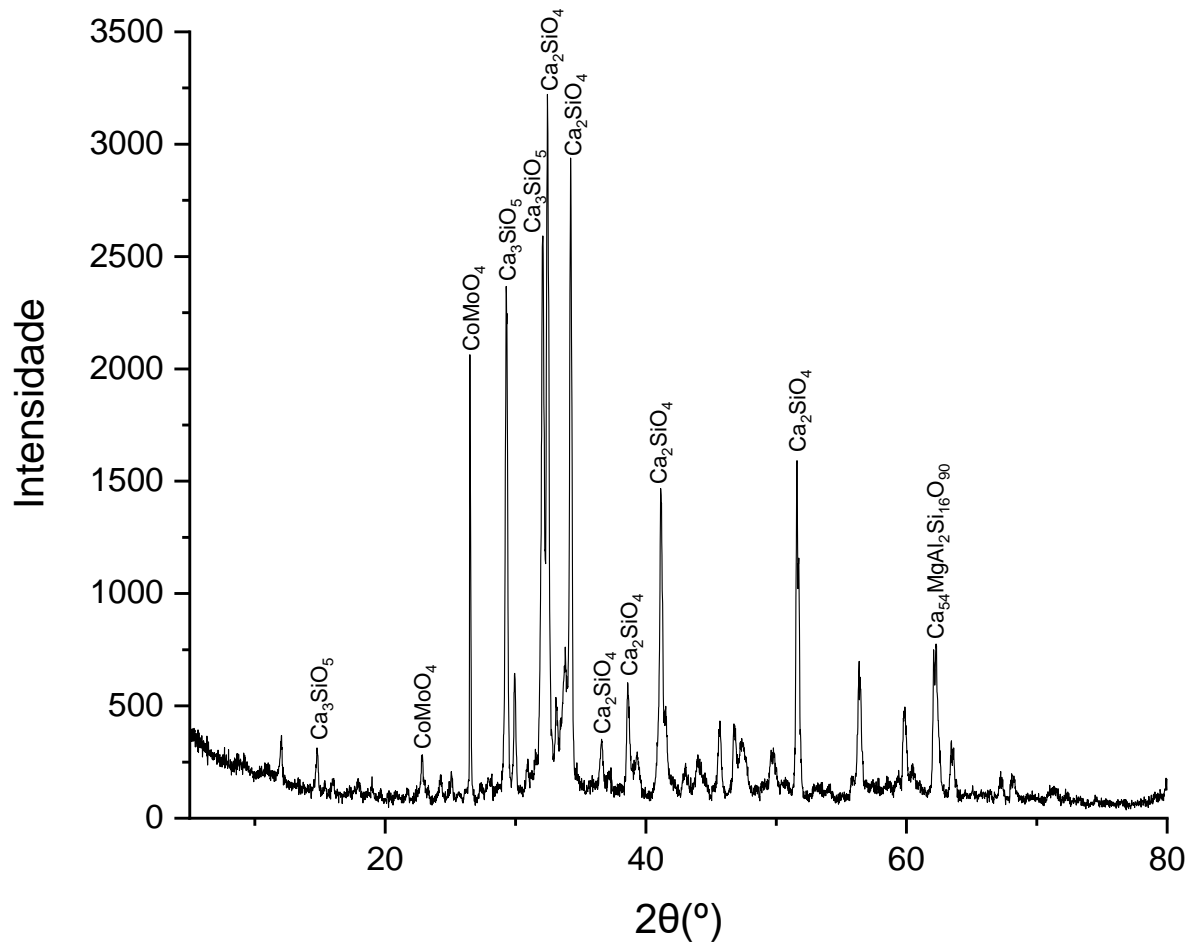
*** Ensaio realizado na ABCP (2019).

Fonte: Autor (2019).

Os requisitos físicos e químicos para o cimento utilizado foram todos atendidos, estando em conformidade com a NBR 16697 (ABNT, 2018).

Os resultados obtidos por DRX do cimento CP V, bem como as fases presentes nos picos, podem ser observados na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Difratoograma da amostra de Cimento Portland CPV ARI.



Fonte: Autor (2019).

Pelo difratograma pode-se observar as seguintes fases: picos de silicato tricálcico (Ca_3SiO_5), picos de molibdato de cobalto ($CoMoO_4$), picos de silicato dicálcico (Ca_2SiO_4) e picos de óxido de alumínio magnésio cálcio ($Ca_{54}MgAl_2Si_{16}O_{90}$), como era esperado.

4.1.2 SÍLICA ATIVA

A sílica ativa utilizada possui 2,25 g/cm³ de densidade. Algumas propriedades do material foram fornecidas pelo fabricante e podem ser observadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - 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. 10,0%	≤ 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: Autor (2019) e Elkem Silicon Materials (2017).

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de FRX da sílica ativa.

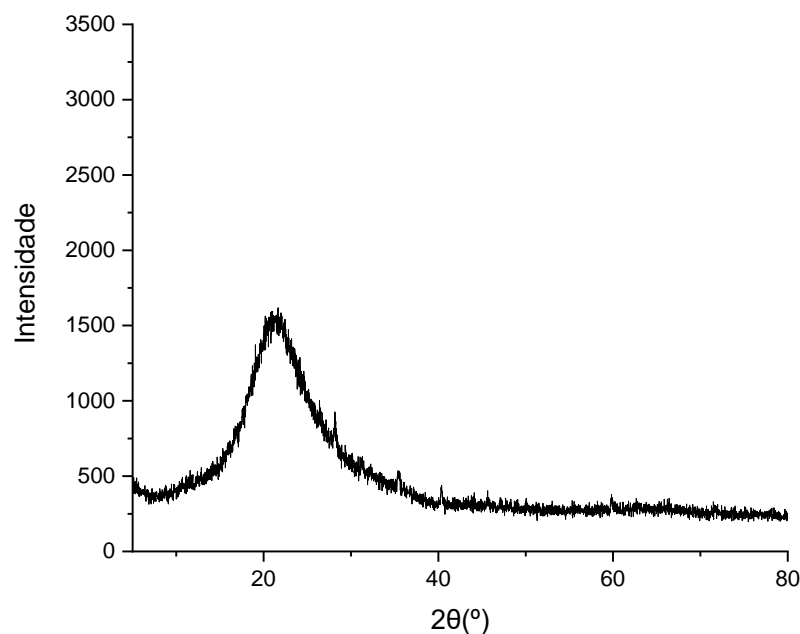
Tabela 4.4 - Composição química da sílica ativa.

Componentes	Valores obtidos (% em massa)	Limites NBR 13956-1 (ABNT, 2012)
Perda ao fogo (PF)	3,60	≤ 6,0 %
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	< 0,20	*
Óxido de cálcio (CaO)	< 0,20	*
Óxido férrico (Fe_2O_3)	< 0,50	*
Óxido de potássio (K_2O)	1,66	*
Óxido de sódio (Na_2O)	0,61	
Anidro silícico (SiO_2)	94,10	≥ 85,0 %
Óxido de estrôncio (SrO)	< 0,20	*
Dióxido de tório (ThO_2)	< 0,01	*
Dióxido de titânio (TiO_2)	< 0,20	*
Uraninita (U_3O_8)	< 0,01	*

*Sem limites estabelecidos na NBR 13956-1 (ABNT, 2012). Fonte: Autor (2019).

Foi realizada análise de DRX para a sílica ativa, conforme a análise realizada para o cimento. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Difratoograma da amostra de sílica ativa utilizada.



Fonte: Autor (2019).

O material é predominantemente amorfo. Esse comportamento é representado pela banda amorfa obtida na análise do DRX.

4.1.3 PÓ DE VIDRO

A densidade obtida para o pó de vidro é de 2,55 g/cm³ e sua superfície específica é de 393 m²/kg. A composição química do pó de vidro foi determinada por FRX e os resultados podem ser observados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Composição química do pó de vidro.

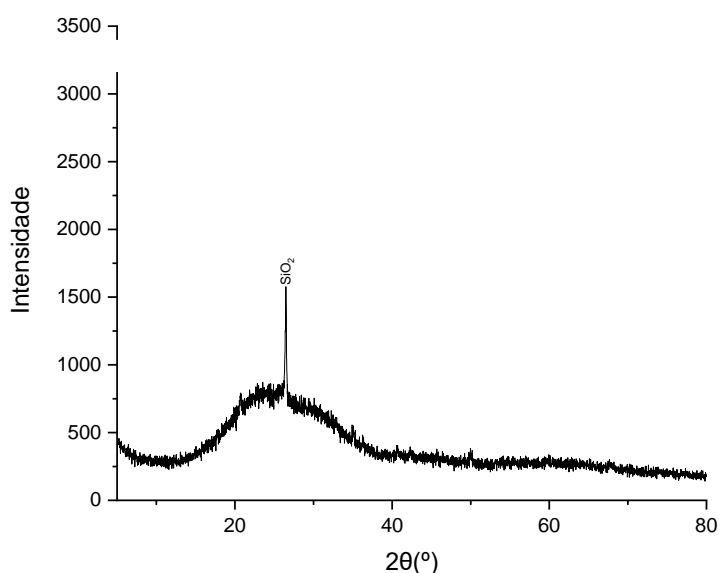
Componentes	Valores obtidos (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	0,58
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	3,7
Óxido de cálcio (CaO)	9,1
Óxido férrico (Fe_2O_3)	0,42

Tabela 4.5 - Composição química do pó de vidro (continuação).

Componentes	Valores obtidos (% em massa)
Óxido de potássio (K_2O)	0,56
Óxido de Magnésio (MgO)	0,74
Óxido de sódio (Na_2O)	11,0
Anidro silícico (SiO_2)	74,0
Óxido de estrôncio (SrO)	0,039
Dióxido de tório (ThO_2)	< 0,01
Óxido de rubídio (Rb_2O)	0,016
Uraninita (U_3O_8)	< 0,01

Fonte: Autor (2019).

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 4.3 é possível verificar os resultados do ensaio.

Figura 4.3 - Difratoograma da amostra do pó de vidro utilizado.

Fonte: Autor (2019).

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, estes materiais são ricos em SiO_2 .

- Análise da atividade pozolânica

Os resultados dos ensaios de atividade pozolânica realizadas com cal aos 7 dias e com cimento aos 28 dias, podem ser observados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Índice de atividade pozolânica do pó de vidro.

Metodologia	Quantidade de CP's	Valores obtidos	Limites NBR 12653 (ABNT, 2014)
NBR 5751 (ABNT, 2015)	3	6,4 MPa	≥ 6 MPa
NBR 5752 (ABNT, 2014)	4	82%	≥ 90%

Fonte: Autor (2018).

O valor obtido no ensaio de determinação de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, não alcançou o limite determinado na NBR 5752 (ABNT, 2014).

O ensaio de Chapelle modificado foi realizado, e a norma aplicada está baseada na metodologia francesa de Chapelle para o metacaulim e 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 . No entanto, alguns estudos como o de Quarcioni *et al.* (2015), questionam a metodologia para outros materiais pozolânicos. Por exemplo, em outros materiais testados, com o aumento da quantidade de CaO de 1 a 2 g, constatou-se um aumento significativo no consumo de CaO . Esse comportamento foi justificado pelos autores como sendo materiais com fases vítreas cuja natureza ou quantidade são tais que não reagem completamente somente com 1 g 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.

Na Tabela 4.7 têm-se o resultado do ensaio de Chapelle modificado.

Tabela 4.7 – Ensaio de Chapelle modificado

Metodologia	Valor obtido em mg $Ca(OH)_2/g$	RAVERDY et al. (1980) ⁴ apud HOPPE FILHO (2008)
NBR 15894 (ABNT, 2015)	654,00	≥ 330 mg $Ca(OH)_2/g$

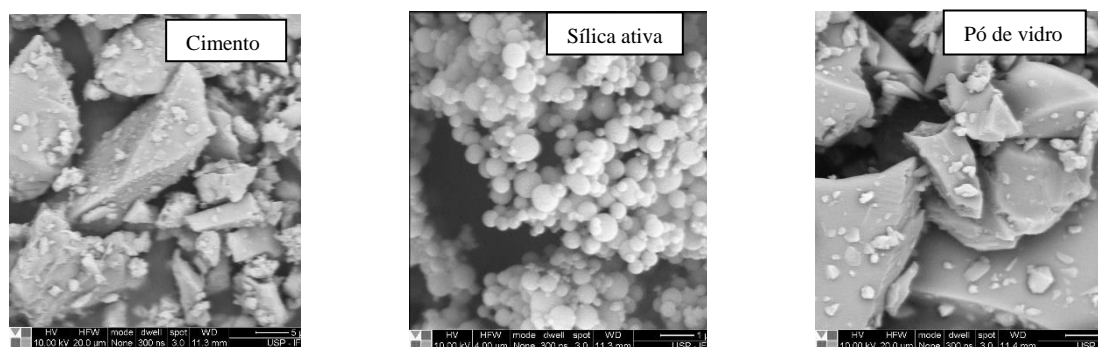
Fonte: Autor (2019).

O consumo do pó de vidro encontra-se acima do consumo mínimo determinado para que o material seja considerado como aglomerante em substituição ao cimento Portland, de acordo com Raverdy *et al* (1980) apud Hoppe Filho (2008).

4.1.4 MORFOLOGIA DOS AGLOMERANTES

Na Figura 4.4, têm-se as micrografias dos aglomerantes utilizados.

Figura 4.4 – Micrografia dos aglomerantes



Fonte: Autor (2019).

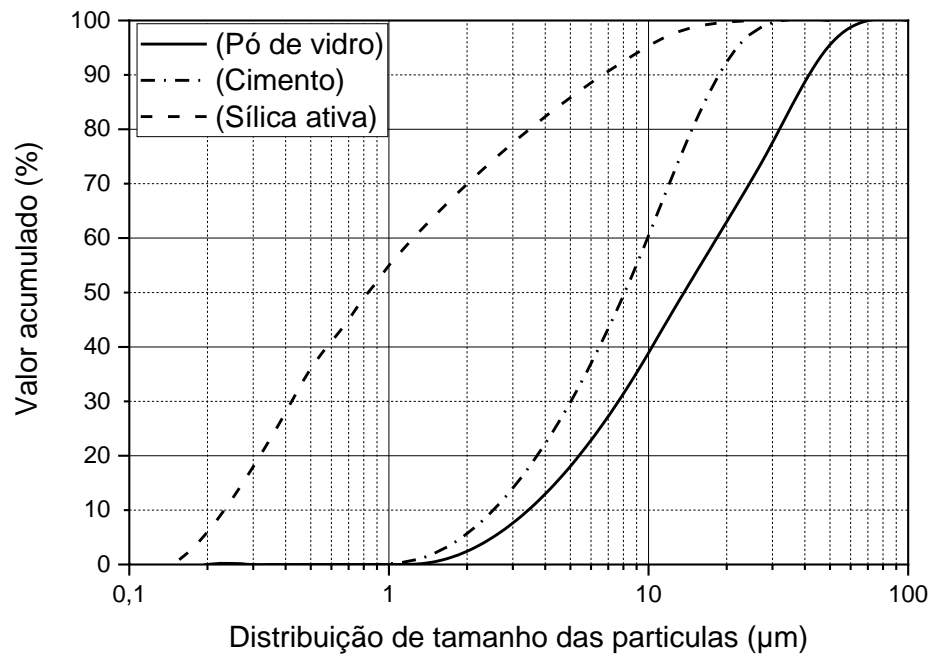
Analisando as micrografias dos aglomerantes pode-se notar uma similaridade entre a morfologia do cimento com a do pó de vidro, ambos com arestas definidas, com forma mais angular. No entanto, a superfície do pó de vidro mostra-se bem mais lisa que a do cimento. Já a sílica ativa apresenta formato arredondado.

4.1.5 GRANULOMETRIA DOS AGLOMERANTES

As curvas de distribuição granulométrica podem ser observadas na Figura 4.5.

⁴ RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLIERE, A. M.; DRON, R. **Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components.** 7th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT. Vol. 3, Paris, France, 1980.

Figura 4.5 – Curvas de distribuição granulométrica dos aglomerantes.



Fonte: Autor (2019).

O d_{50} (mediana) da sílica ativa é de aproximadamente 0,8 µm, o do cimento é de 8 µm e o do pó de vidro, 14 µm.

Nos estudos de Matos (2010), o pó de vidro utilizado foi moído em moinho de bolas por 48 horas e o d_{50} foi de aproximadamente 10 µm. Carsana, Frassoni e Bertolini (2014), utilizaram dois pós de vidro em diferentes granulometrias, sendo um com superfície específica de 598 m²/kg e d_{50} de 9 µm e outro com superfície específica de 409 m²/kg e d_{50} em torno de 15 µm, este com características bem próximas das do pó de vidro utilizado neste estudo (superfície específica igual a 393 m²/kg e d_{50} igual a 14 µm). Zheng (2016) também utilizou um material com granulometria próxima a utilizada nesta pesquisa, com d_{50} em torno de 16 µm. Já nos estudos de Rodier e Savastano (2018), o d_{50} utilizado foi em torno de 11 µm.

Assim, a granulometria do pó de vidro utilizado neste estudo aproxima-se de várias pesquisas realizadas com esse tipo de material.

4.1.6 AGREGADO MIÚDO

A caracterização física do agregado pode ser analisada pela Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Caracterização física do agregado miúdo.

Característica	Metodologia	Agregado utilizado
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (ABNT, 2000)	0,64
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,56
Massa unitária seca e solta (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1475,78
Massa unitária compactada (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1617,83
Impurezas 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, 2001)	1,66

Fonte: Autor (2019).

A composição química do agregado utilizado determinada por FRX pode ser observada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Composição química do agregado miúdo.

Componentes	Valores obtidos (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	0,58
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	3,40
Óxido de cálcio (CaO)	0,07
Óxido de Cromo (Cr_2O_3)	0,05
Óxido férrico (Fe_2O_3)	0,67
Óxido de potássio (K_2O)	1,20
Óxido de sódio (Na_2O)	0,37
Anidro silícico (SiO_2)	94,00
Dióxido de tório (ThO_2)	< 0,01
Dióxido de titânio (TiO_2)	0,35
Uraninita (U_3O_8)	< 0,01

Fonte: Autor (2019).

A grande quantidade de anidro silícico (SiO_2) é justificada pela origem natural do agregado miúdo, sendo esse um material quartzoso.

A composição granulométrica verificada pela porcentagem retida e acumulada em cada uma das peneiras, bem como a determinação da dimensão máxima ($D_{m\acute{a}x}$) e do m\u00f3dulo de finura (MF), podem ser observadas na Tabela 4.10.

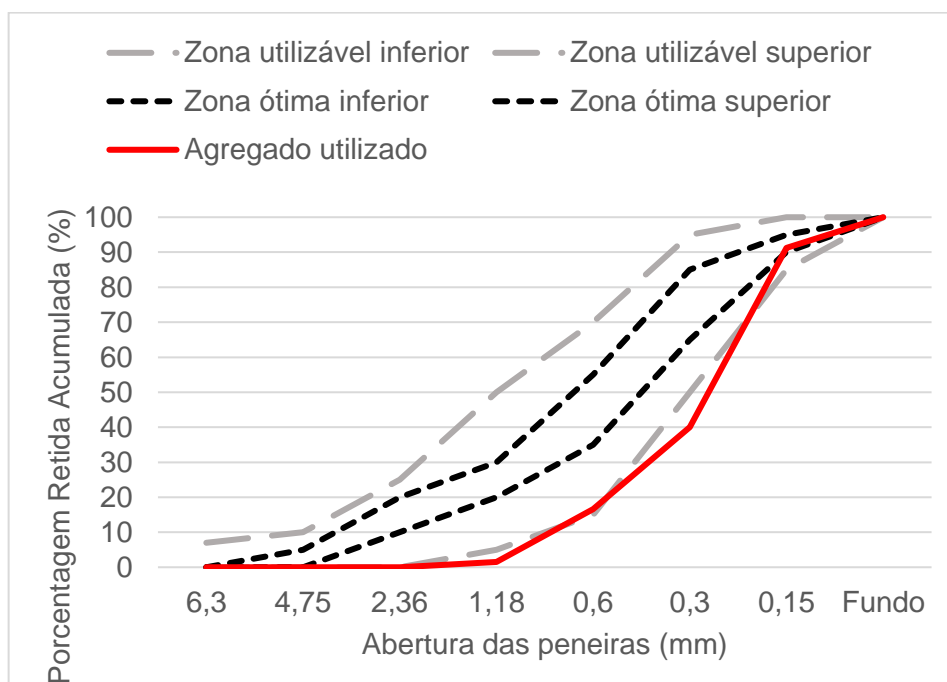
Tabela 4.10 - Composi\u00e7\u00e3o granulom\u00e9trica do agregado utilizado.

Peneira (mm)	% Retida	% 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
	MF	1,49
	$D_{m\acute{a}x}$	1,2 mm

Fonte: Autor (2018).

O gr\u00e1fico de distribui\u00e7\u00e3o granulom\u00e9trica do agregado utilizado pode ser verificado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Distribui\u00e7\u00e3o granulom\u00e9trica do agregado mi\u00fado.



Fonte: Autor (2018).

A curva de distribuição granulométrica do agregado encontra-se muito próxima do limite inferior da zona utilizável, segundo o estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2009). No entanto, é característica de concretos de alto desempenho uma maior quantidade de finos, com a intenção de se obter um melhor empacotamento e uma melhor densificação do compósito cimentício.

4.1.7 ADITIVOS

As propriedades do aditivo superplastificante e do aditivo redutor de retração podem ser observadas nas Tabelas 4.11 e 4.12, respectivamente.

Tabela 4.11 – Propriedades do aditivo superplastificante de base de policarboxilato.

Produto	TEC-FLOW 8000
Aspecto/cor	Líquido/alaranjado
Massa específica (g/cm ³) (NBR 10908)	1,080 -1,120
Teor de sólidos (%)	44,35 – 49,01
pH*	5,52

Fonte: Grace (GCP Applied Technologies), 2017.

*Ensaio realizado no LMC da UFSCar.

Tabela 4.12 - Propriedades do ativo redutor de retração.

Produto	ECLIPSE
Aspecto/cor	Líquido/transparente
Massa específica (g/cm ³) (NBR 10908)	0,910
pH*	5,95

Fonte: Grace (GCP Applied Technologies), 2017.

*Ensaio realizado no LMC da UFSCar.

4.2 ESTUDOS EM PASTA

4.2.1 MINIABATIMENTO

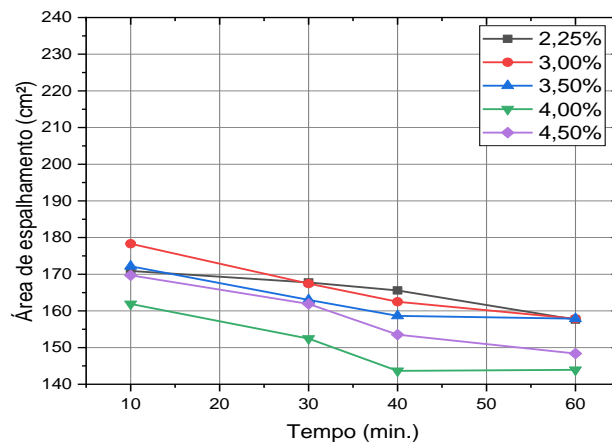
As áreas de espalhamento da pasta de referência (sem vidro) com os diferentes teores de SP podem ser observadas na Tabela 4.13 e Figura 4.7.

Tabela 4.13 – Áreas de espalhamento com diferentes teores de SP.

SP (%)	Área de espalhamento (cm ²)			
	10'	30'	40'	60'
2,25	170,91	167,77	165,57	157,62
3,00	178,30	167,46	162,49	157,89
3,50	172,17	163,00	158,66	157,87
4,00	161,91	152,44	143,65	143,92
4,50	169,71	161,91	153,53	148,37

Fonte: Autor (2018).

Figura 4.7 – Área de espalhamento do composto referência com diferentes teores de SP.



Fonte: Autor (2019).

O espalhamento diminuiu com o aumento do teor de aditivo utilizado. Destaca-se que os teores de aditivo utilizados no ensaio de miniabatimento estão bem acima do recomendado pelo fabricante, uma vez que a quantidade de água a ser utilizada nos compósitos cimentícios é baixa, necessitando de quantidades elevadas de aditivos superplastificantes.

Como pode ser observado na Figura 4.7, o teor que perdeu menos trabalhabilidade durante os primeiros 30 minutos foi o de 2,25% SP, cerca de 2%.

O ensaio foi realizado também para cada uma das pastas com incorporação de pó de vidro, utilizando o teor de 2,25% de SP adotado. Mediu-se as áreas de espalhamento aos 10, 30, 40 e 60 minutos. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.14.

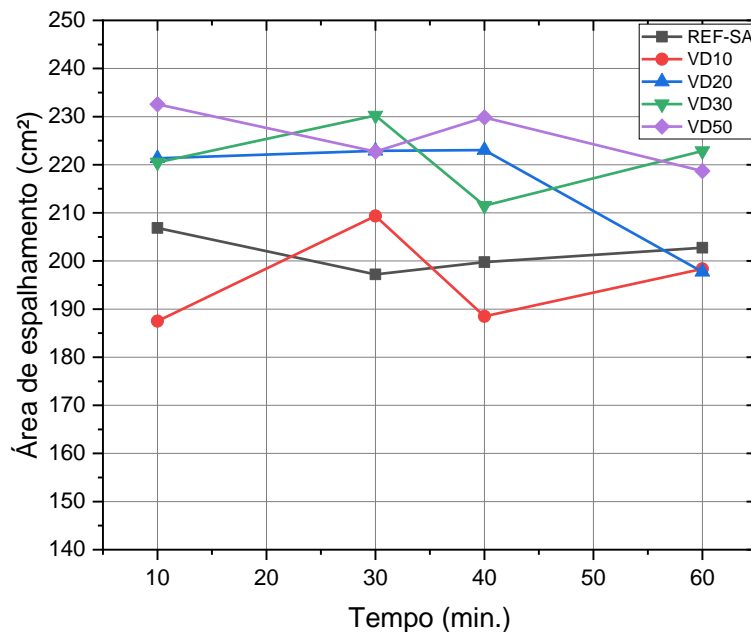
Tabela 4.14 - Miniabatimento dos traços com 2,25% de SP

Pastas	Área de espalhamento (cm ²)			
	10'	30'	40'	60'
REF-SA	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: Autor (2018).

A Figura 4.8 apresenta o gráfico com curvas das áreas de espalhamento por tempo para cada pasta analisada.

Figura 4.8 – Área de espalhamento da pasta de referência e com incorporação de pó de vidro com 2,25% de superplastificante.



Fonte: Autor (2019).

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-SA e VD50, apresentaram diminuição na área de espalhamento de 4,7 e 4,2% respectivamente.

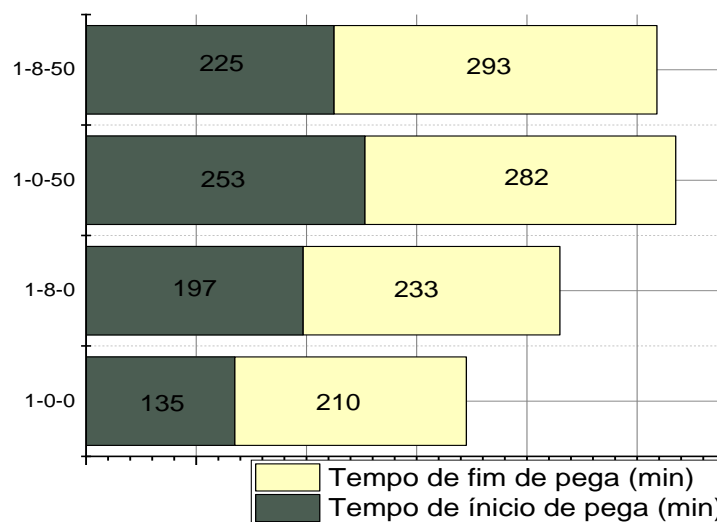
Observando os 60 minutos de ensaio, a pasta que apresentou maior queda no espalhamento foi a VD20, chegando a diminuir 10,7% na sua área da medida inicial até a última aferição.

A incorporação do pó de vidro não interferiu na trabalhabilidade das pastas estudadas na presença dos aditivos. As pastas com VD10, VD20 e VD30, apresentaram comportamento semelhante, e a pasta VD50 semelhante à REF-SA. Os valores encontrados nas áreas de espalhamento não apresentaram grandes discrepâncias. Nos primeiros 30 minutos de mistura o teor que perdeu mais trabalhabilidade foi o REF-SA, porém somente 5%, demonstrando a compatibilidade do cimento, pó de vidro e superplastificante empregados.

4.2.2 TEMPO DE PEGA

O ensaio de tempo de pega foi realizado para 4 pastas, 1-0-0 (Cimento CPV), 1-8-0 (CPV + 8% de sílica ativa), 1-0-50 (CPV + 50% de pó de vidro) e 1-8-50 (CPV + 8% de sílica ativa + 50% de pó de vidro). Os resultados do ensaio podem ser observados na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Determinação dos tempos de início e fim de pega.



Fonte: Autor (2019).

Em relação à pasta 1-0-0, todas as outras pastas tiveram um aumento no tempo de início e de fim de pega, sendo a pasta 1-0-50 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 valor para o tempo de fim de pega foi de 1-8-50 em 83 minutos.

Segundo Sharifi, Afshoon e Firoozjaie (2015), o aumento nos tempos de início e fim de pega podem ser atribuídos 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.

4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

O traço unitário e o índice de consistência dos compósitos cimentícios podem ser observados na Tabela 4.15. A relação água/aglomerante das misturas foi fixada em a/agl: 0,194.

Tabela 4.15 - Traço unitário e índice de consistência.

Traço	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	SP**	RR***	Consistência (mm)
REF-SA	1,00	0,08	0,00	1,07	0,02	0,01	380,0
VD10	1,00	0,09	0,09	1,19	0,03	0,01	377,0
VD20	1,00	0,10	0,20	1,34	0,03	0,01	375,5
VD30	1,00	0,11	0,35	1,53	0,03	0,01	381,5
VD50	1,00	0,16	0,81	2,15	0,05	0,02	384,5

Fonte: Autor (2019).

Analisando-se resultados, é possível observar que todas as consistências ficaram acima do mínimo adotado de $(310 \pm 10 \text{ mm})$ e a incorporação de pó de vidro não alterou a consistência da mistura, quando comparada com a referência, resultado confirmado também pelos 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).

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).

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

4.4.1 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 4.16.

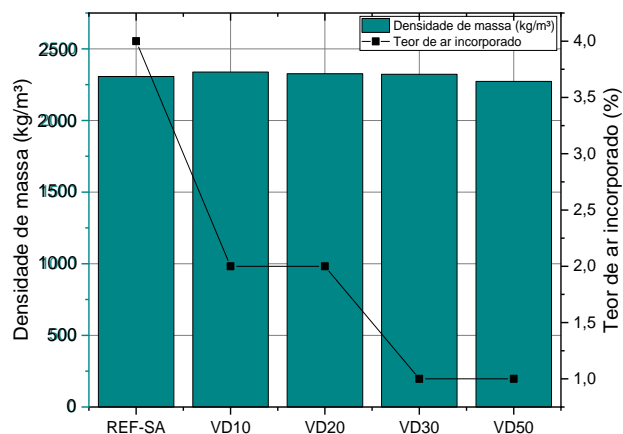
Tabela 4.16 - Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.

Traço	Densidade de massa (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
REF-SA	2307	4,0
VD10	2338	2,0
VD20	2326	2,0
VD30	2322	1,0
VD50	2273	1,0

Fonte: Autor (2018).

A Figura 4.10 apresenta um gráfico com uma correlação dos valores de densidade de massa e teor de ar incorporado, obtidos nos ensaios.

Figura 4.10 - Gráfico com os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.



Fonte: Autor (2019).

Os valores de densidade de massa dos compósitos cimentícios VD10, VD20 e VD30 são maiores que REF-SA em torno de 1%, valores relativamente pequenos e com poucas diferenças entre eles.

Em relação ao teor de ar incorporado, pode ser observada a diminuição do teor com o aumento de teor de pó de vidro na mistura. Segundo Sharifi, Afshoon e Firoozjaie (2015), isso pode ser atribuído ao aumento no teor de água livre na mistura, devida à baixa absorção de água pelo pó de vidro e também à melhor capacidade de preenchimento das partículas de vidro na mistura (efeito fíler).

4.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados obtidos de absorção de água por capilaridade, para 7, 28 e 180 dias, bem como, sua altura de ascensão ao final das 72 horas de ensaio podem ser observados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 7, 28 e 180 dias.

Traço	Absorção de água por capilaridade ao final do ensaio em 72 horas (g/cm ²)					
	7 dias	Altura de ascensão (mm)	28 dias	Altura de ascensão (mm)	180 dias	Altura de ascensão (mm)
REF-SA	0,099		0,079		0,126	2,64
VD10	0,108		0,077		0,149	2,49
VD20	0,121	< 1	0,092	< 1	0,143	2,96
VD30	0,141		0,091		0,163	4,12
VD50	0,134		0,088		0,158	4,33

Fonte: Autor (2019).

Partículas de vidro muito finas preenchem fisicamente os poros capilares, reduzindo a absorção capilar (MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012).

No entanto, esse comportamento não foi observado nos compósitos cimentícios com idade de 7 dias, onde a absorção de água de VD50 ao final do ensaio foi maior que o REF-SA em 26%, devido ao teor de cimento na mistura. Outro fato importante é que a altura de ascensão da lâmina de água foi menor que 1 mm.

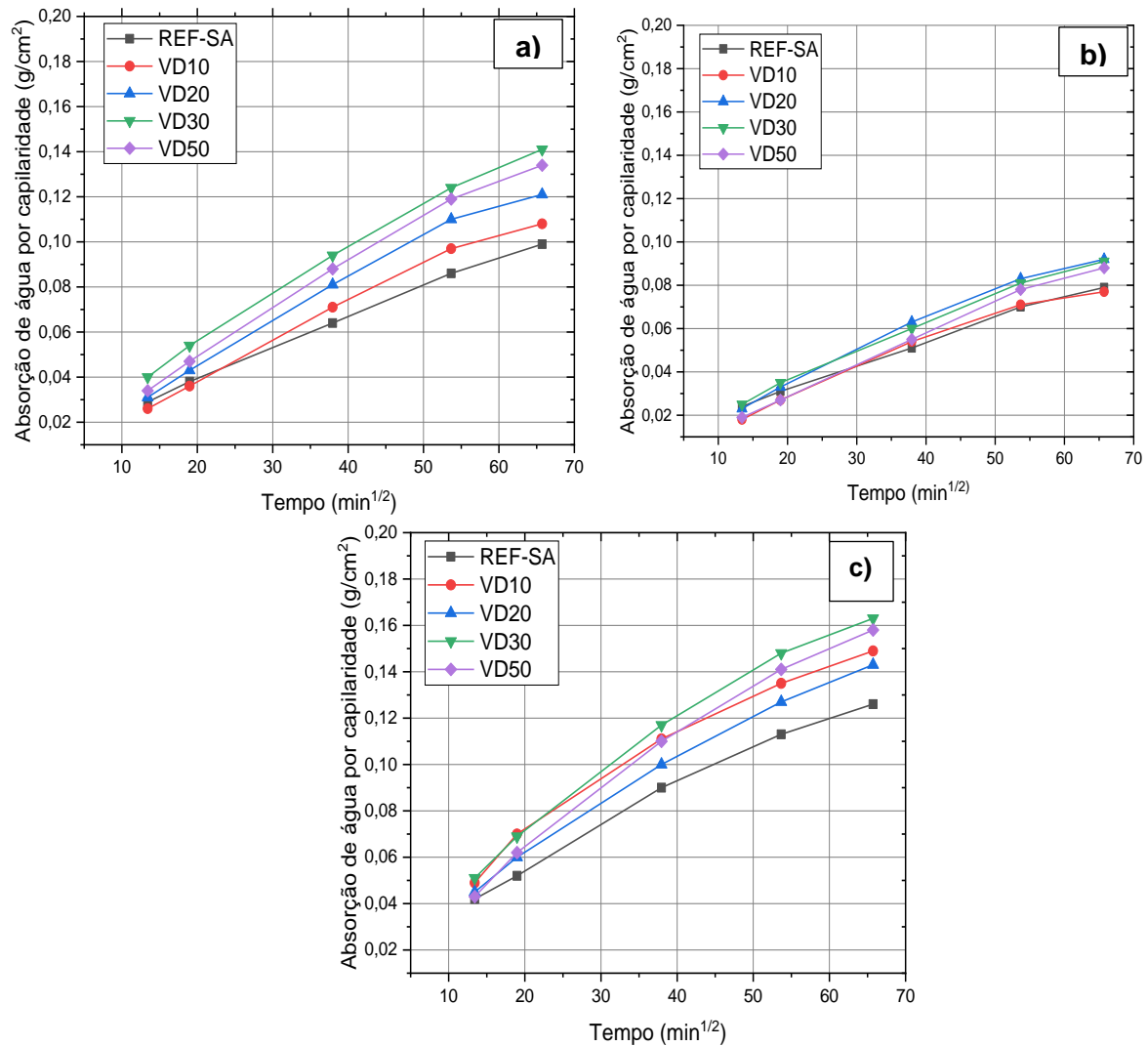
Mesmo com uma pequena diferença na absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios estudados em relação ao esperado (de quanto maior o teor de pó de vidro menor seria a absorção de água, de acordo com MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012), em 7 dias devido a uma velocidade de hidratação mais lenta dos compósitos cimentícios com a incorporação de pó de vidro, esse comportamento não pode ser observado. Mesmo assim a absorção por capilaridade apresentou valores muito baixos, obtendo em 7 dias o valor máximo de coeficiente de absorção de água por capilaridade de 0,141 g/cm² após 72 h de ensaio para o compósito cimentício VD30.

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 7 dias de idade, como era esperado.

No entanto, esperava-se uma absorção de água por capilaridade na idade de 180 dias menor que aos 7 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 13% na absorção de água quando comparado com 7 dias e, fazendo-se a comparação com o resultado obtido aos os 28 dias, na idade de 180 dias houve um aumento 44%. 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).

Na Figura 4.11 são apresentados gráficos comparando o comportamento dos diferentes compósitos cimentícios estudados ao longo do ensaio nas idades de 7, 28 e 180 dias.

Figura 4.11 – 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: Autor (2019).

Na execução do ensaio notou-se que os corpos de prova mesmo atingindo constância de massa, quando abertos, apresentavam um aspecto úmido. Esse comportamento pode ser atribuído devido a uma característica dos corpos de prova de apresentarem uma alta compactidade.

4.4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

As resistências à compressão axial dos compósitos cimentícios podem ser observadas a seguir. Na Tabela 4.18 são apresentadas as resistências à compressão axial dos compósitos cimentícios com 2, 7, 28 e 180 dias de idade.

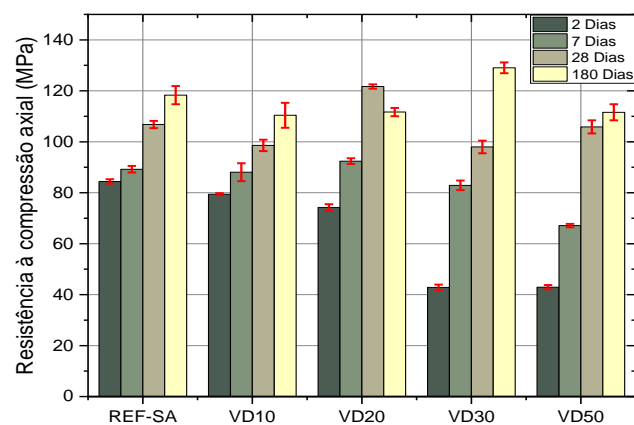
Tabela 4.18 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos 2, 7, 28 e 180 dias.

Traço	Resistência à compressão axial (MPa)											
	2 dias			7 dias			28 dias			180 dias		
	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
REF-SA	84,43	0,88	1,04	89,23	1,31	1,47	106,81	1,42	1,33	118,31	3,58	3,03
VD10	79,43	0,41	0,51	88,06	3,52	4,00	98,58	2,26	2,29	110,41	4,89	4,43
VD20	74,23	1,30	1,75	92,41	1,13	1,22	121,69	0,85	0,70	111,69	1,63	1,46
VD30	42,83	1,11	2,59	82,91	1,88	2,27	97,99	2,48	2,53	129,03	2,12	1,65
VD50	42,95	0,84	1,96	67,12	0,68	1,01	105,86	2,58	2,44	111,58	3,15	2,82

Fonte: Autor (2019).

Na Figura 4.12 é apresentada uma comparação dos resultados de compressão axial em todas as idades analisadas.

Figura 4.12 - Comparação dos resultados à compressão axial dos compósitos cimentícios.



Fonte: Autor (2019).

É possível observar na Figura 4.12, que o incremento de carga foi gradual conforme o aumento das idades de ruptura.

Diferente do que ocorreu com as amostras nas primeiras idades de 2, 7 e 28 dias, os resultados da análise estatística aos 180 dias das amostras não apresentaram diferenças estatísticas entre os valores obtidos nos ensaios. Houve uma maior uniformidade nos valores e o maior valor de resistência aos 180 dias foi de VD30 com 129,03 MPa.

De acordo com DU e TAN (2015), 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 a sílica dissolvida do pó de vidro reagir com solução de poros formando C-S-H ao longo do tempo. A microestrutura do compósito de pasta de cimento-pó de vidro torna-se mais densa quanto maior o tempo de cura, e isso ocorre devido à reação pozolânica contínua do pó de vidro (DU; TAN, 2015). Nos ensaios realizados por Du e Tan (2015) aos 91 dias, o aumento na resistência à compressão é ainda mais distinto, tendo o maior aumento de 25% para a mistura de concreto com 30% de pó de vidro, em comparação com a mistura de concreto referência. Posteriormente, o pó de vidro pode reagir com o hidróxido de cálcio da hidratação do cimento, resultando em uma microestrutura mais densa para a pasta de cimento.

Ibrahim e Meawad (2018) utilizando pó de vidro sodocálcico com partículas de 20 μm e 20% de pó de vidro em substituição ao cimento obteve em seu estudo após 90 dias de cura uma resistência à compressão somente 2% menor com substituição em relação ao compósito de controle. Os autores afirmam que o pó de vidro soda cal é um material pozolânico promissor na substituição do cimento nos compósitos cimentícios não afetando propriedades mecânicas.

Nos estudos de Matos (2010) onde a pesquisadora realizou ensaios até 90 dias de resistência à compressão axial, utilizando pó de vidro com d_{50} de 11 μm e substituição de cimento por pó de vidro nos teores de 10 e 20%, foi possível observar um decréscimo na resistência à compressão para todas as idades comparando com o material referência. No entanto, a autora afirma que a tendência é de que a perda de resistência à compressão axial diminua ao longo do tempo e seja uma porcentagem

maior quanto maior o teor de pó de vidro. Comportamento observado também nesse estudo onde as resistências à compressão axial aos 180 dias foram maiores que nas outras idades e o valor de resistência equivalente à REF-SA estatisticamente.

- **Eficiência do cimento e dos aglomerantes em relação à resistência à compressão**

Mesmo com o alto consumo de cimento pode-se observar uma alta eficiência dos aglomerantes levando em consideração o consumo destes e a resistência à compressão axial aos 28 dias de idade, conforme a Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Eficiência do consumo de cimento e aglomerantes em relação à resistência à compressão dos compósitos cimentícios aos 28 dias.

Traço	Cimento (kg/m ³)	Pó de vidro (kg/m ³)	Sílica (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Eficiência do cimento (kg/m ³ .MPa ⁻¹)	Eficiência dos aglomerantes (kg/m ³ .MPa ⁻¹)
REF-SA	1035,69	0,00	82,86	106,81	9,70	10,47
VD10	928,86	83,60	83,60	98,58	9,42	11,12
VD20	831,41	166,28	83,14	121,69	6,83	8,88
VD30	724,50	253,58	79,70	97,99	7,39	10,79
VD50	516,78	418,59	82,68	105,86	4,88	9,62

Fonte: Autor (2019).

Os valores de eficiência do cimento para o traço de VD50 é de 4,88 kg/m³.MPa⁻¹, valor quase duas vezes menor que o valor da eficiência do cimento para o traço de REF-SA, que é o que se espera chegar a bons resultados de resistência à compressão axial com um menor consumo de cimento.

4.4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 e aos 180 dias de idade dos compósitos cimentícios podem ser observados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Resistência à tração por compressão diametral dos compósitos com 28 e 180 dias de idade.

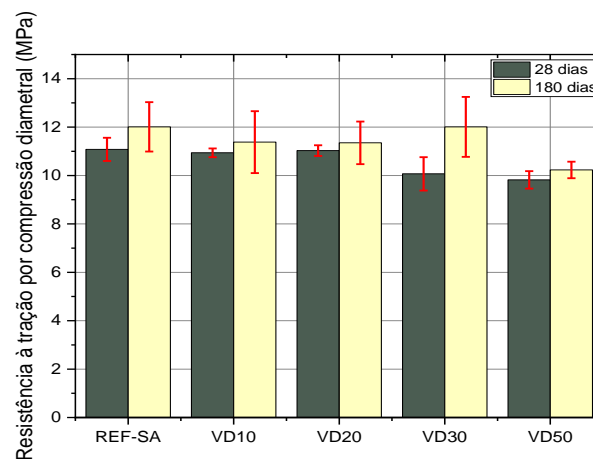
Traço	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)					
	28 dias			180 dias		
	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
REF-SA	11,08	0,48	4,33	12,01	1,02	8,49
VD10	10,94	0,18	1,68	11,38	1,28	11,25
VD20	11,03	0,22	2,03	11,35	0,88	7,76
VD30	10,07	0,69	6,87	12,01	1,24	10,34
VD50	9,82	0,36	3,64	10,23	0,34	3,30

Fonte: Autor (2019).

O mesmo comportamento dos ensaios de resistência à compressão axial pode ser observado nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, onde aos 28 dias de resistência à tração por compressão diametral houve uma diferença estatística dentro da amostra, onde VD50 apresentou valores diferentes estatisticamente de REF-SA e VD20. No entanto, aos 180 dias os valores das amostras são estatisticamente equivalentes.

Na Figura 4.13, é possível comparar os resultados obtidos para todos os traços estudados nas idades de 28 e 180 dias.

Figura 4.13 - Resultados de tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios.



Fonte: Autor (2019).

Os maiores valores de resistência à tração por compressão diametral foram de REF-SA 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.

4.4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

Os resultados obtidos para a resistência à tração por flexão aos 28 dias, podem ser analisados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Resultados de resistência à tração por flexão.

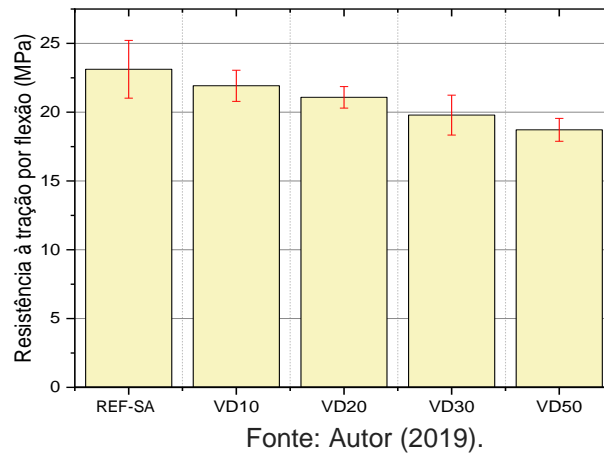
Traço	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
REF-SA	23,12	2,10	9,10
VD10	21,92	1,13	5,18
VD20	21,08	0,78	3,69
VD30	19,79	1,45	7,33
VD50	18,72	0,83	4,42

Fonte: Autor (2018).

Analisando estatisticamente os resultados, pode-se constatar que o único traço diferente estatisticamente é o de REF-SA comparando com VD50, sendo o VD50 inferior ao compósito 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 esse compósito o de hidratação mais lenta em relação aos outros.

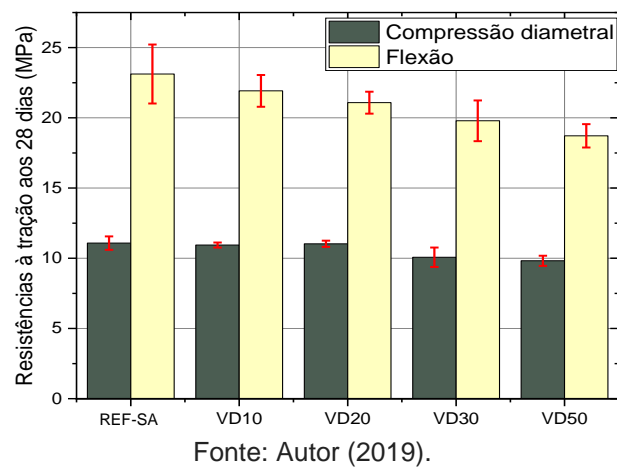
Na Figura 4.14, é possível visualizar uma comparação entre os valores obtidos de resistência à tração por flexão para os compósitos cimentícios de referência e com incorporação de pó de vidro.

Figura 4.14 - Resultados de resistência à tração na flexão.



Na Figura 4.15 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos para tração por compressão diametral e tração por flexão aos 28 dias.

Figura 4.15 - Tração por compressão diametral e tração por flexão aos 28 dias.



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 e à tração por flexão tendem a seguir a mesma tendência dos corpos de prova rompidos de compressão axial, que é de desenvolver uma maior resistência em idades mais avançadas.

4.4.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO

A Tabela 4.22 apresenta os resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos cimentícios aos 28 dias de ensaios.

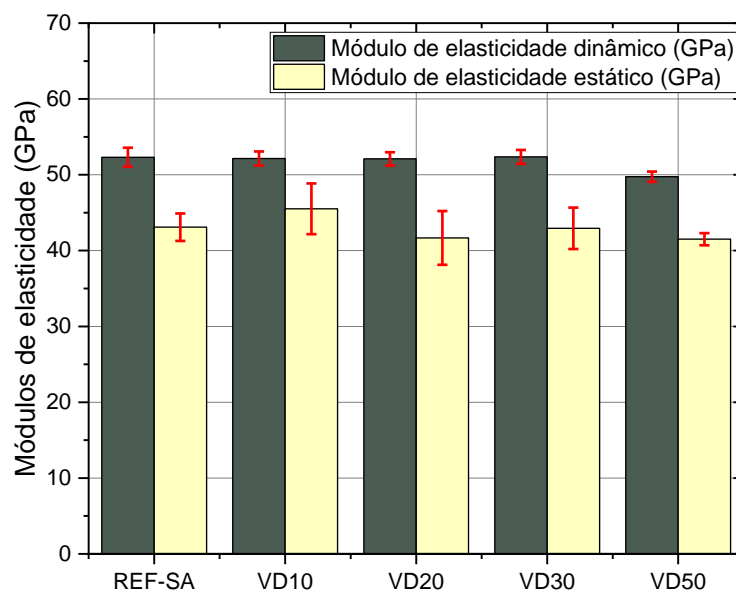
Tabela 4.22 – Módulos de elasticidade dinâmico e estático aos 28 dias de idade.

Traço	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)			Módulo de elasticidade estático (GPa)		
	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)	Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)
REF-SA	53,31	1,26	2,36	43,09	1,81	4,21
VD10	52,15	0,93	1,78	45,51	3,35	7,36
VD20	52,10	0,88	1,69	41,67	3,54	8,50
VD30	52,37	0,91	1,74	42,94	2,73	6,36
VD50	49,75	0,67	1,35	41,51	0,80	1,92

Fonte: Autor (2019).

O resultado obtido do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos cimentícios aos 28 dias pode ser observado na Figura 4.16.

Figura 4.16 - Comparação dos módulo de elasticidade dinâmico e estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias.



Fonte: Autor (2019).

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 concretos com resistência à compressão em torno de 100 MPa. Esse comportamento pode ser explicado pela baixa relação água/cimento utilizada das misturas e pela incorporação de sílica ativa e pó de vidro, que proporcionam alteração da microestrutura com compósitos, pelo efeito fíler e pozolânico das adições, densificando a matriz.

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.

4.4.7 EXPANSÃO DAS BARRAS DE ARGAMASSA

Para utilização do pó de vidro em compósitos cimentícios, a investigação do comportamento destes frente à reação álcali-sílica é de extrema importância.

Os resultados obtidos das variações dimensionais das barras de argamassa de referência podem ser observados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Variações dimensionais das barras de argamassa de referência submetidas à cura agressiva de $NaOH$.

Barras de argamassa	Variações dimensionais médias por idade de cura agressiva (%)			
	5 dias	16 dias	18 dias	30 dias
Cimento padrão	0,10	0,16	0,17	0,18
CP V	0,03	0,07	0,21	0,24

Fonte: Autor (2019).

A análise estatística foi realizada para os resultados das variações dimensionais ao final do ensaio aos 30 dias e chegou-se a seguinte conclusão: deve-se **rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são estatisticamente diferentes.

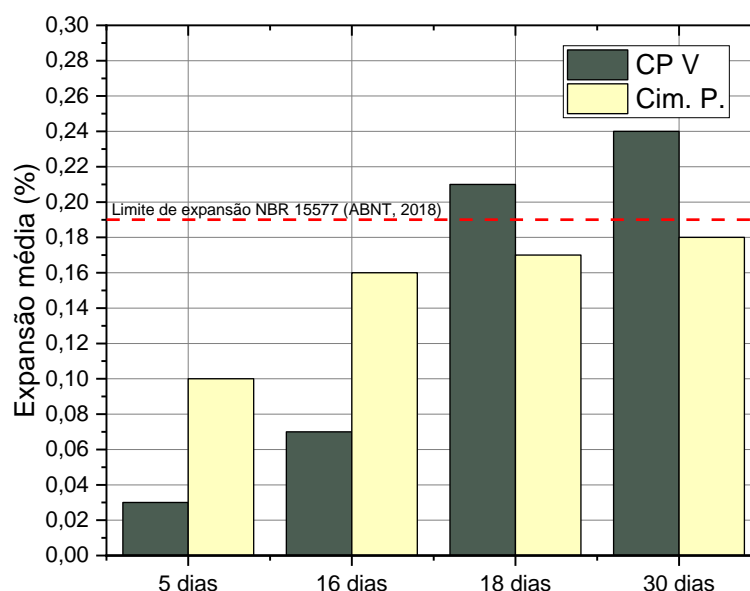
De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018) um das classificações do grau de reatividade do agregado é dada pelo ensaio realizado pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018), no qual para que o agregado seja classificado como potencialmente reativo

grau R1 a expansão em barras de argamassa aos 30 dias deve estar entre 0,19 e 0,40%.

Na Tabela 4.23 nota-se que somente as barras de argamassa moldadas com cimento CP V com agregado miúdo apresentaram a classificação de potencialmente reativo grau R1. Já as barras de cimento padrão estão abaixo desse limite e são classificadas de acordo com a norma como potencialmente inócuas grau R0.

Na Figura 4.17 é possível ver a comparação do comportamento das barras de cimento padrão e do CP V no decorrer do ensaio.

Figura 4.17 – Comparativo das expansões médias entre os cimentos CP V e Padrão.



Fonte: Autor (2019).

O cimento CP V apresentou valores de expansão ao final do ensaio, aos 30 dias, em torno de 33% maior que o cimento padrão. De acordo com a Tabela 4.1, observa-se que o CP V apresentou um equivalente alcalino maior do que o cimento padrão, que foi de 1,88% em comparação com o cimento padrão que tem equivalente alcalino de 0,85%, ou seja, o equivalente alcalino do CP V é mais que o dobro do cimento padrão. Com um maior equivalente alcalino, há uma maior disponibilidade de álcalis do cimento, um dos principais aspectos envolvidos na reação álcali-sílica.

Outro fator que deve ser considerado na maior reatividade do CP V é a finura dele, este apresenta área específica de 665 m²/kg, enquanto o cimento padrão

apresenta área específica de 491 m²/kg. Uma maior finura do material é relacionada a uma maior reatividade.

Para uma melhor investigação dos materiais mitigadores utilizados neste estudo moldou-se barras de argamassa com cada um destes, e nas devidas proporções, com cimento padrão nas condições indicadas de dosagem pela NBR 15577 (ABNT, 2018).

4.4.8 MITIGAÇÃO DA EXPANSÃO DA BARRAS DE ARGAMASSA

Na Tabela 4.24 observa-se os resultados das variações dimensionais obtidas nos ensaios de barras de argamassa de cimento padrão, cimento padrão com sílica ativa e cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro.

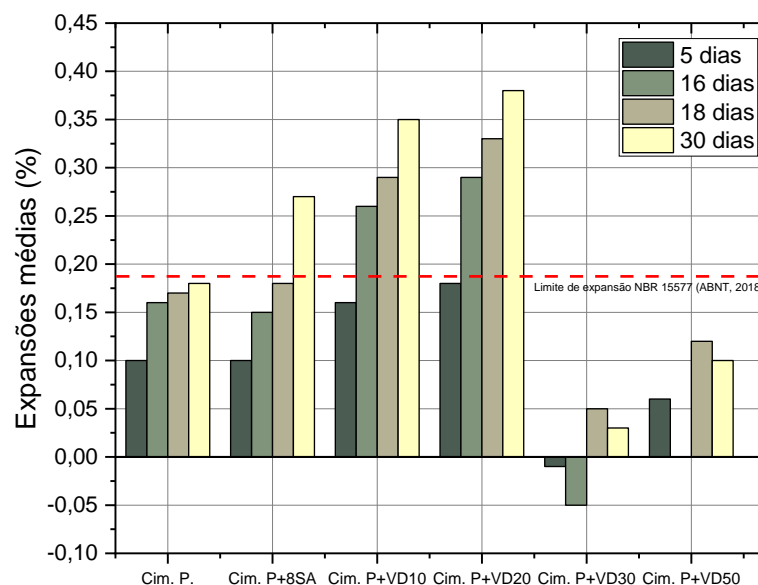
Tabela 4.24 – Variações dimensionais das barras de argamassa de cimento padrão com sílica e cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.

Barras de argamassa	Variações dimensionais médias por idade de cura agressiva (%)			
	5 dias	16 dias	18 dias	30 dias
Cimento padrão	0,10	0,16	0,17	0,18
Cim. P. + 8SA	0,10	0,15	0,18	0,27
Cim. P. + VD10	0,16	0,26	0,29	0,35
Cim. P. + VD20	0,18	0,29	0,33	0,38
Cim. P. + VD30	-0,01	-0,05	0,05	0,03
Cim. P. + VD50	0,06	0,00	0,12	0,10

Fonte: Autor (2019).

O gráfico comparativo entre as expansões das barras de argamassa pode ser observado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Comportamento médio das expansões com cimento padrão e vidro como adição além da sílica ativa.



Fonte: Autor (2019).

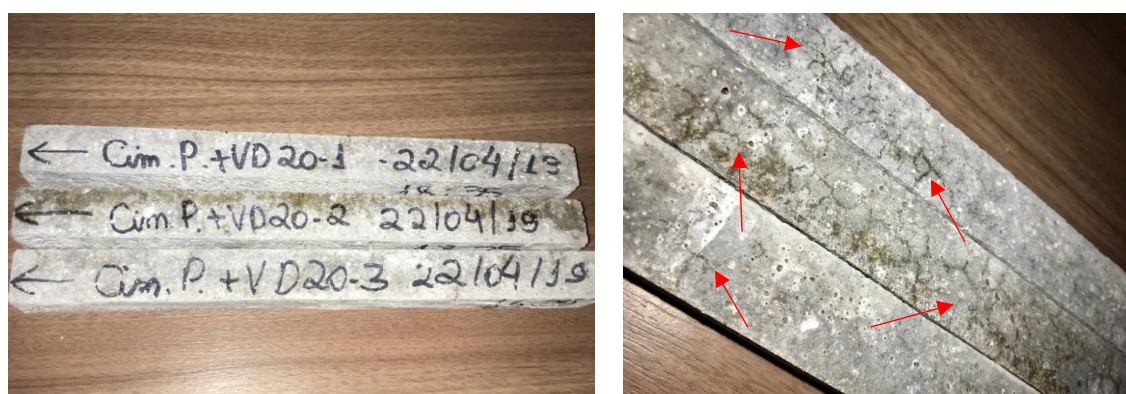
Nota-se que os valores encontrados para Cim. P+8SA, Cim. P. + VD10 e Cim. P. +VD20 ficaram acima dos valores estabelecidos pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018) aos 30 dias de ensaio, em 26, 73 e 94% respectivamente agravando as expansões em relação à condição da referência (Cim. P.). No entanto, as misturas com 30 e 50% de incorporação de pó de vidro (Cim.P+VD30 e Cim.P+VD50) apresentaram diminuição do valor da expansão das barras de argamassa, mitigando a reação álcali-sílica.

A análise estatística foi realizada ao final do ensaio, 30 dias após moldagem e 28 dias após cura agressiva e todos os valores apresentaram diferenças significativa entre eles.

Salienta-se que de todos os traços moldados, somente os traços de Cim. P. + VD10 e Cim. P. + VD20, apresentaram fissuras na superfície até a idade de 30 dias, ao final dos ensaios. Na Figura 4.19 são apresentadas as barras de Cim. P. + VD10 e na Figura 4.20 as barras de Cim. P. + VD20.

Figura 4.19 – Barras de argamassa de Cimento Padrão + VD10.

Fonte: Autor (2019).

Figura 4.20 – Barras de argamassa de Cimento Padrão + VD20.

Fonte: Autor (2019).

O cálculo da mitigação da reação álcali-sílica foi realizado de acordo com a NBR 15577-5 (ABNT, 2018) e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.25; a mitigação da expansão da reação álcali-sílica foi calculada a partir do resultado da expansão das barras de cimento padrão.

Na análise de mitigação os valores apresentados na tabela como negativos, exemplo -6%, são valores que intensificam as expansões e os valores positivos, exemplo 6%, diminuem as expansões nessa porcentagem.

Tabela 4.25 – Mitigação da reação álcali-sílica de acordo com a ABNT NBR 15577-5 (ABNT, 2018) das barras de argamassa com cimento padrão com sílica e cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.

Barras de argamassa	Mitigação (%)			
	5 dias	16 dias	18 dias	30 dias
Cim. P. + Sílica	0	6	-6	-50
Cim. P. + VD10	-60	-63	-71	-94
Cim. P. + VD20	-80	-81	-94	-111
Cim. P. + VD30	90	69	71	83
Cim. P. + VD50	40	100	29	44

Fonte: Autor (2019).

Os resultados do cálculo de mitigação da expansão mostraram que o teor que mais mitigou a reação álcali-sílica no ensaio com cimento padrão foi o de 30% de pó de vidro, chegando a mitigar 83% em comparação com a expansão somente de cimento padrão, na idade de 30 dias. E o pior teor foi de VD20 de – 111%, sendo o pior valor também de variação dimensional calculado pelo ensaio de expansão de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT, 2018), chegando a 0,38%, como apresentado na Tabela 4.24.

Para analisar os traços abordados neste estudo, na caracterização dos compósitos, moldou-se também barras de argamassa para referência com 8% de sílica ativa em massa (REF-SA) e para as demais misturas. Os resultados das variações dimensionais das barras de argamassas destes traços podem ser observadas na Tabela 4.26.

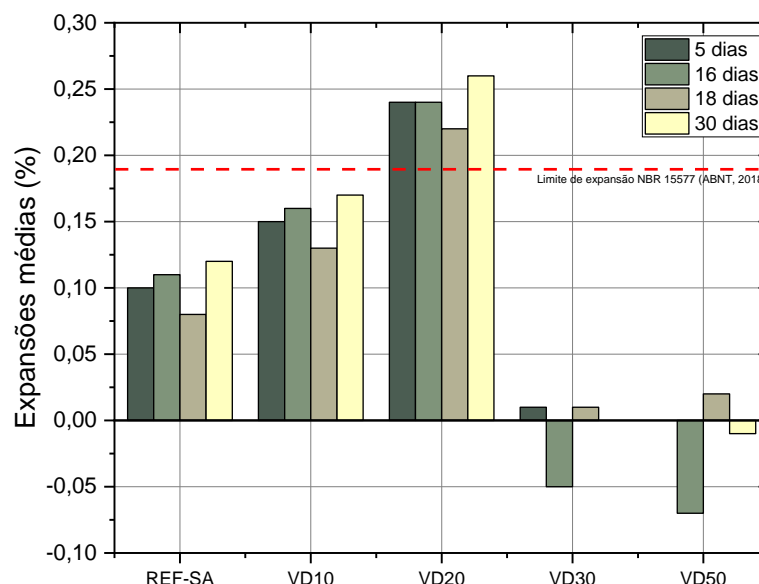
Tabela 4.26 – Variações dimensionais das barras de argamassa do traço referência e das misturas com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.

Barras de argamassa	Variações dimensionais médias por idade de cura agressiva (%)			
	5 dias	16 dias	18 dias	30 dias
REF-SA	0,10	0,11	0,08	0,12
VD10	0,15	0,16	0,13	0,17
VD20	0,24	0,24	0,22	0,26
VD30	0,01	-0,05	0,01	0,00
VD50	0,00	-0,07	0,02	-0,01

Fonte: Autor (2019).

O gráfico comparativo entre as expansões das barras de argamassa pode ser observado na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Comparação da expansão das barras de argamassa do material referência e das misturas ternárias.



Fonte: Autor (2019).

Tanto o teor de 10% (VD10) como o teor de 20% (VD20) de incorporação de pó de vidro proporcionaram um aumento das expansões, porém, somente o teor de 20% de pó de vidro (VD20) ficou acima do valor estipulado na NBR 15577-1 (ABNT, 2018), não podendo ser considerado como mitigador. Os demais traços são classificados como mitigadores das expansões devido a RAA.

A análise estatística foi realizada ao final do ensaio, aos 30 dias após moldagem (28 dias de cura agressiva). Conclusão: deve-se **rejeitar H0**, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes.

Somente os traços REF-SA quando comparado com VD10 e VD30 quando comparado com VD50 não apresentam diferenças significativas. Na Tabela G.13 do apêndice G esses resultados podem ser observados.

Os resultados obtidos da mitigação são apresentados na Tabela 4.27 a mitigação foi calculada a partir do resultado da expansão de REF-SA e das misturas.

Tabela 4.27 – Mitigação da reação álcali-sílica de acordo com a ABNT NBR 15577-5 (2018) das barras de argamassa do traço referência e das misturas com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.

Barras de argamassa	Mitigação (%)			
	5 dias	16 dias	18 dias	30 dias
VD10	-50	-45	-63	-42
VD20	-140	-118	-175	-117
VD30	90	145	88	100
VD50	100	164	75	108

Fonte: Autor (2019).

Nesta situação o traço que mitigou mais a expansão foi o VD50, mitigando 108%. Já o VD20 também foi neste caso o mais deletério para a expansão, piorando 117%, sendo também o de maior variação dimensional chegando a 0,26%, como pode ser observado na Tabela 4.26.

Munhoz (2007) destaca que as principais teorias elaboradas para explicar a minimização da reação álcali-agregado utilizando adições ativas, são: a diluição dos álcalis do cimento, a retenção dos álcalis na estrutura do C-S-H, a redução da permeabilidade e a redução do pH nos poros dos compósitos.

Segundo Munhoz (2007), a eficiência das adições em mitigar a reação álcali-agregado, varia de acordo com a composição química e mineralógica dessas adições. Esse desempenho está relacionado com a composição química dos materiais e com o diâmetro das partículas. Na pesquisa realizada por Munhoz (2017) o teor mínimo de sílica ativa para mitigar a reação álcali-agregado foi de 10% e o de metacaulim foi de 15%.

Considerando o pó de vidro, a quantidade mínima do material para a mitigação da reação álcali-sílica também pode variar. Neste estudo nota-se uma diminuição nas expansões a partir da incorporação de 30% de pó de vidro nas misturas obtidas a partir dos traços estudados (compósitos cimentícios).

Nos estudos de Diamond (1997) este constatou-se que a incorporação de materiais silicosos, pozolânicos, podem agir de duas formas, sendo benéficos na redução das expansões causadas pela RAA, sendo considerados como teores ótimos, ou ainda podendo agir de maneira oposta intensificando as expansões, podendo ser chamados de teores péssimos.

Nesta pesquisa os teores péssimos, nos quais as expansões foram intensificadas, foram os teores de 10% e 20% de pó de vidro.

A partir dos estudos de Hasparyk (2011), nota-se a importância de uma investigação do módulo de elasticidade das barras de argamassa submetidas à cura agressiva. O módulo de elasticidade é a primeira propriedade a ser afetada negativamente quando o elemento estrutural já está sendo acometido pela reação álcali-agregado. Diante do exposto, realizou-se o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

Os resultados dos módulos de elasticidade das barras de argamassa podem ser observados na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 - Resultado do módulo de elasticidade dinâmico das barras de argamassa do traço referência e das misturas com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.

Traço	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)			Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3			
REF-SA	39,29	41,15	40,72	40,39	2,86	4,39
VD10	37,66	40,10	40,51	39,43	3,68	9,34
VD20	40,20	41,42	45,76	42,46	2,91	6,85
VD30	41,78	41,27	45,79	42,95	2,26	5,27
VD50	42,20	42,44	41,33	41,99	1,37	3,27

Fonte: Autor (2019).

A comparação entre os módulos de elasticidade dinâmicos e a degradação em porcentagem dos compósitos cimentícios sem e com cura agressiva das barras de argamassa ao fim do ensaio de reação álcali-sílica podem ser observados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 - Comparação dos módulos de elasticidade dinâmicos nos compósitos cimentícios sem e com cura agressiva ao fim do ensaio.

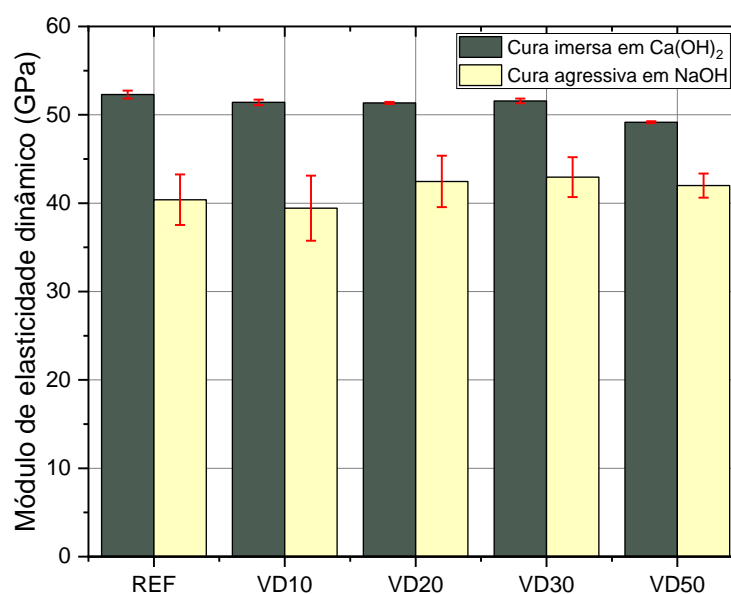
Traço	Média dos módulos de elasticidade dinâmico (GPa)		
	Sem cura agressiva	Com cura agressiva	Degradação (%)
REF-SA	52,29	40,39	23
VD10	51,41	39,43	23
VD20	51,35	42,46	17
VD30	51,57	42,95	17
VD50	49,16	41,99	15

Fonte: Autor (2019).

A análise estatística foi realizada para os ensaios de módulo de elasticidade comparando os resultados por compósito cimentício entre cura imersa com $Ca(OH)_2$ e cura agressiva com $NaOH$, chegou-se a seguinte conclusão: **Rejeitar H_0** , ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são significativamente diferentes.

O gráfico comparativo entre os módulos de elasticidade dinâmicos de REF-SA e das misturas ternárias podem ser observados nas Figura 4.22.

Figura 4.22 – Comparação dos módulos de elasticidade dinâmicos das barras de argamassa do material referência e das misturas ternárias com cura imersa em $Ca(OH)_2$ e em cura agressiva de $NaOH$.

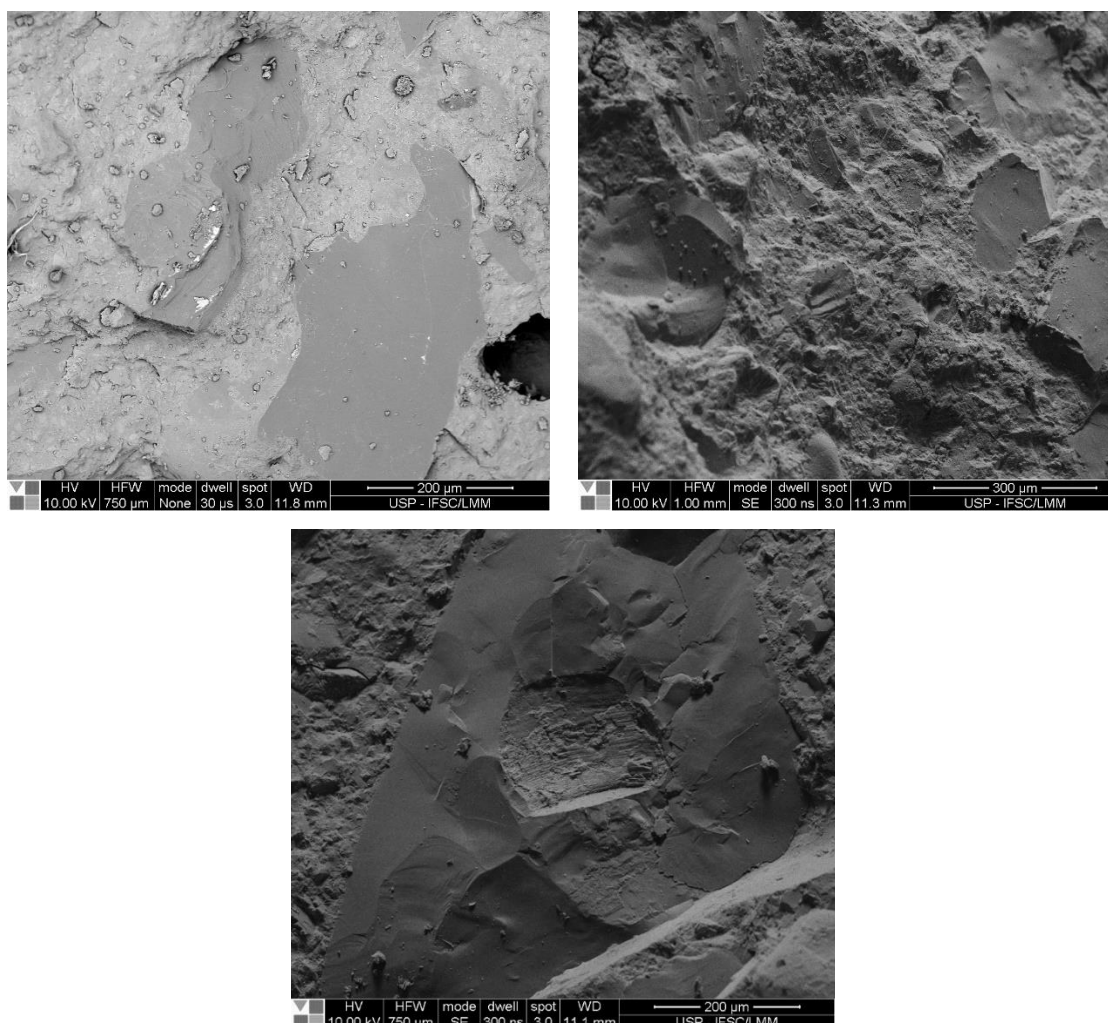


Fonte: Autor (2019).

Analisando-se os módulos de elasticidade dos compósitos cimentícios mantidos em cura submersa e em solução agressiva, nota-se que houve diferença significativa entre os compósitos cimentício e verificou-se que o maior valor de degradação foi de 23% (REF-SA e VD10), seguido de VD20 e VD30, 17% e por fim, o menor valor foi para o VD50, 15%.

Para avaliação da microestrutura, foram realizadas análises por Microscopia Eletrônica por Varredura. Na Figura 4.23 são apresentadas as micrografias dos compósitos cimentícios de referência (REF-SA), e também com incorporação de 20% de pó de vidro (VD20) e incorporação de 50% de pó de vidro (VD50).

Figura 4.23 – a) Micrografia das barras de REF-SA aos 30 dias submetidas à cura agressiva. b) Micrografia das barras de VD20 aos 30 dias submetidas à cura agressiva. c) Micrografia das barras de VD50 aos 30 dias submetidas à cura agressiva.



Fonte: Autor (2019).

Analisando-se as imagens, observa-se que não houve formação de fissuras e nem formação de gel expansivo, ambos característicos da reação álcali-sílica, sendo verificada uma matriz densa em todos os traços.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos e, avaliando as questões levantadas pela pesquisa, considerando apenas e exclusivamente os materiais empregados nesse trabalho, as seguintes considerações podem ser realizadas:

- O pó de vidro é um material pozolânico e aprimorou propriedades físicas e mecânicas dos traços estudados.
- A utilização do pó de vidro como material cimentício suplementar não comprometeu as características dos compósitos cimentícios no estado fresco.
- O teor de ar incorporado diminuiu à medida que se aumentou o teor de pó de vidro. A densidade de massa dos compósitos cimentícios com a incorporação de pó de vidro também diminuiu com o aumento do teor de pó de vidro utilizado na mistura.
- Os compósitos cimentícios apresentaram baixa absorção de água por capilaridade. Destaca-se a dificuldade na secagem interna dos compósitos cimentícios, em função de uma matriz de elevada compactidade.
- A resistência à compressão axial nas primeiras idades de 2, 7 e 28 dias dos compósitos cimentícios apresentaram diferenças estatísticas significativas, o que já era esperado devido à hidratação mais lenta dos compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro. No entanto, na idade de 180 dias não houve diferenças estatísticas significativas entre as amostras, chegando no maior valor de resistência à compressão axial para o VD30 em 129,03 MPa e de menor valor de VD10 de 110,41 MPa, resultados que classificam o material como de alto desempenho, juntamente com a baixa absorção de água do material.
- Os módulos de elasticidade apresentaram valores maiores que 40 GPa, o que é esperado para concretos de alto desempenho.

- Em relação à reatividade do agregado miúdo, de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT, 2018), com a utilização do cimento padrão, as variações dimensionais médias ficaram em torno de 0,18%, abaixo do limite de 0,19% especificado pela norma. Portanto, o agregado foi classificado como potencialmente inócuo grau R0. Porém, para o CP V utilizado nos compósitos cimentícios, as variações dimensionais aos 30 dias apresentaram valor de 0,24%, valor acima do limite da norma.
- Levando em consideração os resultados de expansão, nota-se que os teores com incorporação de 10% de pó de vidro (VD10) e com incorporação de 20% de pó de vidro (VD20) intensificaram as expansões nas barras de argamassa, podendo ser considerados como os de pior desempenho.
- Os teores com incorporação de 30% de pó de vidro (VD30) e com incorporação de 50% de pó de vidro (VD50) reduziram as expansões, sendo considerados como teores ótimos em relação à reação álcali-sílica.
- Outro ponto a ser considerado em relação à substituição de cimento por 50% de pó de vidro é sob o viés da sustentabilidade, visto que as propriedades físicas e mecânicas foram mantidas e em alguns casos até aprimoradas e com um menor consumo de cimento.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Ao longo do estudo realizado foram levantadas algumas questões e com elas algumas sugestões de novos estudos.

- Análise da viabilidade financeira da utilização do pó de vidro como material cimentício suplementar;
- Estudo da hidratação de compósitos cimentícios a base de cimento com pó de vidro como material cimentício;

- Melhor investigação da absorção de água por capilaridade, inclusive por outras metodologias, com o intuito de verificar melhor o comportamento de compósitos cimentícios similares como os deste estudo;
- Continuidade dos estudos com outros tipos de pó de vidro, outras granulometrias de pó de vidro;
- Estudo de reologia para avaliar os melhores teores de aditivos nos compósitos com pó de vidro;
- Análise de reação álcali-agregado em prismas de concreto com os materiais deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. C., FLATT, J. R., **Science and Technology of Concrete admixtures**. Cambridge, Woodhead Publishing, 2016.

AFSHINNIA, K.; RANGARAJU, P. R. Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 263–272, 2016.

AMBIENTAL, L.; CEMPRE. **Relatório técnico acordo setorial de embalagens em geral**: Acordo setorial para implementação do sistema de logística reversa de embalagens em geral. 2017. Disponível em: <<http://separenaopare.com.br/wp-content/uploads/2017/10/RELATORIOFINALFASE1.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE. **234: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete**. Dallas: ACI, 1996. 51 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard Test Method for Fundamental Transverse , Longitudinal , and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. **ASTM C215-02**. West Conshohocken, PA, USA, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard Test Method for Dynamic Young ' s Modulus , Shear Modulus , and Poisson ' s Ratio by Impulse Excitation of Vibration. **ASTM E1876-01**. West Conshohocken, PA, USA, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro. 2015.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânico – determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro. 2009.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro. 2009.

_____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **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 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro. 2014.

_____. **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:** Agregados – Reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15894-1:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro. 2010.

_____. **NBR 15894-3:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 75 µm. Rio de Janeiro. 2010.

_____. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro. 2018.

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

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

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

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NM 24:** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NM 45:** Agregados -Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NM 49:** Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2015. 960 p.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais:** Uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018. 881 p. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares.

CEBRACE. **A COMPOSIÇÃO DO VIDRO**. s.d. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia/interna/a-composicao-do-vidro>>. Acesso em: 25 ago. 2018.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (São Paulo). **Vidro**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>>. Acesso em: 25 abril. 2018.

CHANDRA P., S.; 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.

COUTO, T. A. **Reação Álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, p.191, 2008.

CORRÊA, A. C. A. **Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento Portland tipo CP III-40**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Fluminense. p. 149, 2010.

DIAMOND, S. Alkali sílica reactions – Some paradoxes. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 391–401, 1997.

DU, H.; TAN, K. H. Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 275–285, 2014.

DYER, T. D.; DHIR, R. K. Chemical Reactions of glass cullet used as cement component. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, December, p. 412–417, 2001.

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.

ELKEM (São Paulo). **Sílica**. s.d. Disponível em: <<https://www.elkem.com/>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

FREITAS, J. C. **Uso de aditivo redutor de retração no combate à retração em argamassas auto-adensáveis de alta resistência**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, p.170, 2009.

GCP APPLIED TECHNOLOGIES (São Paulo). **TEC FLOW**. s.d. Disponível em: <<https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/tec-flow>>. Acesso em: 14 jun. 2018.

GIDRÃO, G. M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 132, 2015.

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.

HASPARYK, N. P. **Reação álcali-agregado no concreto.** In: ISAIA, G.C. *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo: IBRACON, v. 2, cap. 27, p. 933-1001, 2011.

HILLS, T. *et al.* Carbon capture in the cement industry: Technologies, Progress, and Retrofitting. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 1, p. 368–377, 2016.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para a Construção Civil.** Sumário Mineral do Brasil, n. 11, p. 602–635, 2009.

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. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1309–1312, 2010.

JALEEL, A. R.; AL-AZZAWY, H. J.; AL-KARAWAI, S. N. Use alternative raw materials for concrete production. **Diyala Journal of Engineering Sciences Second**, December, p. 01–12, 2015.

JIN, W. **Alkali-silica reaction in concrete with glass aggregate:** a Chemo-physico-mechanical Approach, Columbia University, p. 218, 1998.

JOKAR, Z.; MOKHTAR, A. Policy making in the cement industry for CO₂ mitigation on the pathway of sustainable development- A system dynamics approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 142–155, 2018.

KAMALI, M.; GHAREMANINEZHAD, A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 407–416, 2015.

KRSTIC, M.; DAVALOS, J. F. Field Application of Recycled Glass Pozzolan for Concrete. **ACI Materials Journal**. n. 116, p. 123–132, 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, 2018.

MACFARLANE, A.; MARTIN, G. A world of glass. **Science**, v. 305, September, p. 1407–1409, 2004.

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.

Mehta, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais - 2ª Edição**. Editora: Nicole Pagan Hasparyk. Português, p. 751. 2014.

MIKULČIĆ, H. *et al.* Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 119–132, 2016.

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**, p. 4–11, 2018.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, p.189,2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonini.

NEVILLE A.; AITCIN P. C. High performance concrete - an overview. **Materials and Structures**, v. 31, n. 1, p. 111–117, 1998.

OH, D. Y. *et al.* CO₂ emission reduction by reuse of building material waste in the Japanese cement industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 796–810, 2014.

QUÉRÉ, Corinne Le *et al.* Global Carbon Budget 2017. **Earth System Science**, Sn., v. 10, n. 4, p.405-448, out. 2018. Disponível em: <<https://www.earth-syst-sci-data.net/10/2141/2018/>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

RAJABIPOUR, F. *et al.* Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 130–146, 2015.

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, n. July 2017, p. 171–180, 2018.

RAVERDY, M. *et al.* Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components. **CONGRÉS**. France. 1980.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n.7, p. 1501-1511, 1995.

ROADMAP tecnológico do cimento: **potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050** / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p.

RODIER, L.; SAVASTANO, H. Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 333–341, 2018.

SALLES, Flávio Moreira. **Identificação da RAA e monitoramento de estrutura afetada pela reação**. Foz do Iguaçu: Ibracon, 2010. 51 slides, color. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto. Disponível em: <<http://www.ibracon.org.br/eventos/52cbc/SALLES.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2018.

SALVADOR FILHO, J. A. A. *et al.* **Influence of polyethylene and stainless-steel fibers on compressive and tensile behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites**, s.d.

SANTUR H. R. Glass recycling and reuse, University of Wisconsin, Madin institute for. **Environmental studies**, v. 17, Mar. 1974.

SBRIGHI NETO, C.; QUITETE, E. B.; BATTAGIN, A. F. (Org.). **Prática recomendada IBRACON: Guia de prevenção da reação álcali-agregado**. São Paulo: Ibracon, p.30, 2018.

SERPA, D. *et al.* ASR of mortars containing glass. **Construção e materiais de construção**, v. 47, p. 489–495, 2013.

SHAO, Y. *et al.* Studies on concrete containing ground waste glass Yixin. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 91–100, 2000.

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.

SHI, C. *et al.* Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 987–993, 2005.

SIDDIQUE, R. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 923–932, 2011.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. . **Dados do setor**. 2018. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

SOARES, S. M.; FERREIRA, F. G. S.; SALVADOR FILHO, J. A. A.. Influência do pó de vidro na ocorrência de reações álcali-agregado em matrizes cimentícias de ultra alto desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** . Foz do Iguaçu: Ibracon, 2018.

SOARES, Silvete Mari *et al.* Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com a incorporação de diversos teores de pó de vidro. In: SIMPÓSIO PARANAENSE DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 2019, Curitiba. **Anais...** . Curitiba: Cubo, 2019. v. 1, p. 136 - 146. Disponível em: <<http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/2526-7248.036>>. Acesso em: 03 set. 2019.

STANTON, T. E. **Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate**. In: Proceedings of American Society of Civil Engineers. v. 66, n. 10. Dec. 1940, p. 1781- 1811.

VIEITEZ, E. R. *et al.* End-of-waste criteria for glass cullet: Technical proposals. **Joint Research Centre European Commission**, p. 124, 2011

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development. “**Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050**”. WBCSD, 2009. 36 p. Disponível em: . Acesso em: 8 de Set. de 2010.

WIGUM, B.; LINDGARD, J. The RILEM approach to mitigate álcali aggregate reactions (AAR) in concrete. **Nordic Concrete Research**. Aalborg, Denmark n. 43, 2011.

ZIRTEC (São Paulo). **A sílica**. s.d. Disponível em: <<http://www.zirtec.com.br/a-silica/>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

ZDEB, T. **Ultra-high performance concrete – properties and technology**. v. 61, n. 1, p. 183–193, 2013.

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.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K. Influence of water to cement ratio on the efficiency of internal curing of high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 144, n. September, p. 311–316, 2017.

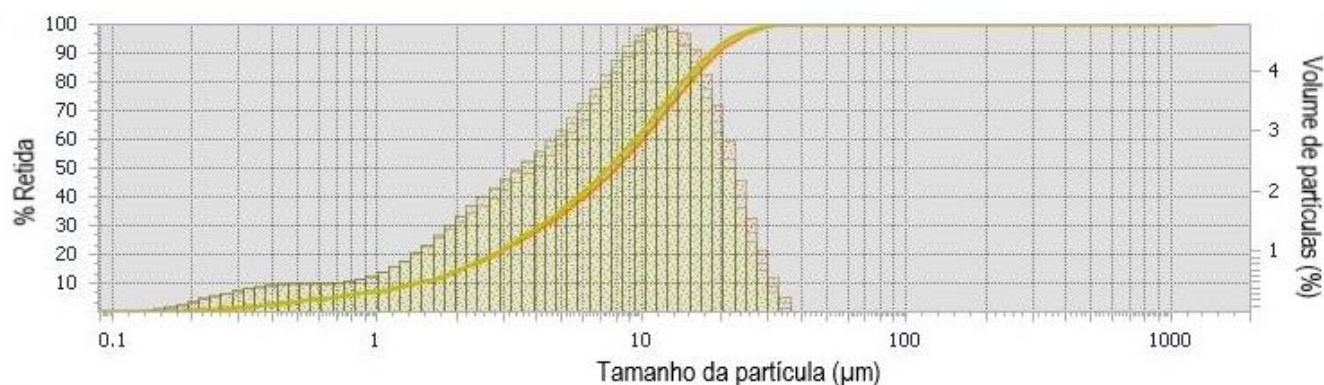
APÊNDICES

Nos apêndices 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.

APÊNDICE A – GRANULOMETRIAS DOS AGLOMERANTES

A curva granulométrica do cimento CP V pode ser observada na Figura A.1.

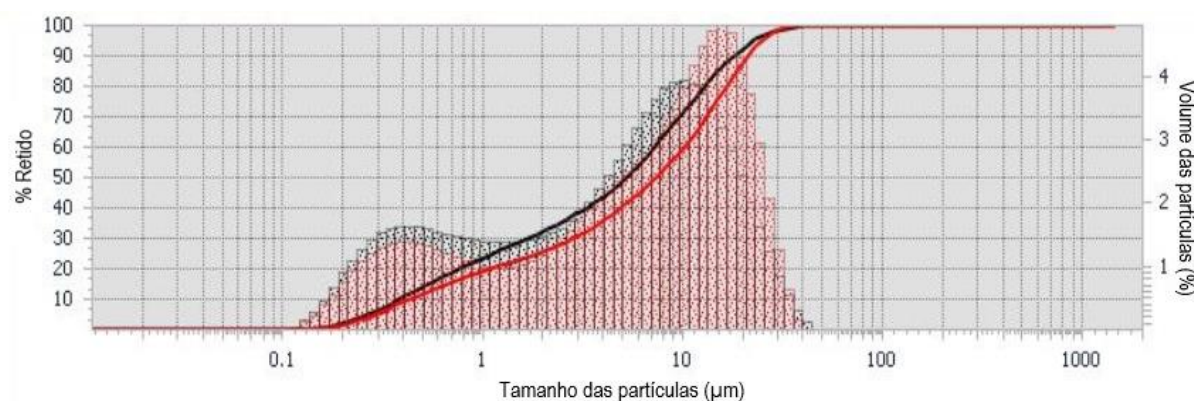
Figura A. 1 - Curva granulométrica do cimento CP V - ARI.



Fonte: Autor (2019).

A curva granulométrica da sílica ativa utilizada pode ser observada na Figura A.2.

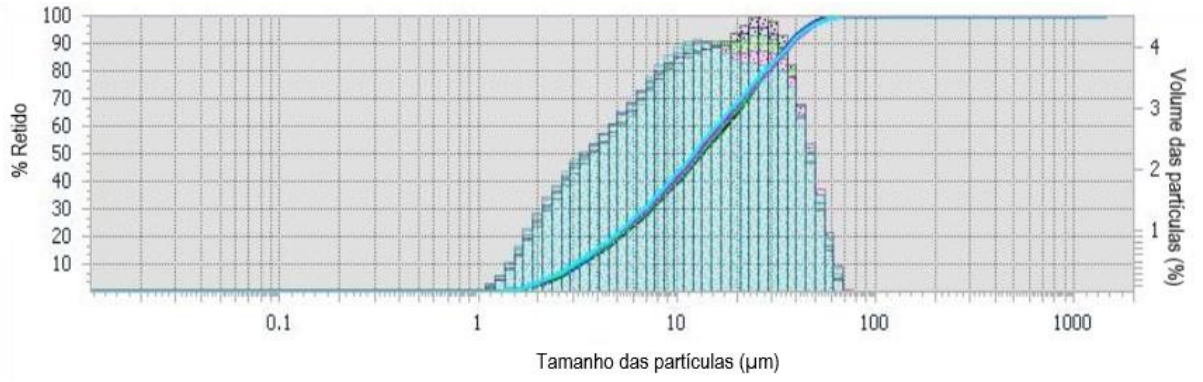
Figura A. 2 - Curva granulométrica da sílica ativa.



Fonte: Autor (2019).

A curva granulométrica do pó de vidro utilizado pode ser observada na Figura A.3.

Figura A. 3 - Curva granulométrica do pó de vidro.



Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE B – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Na Tabela B.1 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, com 7 dias de idade, no decorrer de todo ensaio.

Tabela B. 1 – Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 7 dias.

Traço	Absorção por capilaridade (g/cm ²)					Altura de ascensão
	3h	6h	24h	48h	72h	
REF-SA	0,03	0,04	0,06	0,09	0,10	< 1 mm
VD10	0,03	0,04	0,07	0,10	0,11	
VD20	0,03	0,04	0,08	0,11	0,12	
VD30	0,04	0,05	0,09	0,12	0,14	
VD50	0,03	0,05	0,09	0,12	0,13	

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, com 7 dias de idade, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela B. 2 – Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios com 7 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF-SA	3	0,30	0,10	0,00
VD10	3	0,32	0,11	0,00
VD20	3	0,36	0,12	0,00
VD30	3	0,42	0,14	0,00
VD50	3	0,40	0,13	0,00

Fonte: Autor (2019).

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 B.3.

Tabela B. 3 – ANOVA da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios com 7 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00	4,00	0,00	11,95	0,00	3,48
Dentro dos grupos	0,00	10,00	0,00			
Total	0,00	14				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 B.4.

Tabela B. 4 - Teste de Tukey para absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios com 7 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Traço	REF-SA	VD10	VD20	VD30	VD50
REF-SA		Não	Não	Sim	Sim
VD10			Não	Sim	Sim
VD20				Não	Não
VD30					Não

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B. 5 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, com 28 dias de idade, no decorrer de todo ensaio.

Tabela B. 5 - Absorção por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 28 dias.

Traço	Absorção por capilaridade (g/cm ²)					Altura de ascensão
	3h	6h	24h	48h	72h	
REF-SA	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	< 1 mm
VD10	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	
VD20	0,02	0,03	0,06	0,08	0,09	
VD30	0,02	0,03	0,06	0,08	0,09	
VD50	0,02	0,03	0,05	0,08	0,09	

Fonte: Autor (2018).

Na Tabela B.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, com 28 dias de idade, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela B. 6 – Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF-SA	3	0,24	0,08	0,00
VD10	3	0,24	0,08	0,00
VD20	3	0,28	0,09	0,00
VD30	3	0,27	0,09	0,00
VD50	3	0,26	0,09	0,00

Fonte: Autor (2019).

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 B.7.

Tabela B. 7 – ANOVA da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios com 28 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00	4	0,00	1,26	0,35	3,48
Dentro dos grupos	0,00	10	0,00			
Total	0,00	14				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve aceitar H₀**, 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 $0,09 \text{ g/cm}^2$ (VD20, VD30 e VD50).

Na Tabela B. 8 são apresentados os valores detalhados da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, com 180 dias de idade, no decorrer de todo ensaio.

Tabela B. 8 – Absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios aos 180 dias.

Traço	Absorção por capilaridade (g/cm^2)					Altura de ascensão
	3h	6h	24h	48h	72h	
REF-SA	0,04	0,05	0,09	0,11	0,13	2,64
VD10	0,05	0,07	0,11	0,13	0,15	2,49
VD20	0,04	0,06	0,10	0,13	0,14	2,96
VD30	0,05	0,07	0,12	0,15	0,16	4,12
VD50	0,04	0,06	0,11	0,14	0,16	4,33

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.9 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios, com 180 dias de idade, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela B. 9 – Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa^2)
REF-SA	3	0,38	0,13	0,00
VD10	3	0,45	0,15	0,00
VD20	3	0,43	0,14	0,00
VD30	3	0,49	0,16	0,00
VD50	3	0,47	0,16	0,00

Fonte: Autor (2019).

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 B.10.

Tabela B. 10 – ANOVA da absorção de água por capilaridade para os compósitos cimentícios com 180 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00	4	0,00	12,95	0,00	3,48
Dentro dos grupos	0,00	10	0,00			
Total	0,00	14				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 B.11.

Tabela B. 11 - Teste de Tukey para absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade em 72 horas de ensaio.

Traço	REF	VD10	VD20	VD30	VD50
REF-SA		Sim	Não	Sim	Sim
VD10			Não	Não	Não
VD20				Sim	Não
VD30					Não

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.12 são apresentados os valores descritivos de absorção de água capilaridade dos compósitos cimentícios de REF-SA em todas as idades analisadas.

Tabela B. 12 – Absorção de água por capilaridade de REF-SA comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Nº CP	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,11	0,08	0,12
2	0,09	0,07	0,12
3	0,10	0,08	0,13
Média (g/cm²)	0,10	0,08	0,12
Desvio padrão (g/cm²)	0,01	0,00	0,00
CV %	10,00	0,00	0,00

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.13 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício de REF-SA em todas as idades analisadas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela B. 13 – Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade de REF-SA comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
7 dias	3	0,30	0,10	0,00
28 dias	3	0,24	0,08	0,00
180 dias	3	0,38	0,12	0,00

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de REF-SA em todas as idades analisadas de absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela B.14.

Tabela B. 14 – ANOVA da absorção de água por capilaridade de REF-SA comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00	2	0,00	23,49	0,00	5,14
Dentro dos grupos	0,00	6	0,00			
Total	0,00	8				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 B.15.

Tabela B. 15 – Teste de Tukey para absorção de água por capilaridade de REF-SA comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Traço	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		Não	Sim
28 dias			Sim

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.16 são apresentados os valores descritivos de absorção de água capilaridade dos compósitos cimentícios de VD10 em todas as idades analisadas.

Tabela B. 16 – Absorção de água por capilaridade de VD10 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Nº CP	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,10	0,08	0,15
2	0,12	0,08	0,16
3	0,10	0,07	0,14
Média (g/cm²)	0,11	0,08	0,15
Desvio padrão (g/cm²)	0,01	0,00	0,01
CV %	9,09	0,00	6,67

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.17 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício de VD10 em todas as idades analisadas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela B. 17 – Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade de VD10 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
7 dias	3	0,32	0,11	0,00
28 dias	3	0,23	0,08	0,00
180 dias	3	0,45	0,15	0,00

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de VD10 em todas as idades analisadas de absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela B.18.

Tabela B. 18 – ANOVA da absorção de água por capilaridade de VD10 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,01	2	0,00	52,06	0,00	5,14
Dentro dos grupos	0,00	6	0,00			
Total	0,01	8				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 B.19.

Tabela B. 19 – Teste de Tukey para absorção de água por capilaridade de VD10 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Traço	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		Sim	Sim
28 dias			Sim

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.20 são apresentados os valores descritivos de absorção de água capilaridade dos compósitos cimentícios de VD20 em todas as idades analisadas.

Tabela B. 20 – Absorção de água por capilaridade de VD20 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Nº CP	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,13	0,09	0,14
2	0,11	0,10	0,14
3	0,12	0,08	0,15
Média (g/cm²)	0,12	0,09	0,14
Desvio padrão (g/cm²)	0,01	0,01	0,00
CV %	8,33	11,11	0,00

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.21 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício de VD20 em todas as idades analisadas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela B. 21 – Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade de VD20 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
7 dias	3	0,36	0,12	0,00
28 dias	3	0,28	0,09	0,00
180 dias	3	0,43	0,14	0,00

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de VD20 em todas as idades analisadas de absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela B.22.

Tabela B. 22 – ANOVA da absorção de água por capilaridade de VD20 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00	2	0,00	27,22	0,00	5,14
Dentro dos grupos	0,00	6	0,00			
Total	0,00	8				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 B.23.

Tabela B. 23 – Teste de Tukey para absorção de água por capilaridade de VD20 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Traço	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		Sim	Sim
28 dias			Sim

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.24 são apresentados os valores descritivos de absorção de água capilaridade dos compósitos cimentícios de VD30 em todas as idades analisadas.

Tabela B. 24 – Absorção de água por capilaridade de VD30 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Nº CP	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,15	0,09	0,16
2	0,13	0,09	0,17
3	0,14	0,09	0,16
Média (g/cm²)	0,14	0,09	0,16
Desvio padrão (g/cm²)	0,01	0,00	0,00
CV %	7,14	0,00	0,00

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.25 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício de VD30 em todas as idades analisadas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela B. 25 – Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade de VD30 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
7 dias	3	0,42	0,14	0,00
28 dias	3	0,27	0,09	0,00
180 dias	3	0,49	0,16	0,00

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de VD30 em todas as idades analisadas de absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela B.26.

Tabela B. 26 – ANOVA da absorção de água por capilaridade de VD30 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,01	2	0,00	143,87	0,00	5,14
Dentro dos grupos	0,00	6	0,00			
Total	0,01	8				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 B.27.

Tabela B. 27 – Teste de Tukey para absorção de água por capilaridade de VD30 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Traço	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		Sim	Sim
28 dias			Sim

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.28 são apresentados os valores descritivos de absorção de água capilaridade dos compósitos cimentícios de VD50 em todas as idades analisadas.

Tabela B. 28 - Absorção de água por capilaridade de VD50 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Nº CP	7 dias	28 dias	180 dias
1	0,14	0,08	0,15
2	0,13	0,11	0,15
3	0,13	0,07	0,17
Média (g/cm²)	0,13	0,09	0,16
Desvio padrão (g/cm²)	0,01	0,02	0,01
CV %	7,60	22,22	6,25

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela B.29 são apresentados os valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade para o compósito cimentício de VD50 em todas as idades analisadas, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela B. 29 – Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade de VD50 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
7 dias	3	0,40	0,13	0,00
28 dias	3	0,26	0,09	0,00
180 dias	3	0,47	0,16	0,00

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de VD50 em todas as idades analisadas de absorção de água por capilaridade ao final do ensaio, decorridas as 72 horas. O resultado pode ser observado na Tabela B.30.

Tabela B. 30 – ANOVA da absorção de água por capilaridade de VD50 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,01	2	0,00	22,80	0,00	5,14
Dentro dos grupos	0,00	6	0,00			
Total	0,01	8				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 B.31.

Tabela B. 31 – Teste de Tukey para absorção de água por capilaridade de VD50 comparando as idades de 7, 28 e 180 dias a 72 horas de ensaio.

Traço	7 dias	28 dias	180 dias
7 dias		Sim	Não
28 dias			Sim

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE C - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Na Tabela C.1 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios estudados com 2 dias de idade.

Tabela C. 1 – Resistência à compressão dos compósitos cimentícios com 2 dias de idade.

Traço	Resistência à compressão (MPa)				Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3	CP4			
REF-SA	87,66	80,42	85,39	84,26	84,43	0,88	1,04
VD10	78,10	81,46	78,62	79,52	79,43	0,41	0,51
VD20	78,55	79,18	68,48	70,71	74,23	1,30	1,75
VD30	36,57	45,70	44,00	45,04	42,83	1,11	2,59
VD50	42,96	38,41	45,36	45,05	42,95	0,84	1,96

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela C.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 2 dias de idade

Tabela C. 2 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 2 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF-SA	4	337,73	84,43	9,15
VD10	4	317,70	79,43	2,18
VD20	4	296,92	74,23	29,54
VD30	4	171,31	42,83	17,89
VD50	4	171,78	42,95	10,28

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 2 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela C.3.

Tabela C. 3 – ANOVA para os compósitos cimentícios com 2 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6594,71	4	1648,68	119,39	0,00	3,05
Dentro dos grupos	207,14	15	13,81			
Total	6801,85	19				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 compósitos cimentícios com 2 dias de idade.

Traço	REF-SA	VD10	VD20	VD30	VD50
REF-SA		Não	Sim	Sim	Sim
VD10			Não	Sim	Sim
VD20				Sim	Sim
VD30					Não

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.
Fonte: Autor (2019).

Na Tabela C.5 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios estudados com 7 dias de idade.

Tabela C. 5 - Resistência à compressão dos compósitos cimentícios com 7 dias de idade.

Traço	Resistência à compressão (MPa)				Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3	CP4			
REF-SA	93,71	91,83	82,94	88,46	89,23	1,31	1,47
VD10	97,40	97,42	68,42	88,98	88,06	3,52	4,00
VD20	87,68	88,66	97,00	96,30	92,41	1,13	1,22
VD30	74,77	86,35	80,26	90,26	82,91	1,88	2,27
VD50	69,22	68,79	63,63	66,82	67,12	0,68	1,01

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela C.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 7 dias de idade.

Tabela C. 6 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 7 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF-SA	4	356,94	89,23	22,33
VD10	4	352,22	88,06	187,14
VD20	4	369,64	92,41	24,21
VD30	4	331,64	82,91	46,38
VD50	4	268,46	67,12	6,49

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 7 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela C.7.

Tabela C. 7 – ANOVA para os compósitos cimentícios com 7 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1603,41	4	400,85	6,99	0,00	3,06
Dentro dos grupos	859,65	15	57,31			
Total	2463,06	19				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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.8.

Tabela C. 8 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios com 7 dias de idade.

Traço	REF-SA	VD10	VD20	VD30	VD50
REF-SA		Não	Não	Não	Sim
VD10			Não	Não	Sim
VD20				Não	Sim
VD30					Não

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela C.9 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios estudados com 28 dias de idade.

Tabela C. 9 - Resistência à compressão dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Traço	Resistência à compressão (MPa)				Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3	CP4			
REF-SA	105,54	99,51	111,01	111,18	106,81	1,42	1,33
VD10	99,67	109,99	93,31	91,36	98,58	2,26	2,29
VD20	119,96	126,07	121,71	119,03	121,69	0,85	0,70
VD30	84,31	104,74	103,23	99,69	97,99	2,48	2,53
VD50	107,81	115,16	106,55	93,92	105,86	2,58	2,44

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela C.10 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Tabela C. 10 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF-SA	4	427,24	106,81	30,55
VD10	4	394,33	98,58	70,43
VD20	4	486,77	121,69	9,75
VD30	4	391,97	97,99	87,68
VD50	4	423,44	105,86	77,78

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela C.11.

Tabela C. 11 – ANOVA para os compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1463,57	4	365,89	6,62	0,00	3,06
Dentro dos grupos	828,55	15	55,24			
Total	2292,13	19				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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.12.

Tabela C. 12 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Traço	REF-SA	VD10	VD20	VD30	VD50
REF-SA		Não	Não	Não	Não
VD10			Sim	Não	Não
VD20				Sim	Não
VD30					Não

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela C.13 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios estudados com 180 dias de idade.

Tabela C. 13 - Resistência à compressão dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade.

Traço	Resistência à compressão (MPa)				Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3	CP4			
REF-SA	121,89	98,09	127,58	125,69	118,31	3,58	3,03
VD10	121,76	82,58	114,42	122,86	110,41	4,89	4,43
VD20	102,50	113,48	115,92	114,86	111,69	1,63	1,46
VD30	136,17	118,67	126,45	134,82	129,03	2,12	1,65
VD50	119,69	105,61	123,49	97,55	111,58	3,15	2,82

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela C.14 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade.

Tabela C. 14 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF-SA	4	473,25	118,31	187,35
VD10	4	441,62	110,41	358,14
VD20	4	446,76	111,69	38,53
VD30	4	516,11	129,03	66,16
VD50	4	446,34	111,58	146,70

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela C.15.

Tabela C. 15 – ANOVA para os compósitos cimentícios com 180 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	976,91	4	244,23	1,53	0,24	3,06
Dentro dos grupos	2390,67	15	159,38			
Total	3367,58	19				

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados da ANOVA dos resultados de 180 dias de resistência à compressão axial, e a seguinte informação foi obtida: deve-se **aceitar H₀**, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações não são significativamente diferentes.

APÊNDICE D – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Tabela D. 1 são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Tabela D. 1 - Resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Traço	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)			Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3			
REF-SA	11,59	11,00	10,64	11,08	0,48	4,33
VD10	10,73	11,07	11,02	10,94	0,18	1,68
VD20	10,83	10,98	11,27	11,03	0,22	2,03
VD30	9,29	10,61	10,31	10,07	0,69	6,87
VD50	9,69	9,54	10,22	9,82	0,36	3,64

Fonte: Autor (2018).

Na Tabela D.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Tabela D. 2 – Valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF-SA	3	33,23	11,08	0,23
VD10	3	32,82	10,94	0,034
VD20	3	33,08	11,03	0,05
VD30	3	30,21	10,07	0,48
VD50	3	29,45	9,82	0,13

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela D.3.

Tabela D. 3 – ANOVA dos compósitos cimentícios de resistência à tração por compressão diametral com 28 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,25	4	1,06	5,78	0,011	3,48
Dentro dos grupos	1,84	10	0,18			
Total	6,09	14				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 D.4.

Tabela D. 4 - Teste de Tukey para os compósitos cimentícios de resistência à tração por compressão diametral com 28 dias de idade.

Traço	REF-SA	VD10	VD20	VD30	VD50
REF-SA		Não	Não	Não	Sim
VD10			Não	Não	Não
VD20				Não	Sim
VD30					Não

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela D. 5 são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade.

Tabela D. 5 - Resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade.

Traço	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)			Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3			
REF-SA	12,58	12,61	10,83	12,01	1,02	8,49
VD10	10,99	12,81	10,34	11,38	1,28	11,25
VD20	11,08	12,33	10,63	11,35	0,88	7,76
VD30	10,93	11,74	13,37	12,01	1,24	10,34
VD50	10,43	10,42	9,84	10,23	0,34	3,30

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela D.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade.

Tabela D. 6 – Valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 180 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF-SA	3	36,02	12,01	1,04
VD10	3	34,14	11,38	1,64
VD20	3	34,04	11,35	0,78
VD30	3	36,04	12,01	1,54
VD50	3	30,69	10,23	0,11

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à tração por compressão diametral dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela D.7.

Tabela D. 7 – ANOVA dos compósitos cimentícios de resistência à tração por compressão diametral com 180 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,35	4	1,59	1,55	0,26	3,48
Dentro dos grupos	10,22	10	1,02			
Total	16,57	14				

Fonte: Autor (2019).

A seguinte informação foi obtida: deve-se **aceitar H₀**, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações não são significativamente diferentes.

APÊNDICE E – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

Na Tabela E. 1 são apresentados os resultados de resistência à tração por flexão para os compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Tabela E. 1 - Resultados de resistência à tração por flexão.

Traço	Resistência à tração por flexão (MPa)			Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3			
REF-SA	22,55	25,45	21,36	23,12	2,10	9,10
VD10	21,03	23,20	21,54	21,92	1,13	5,18
VD20	21,96	20,48	20,80	21,08	0,78	3,69
VD30	20,39	20,85	18,14	19,79	1,45	7,33
VD50	19,65	18,46	18,06	18,72	0,83	4,42

Fonte: Autor (2018).

Na Tabela E.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Tabela E. 2 - Valores estatísticos descritivos da resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF-SA	3	69,36	23,12	4,43
VD10	3	65,77	21,92	1,29
VD20	3	63,24	21,08	0,61
VD30	3	59,38	19,79	2,10
VD50	3	56,17	18,72	0,68

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela E.3.

Tabela E. 3 – ANOVA dos compósitos cimentícios de resistência à tração por flexão com 28 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	35,90	4	8,97	4,93	0,02	3,48
Dentro dos grupos	18,21	10	1,82			
Total	54,11	14				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 E.4.

Tabela E. 4 - Teste de Tukey para os compósitos cimentícios de resistência à tração por flexão com 28 dias de idade.

Traço	REF-SA	VD10	VD20	VD30	VD50
REF-SA		Não	Não	Não	Sim
VD10			Não	Não	Não
VD20				Não	Não
VD30					Não

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE F – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO

No ensaio de módulo de elasticidade dinâmico pela metodologia acústica são obtidos dois valores de módulo, devido a maneira como é feita a excitação no corpo de prova conforme metodologia explicada no programa experimental. O valor final de módulo de elasticidade dinâmico é uma média de todos os valores obtidos no ensaio. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela F.1.

Tabela F. 1 – Valores obtidos de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias de idade, dos compósitos cimentícios, pelos modos de vibração flexional e longitudinal.

Traço	Modo vibracional flexional (GPa)			Modo vibracional longitudinal (GPa)			Média dos dois modos de vibração (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3			
REF-SA	55,09	53,44	54,43	52,74	51,84	52,30	53,31	1,26	2,36
VD10	52,82	53,59	52,25	51,43	51,72	51,09	52,15	0,93	1,78
VD20	52,46	53,35	52,74	51,21	51,45	51,38	52,10	0,88	1,69
VD30	52,87	53,10	53,51	51,32	51,56	51,84	52,37	0,91	1,74
VD50	50,08	50,51	50,44	49,15	49,27	49,05	49,75	0,67	1,35

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela F.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos dos módulos de elasticidade dinâmico dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Tabela F. 2 - Valores estatísticos descritivos do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (GPa)	Média (GPa)	Variância (GPa) ²
REF-SA	6	319,84	53,31	1,59
VD10	6	312,90	52,15	0,87
VD20	6	312,59	52,10	0,77
VD30	6	314,20	52,37	0,82
VD50	6	298,50	49,75	0,45

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela F.3.

Tabela F. 3 – ANOVA do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	41,49	4	10,37	11,52	0,00	3,48
Dentro dos grupos	22,50	25	0,90			
Total	63,99	29				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, 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 F.4.

Tabela F. 4 - Teste de Tukey do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos cimentícios aos 28 dias.

Traço	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.

Fonte: Autor (2019).

A Tabela F.5 apresenta os valores de módulo de elasticidade estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias obtidos nos ensaios.

Tabela F. 5 - Módulo de elasticidade estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias.

Traço	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)			Média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)
	CP1	CP2	CP3			
REF	44,70	43,44	41,13	43,09	1,81	4,21
VD10	48,05	46,77	41,71	45,51	3,35	7,36
VD20	37,86	42,31	44,85	41,67	3,54	8,50
VD30	42,23	45,95	40,63	42,94	2,73	6,36
VD50	42,07	40,60	41,87	41,51	0,80	1,92

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela F.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos dos módulos de elasticidade estático dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Tabela F. 6 – Valores estatísticos descritivos do módulo de elasticidade estático dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (GPa)	Média (GPa)	Variância (GPa) ²
REF-SA	3	129,27	43,09	3,29
VD10	3	136,53	45,51	11,23
VD20	3	125,02	41,67	12,55
VD30	3	128,80	42,93	7,45
VD50	3	124,53	41,51	0,63

Fonte: Autor (2019).

Tabela F. 7 – ANOVA do módulo de elasticidade estático dos compósitos cimentícios com 28 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	30,80	4	7,70	1,09	0,41	3,48
Dentro dos grupos	70,31	10	7,03			
Total	101,11	14				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve aceitar H₀**, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são estatisticamente equivalentes.

APÊNDICE G – REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Na Tabela G.1 são apresentados os valores dos comprimentos, das expansões e o cálculo do valor médio das expansões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de reação álcali-sílica. Nos valores de expansão aos 30 dias é realizada uma análise do desvio relativo máximo (DRM), onde para valores de expansão de até 0,10% aos 30 dias o DRM deve ser de até 40% e para valores de expansão acima de 0,10% aos 30 dias o DRM deve ser de até 20%, quando esses valores forem superiores deve-se calcular uma nova média.

Tabela G. 1 – Valores descritivos dos comprimentos, das expansões e expansões médias de todos os traços utilizados.

Traço	Leituras														DRM	Conferência	Nova média (%)
	Inicial		5 dias			16 dias			18 dias			30 dias					
	Comp. (mm)	Comp. (mm)	Exp. (%)	Média (%)	Comp. (mm)	Exp. (%)	Média (%)	Comp. (mm)	Exp. (%)	Média (%)	Comp. (mm)	Exp. (%)	Média (%)	DRM			
CPV-1	254,89	254,90	0,00		254,99	0,04		255,34	0,18		255,40	0,20					
CPV-2	254,41	254,50	0,04	0,03	254,61	0,08	0,07	254,96	0,22	0,21	255,07	0,26	0,24	15,6	Ok	-	
CPV-3	253,65	253,79	0,06		253,87	0,09		254,25	0,24		254,29	0,25					
Cim. P-1	255,74	255,95	0,09		256,10	0,14		256,11	0,15		256,13	0,16					
Cim. P-2	255,86	256,13	0,11	0,10	256,29	0,17	0,16	256,32	0,18	0,17	256,33	0,19	0,18	10,7	Ok	-	
Cim. P-3	255,60	255,89	0,11		256,02	0,16		256,06	0,18		256,07	0,18					
Cim.P+8SA-1	255,99	256,21	0,09		256,35	0,14		256,43	0,17		256,67	0,27					
Cim.P+8SA-2	255,89	256,17	0,11	0,10	256,29	0,16	0,15	256,35	0,18	0,18	256,57	0,27	0,27	4,7	Ok	-	
Cim.P+8SA-3	254,94	255,22	0,11		255,35	0,16		255,42	0,19		255,67	0,29					
Cim.P+VD10-1	255,68	256,09	0,16		256,33	0,26		256,41	0,29		256,55	0,35					
Cim.P+VD10-2	255,66	256,08	0,17	0,16	256,30	0,25	0,26	256,35	0,27	0,29	256,53	0,35	0,35	0,0	Ok	-	
Cim.P+VD10-3	255,79	256,19	0,16		256,49	0,28		256,55	0,30		256,67	0,35					
Cim.P+VD20-1	255,19	255,66	0,18		255,91	0,28		256,02	0,33		256,19	0,39					
Cim.P+VD20-2	254,33	254,80	0,19	0,18	255,05	0,29	0,29	255,15	0,33	0,33	255,30	0,38	0,38	2,6	Ok	-	
Cim.P+VD20-3	256,28	256,68	0,16		257,00	0,28		257,10	0,33		257,23	0,38					
Cim.P+VD30-1	256,57	256,56	-0,01		256,47	-0,04		256,69	0,05		256,65	0,03					
Cim.P+VD30-2	255,79	255,78	-0,01	-0,01	255,68	-0,05	-0,05	255,90	0,04	0,05	255,89	0,04	0,03	33,3	Maior que 20%	0,03	
Cim.P+VD30-3	255,70	255,69	-0,01		255,57	-0,05		255,82	0,05		255,78	0,03					

Tabela G.1 - Valores descritivos dos comprimentos, das expansões e expansões médias de todos os traços utilizados (continuação).

Traço	Leituras															Nova média (%)
	Inicial		5 dias		16 dias			18 dias			30 dias			DRM		
	Comp. (mm)	Comp. (mm)	Exp. (%)	Média (%)	Comp. (mm)	Exp. (%)	Média (%)	Comp. (mm)	Exp. (%)	Média (%)	Comp. (mm)	Exp. (%)	Média (%)	DRM	Conferência	
Cim.P+VD50-1	255,91	256,03	0,05		255,88	-0,01		256,19	0,11		256,15	0,10				
Cim.P+VD50-2	255,79	255,95	0,06	0,06	255,78	0,00	0,00	256,06	0,11	0,12	255,97	0,07	0,09	22,2	Maior que 20%	0,10
Cim.P+VD50-3	255,90	256,08	0,07		255,92	0,01		256,22	0,13		256,14	0,10				
REF-SA-1	255,59	255,82	0,09		255,88	0,12		255,80	0,08		255,90	0,12				
REF-SA-2	255,76	255,99	0,09	0,10	255,99	0,09	0,11	255,94	0,07	0,08	256,05	0,11	0,12	16,7	Ok	-
REF-SA-3	256,28	256,59	0,12		256,56	0,11		256,51	0,09		256,63	0,14				
VD10-1	255,73	256,09	0,15		256,11	0,15		256,05	0,13		256,11	0,15				
VD10-2	255,75	256,16	0,16	0,15	256,17	0,17	0,16	256,10	0,14	0,13	256,20	0,18	0,17	11,8	Ok	-
VD10-3	255,40	255,78	0,15		255,78	0,15		255,71	0,12		255,85	0,18				
VD20-1	255,63	256,19	0,22		256,20	0,22		256,15	0,20		256,24	0,24				
VD20-2	255,12	255,75	0,25	0,24	255,74	0,25	0,24	255,71	0,23	0,22	255,80	0,27	0,26	7,7	Ok	-
VD20-3	255,59	256,21	0,24		256,22	0,25		256,15	0,22		256,30	0,28				
VD30-1	256,00	256,01	0,01		255,87	-0,05		256,01	0,01		255,98	-0,01				
VD30-2	255,64	255,68	0,02	0,01	255,53	-0,04	-0,05	255,68	0,02	0,01	255,68	0,02	0,00	0,0	Ok	-
VD30-3	255,89	255,90	0,01		255,74	-0,06		255,94	0,02		255,89	0,00				
VD50-1	255,63	255,61	0,00		255,46	-0,06		255,65	0,01		255,55	-0,03				
VD50-2	255,92	255,90	-0,01	0,00	255,72	-0,08	-0,07	255,93	0,01	0,02	255,90	-0,01	-0,01	300,0	Maior que 20%	0,01
VD50-3	256,30	256,33	0,01		256,17	-0,05		256,39	0,03		256,36	0,02				

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela G.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos das expansões das barras de cimento padrão e CPV ao final dos 30 dias de ensaio de reação álcali-sílica.

Tabela G. 2 – Valores estatísticos descritivos da expansão da reação álcali-sílica dos cimentos padrão e CP V.

Grupo	Contagem	Soma (%)	Média (%)	Variância (%) ²
CP-V	3	0,71	0,24	0,00
Cimento padrão	3	0,53	0,18	0,00

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de expansão das barras de cimento padrão e CPV ao final dos 30 dias de ensaio de reação álcali-sílica. O resultado pode ser observado na Tabela G.3.

Tabela G. 3 – ANOVA das expansões médias das barras de cimento padrão e CP V ao final de 30 dias de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,01	1	0,01	8,53	0,04	7,71
Dentro dos grupos	0,00	4	0,00			
Total	0,01	5				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são estatisticamente diferentes.

Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os valores podem ser observados na Tabela G.4.

Tabela G. 4 - Teste de Tukey das expansões médias das barras de cimento padrão e CP V ao final de 30 dias de ensaio.

Traço	CP V	Cim. P.
CP V		Sim

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela G.5 são apresentados os valores estatísticos descritivos das expansões das barras de cimento padrão, cimento padrão com sílica e cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro ao final dos 30 dias de ensaio de reação álcali-sílica.

Tabela G. 5 – Valores estatísticos descritivos da expansão da reação álcali-silica dos compósitos cimentícios de cimento padrão, cimento padrão com sílica e cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro.

Grupo	Contagem	Soma (%)	Média (%)	Variância (%) ²
Cim. P.	3	0,53	0,18	0,00
Cim. P + 8SA	3	0,83	0,28	0,00
Cim. P + VD10	3	1,05	0,35	0,00
Cim. P + VD20	3	1,15	0,38	0,00
Cim. P + VD30	3	0,10	0,03	0,00
Cim. P + VD50	3	0,27	0,09	0,00

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de expansão das barras de cimento padrão e CPV ao final dos 30 dias de ensaio de reação álcali-silica. O resultado pode ser observado na Tabela G.6.

Tabela G. 6 – ANOVA da expansão da reação álcali-silica dos compósitos cimentícios de cimento padrão, cimento padrão com sílica e cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,30	5	0,06	492,85	0,00	3,11
Dentro dos grupos	0,00	12	0,00			
Total	0,30	17				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são estatisticamente diferentes.

Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os valores podem ser observados na Tabela G.7.

Tabela G. 7 – Teste de Tukey das barras de argamassa de cimento padrão com sílica e cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.

Traço	Cim. P.	Cim. P. + 8SA	Cim. P. +VD10	Cim. P. +VD20	Cim. P. +VD30	Cim. P. +VD50
Cim. P.		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Cim. P. + 8SA			Sim	Sim	Sim	Sim
Cim. P. + VD10				Sim	Sim	Sim
Cim. P. + VD20					Sim	Sim
Cim. P. + VD30						Sim

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela G.8 são apresentados os valores estatísticos descritivos das expansões das barras de cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro ao final dos 30 dias de ensaio de reação álcali-silica.

Tabela G. 8 -Valores estatísticos descritivos das expansões das barras de cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro.

Grupo	Contagem	Soma (%)	Média (%)	Variância (%) ²
Cim.P+VD10	3	1,05	0,35	0,00
Cim.P+VD20	3	1,15	0,38	0,00
Cim.P+VD30	3	0,10	0,03	0,00
Cim.P+VD50	3	0,27	0,09	0,00

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de expansão das barras de cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro ao final dos 30 dias de ensaio de reação álcali-sílica. O resultado pode ser observado na Tabela G.9.

Tabela G. 9 – ANOVA da expansão das expansões das barras de cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,29	3	0,10	1038,39	0,00	4,07
Dentro dos grupos	0,00	8	0,00			
Total	0,29	11				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são estatisticamente diferentes.

Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os valores podem ser observados na Tabela G.10.

Tabela G. 10 – Teste de Tukey das barras de argamassa de cimento padrão com os diversos teores de pó de vidro submetidas à cura agressiva.

Traço	Cim. P. +VD10	Cim. P. +VD20	Cim. P. +VD30	Cim. P. +VD50
Cim. P. + VD10		Sim	Sim	Sim
Cim. P. + VD20			Sim	Sim
Cim. P. + VD30				Sim

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela G.11 são apresentados os valores estatísticos descritivos das expansões das barras de REF-SA e das misturas com os diversos teores de pó de vidro.

Tabela G. 11 – Valores estatísticos descritivos das expansões das barras de argamassa de REF-SA e das misturas com os diversos teores de pó de vidro.

Grupo	Contagem	Soma (%)	Média (%)	Variância (%) ²
REF-SA	3	0,37	0,12	0,00
VD10	3	0,51	0,17	0,00
VD20	3	0,79	0,26	0,00
VD30	3	0,01	0,00	0,00
VD50	3	-0,02	-0,01	0,00

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA das expansões das barras de argamassa de REF-SA e das misturas com os diversos teores de pó de vidro ao final dos 30 dias de ensaio de reação álcali-sílica. O resultado pode ser observado na Tabela G.12.

Tabela G. 12 – ANOVA das expansões das barras de argamassa de REF-SA e das misturas com os diversos teores de pó de vidro.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,16	4	0,04	106,93	0,00	3,48
Dentro dos grupos	0,00	10	0,00			
Total	0,16	14				

Fonte: Autor (2019).

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte **conclusão: que se deve rejeitar H₀**, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, as médias das populações são estatisticamente diferentes.

Para avaliar os valores estatisticamente diferentes foi realizado o teste de Tukey, os valores podem ser observados na Tabela G.13.

Tabela G. 13 - Teste de Tukey das expansões das barras de argamassa de REF-SA e das misturas com os diversos teores de pó de vidro.

Traço	REF-SA	VD10	VD20	VD30	VD50
REF-SA		Não	Sim	Sim	Sim
VD10			Sim	Sim	Sim
VD20				Sim	Sim
VD30					Não

Obs: Não = não há diferença significativa; Sim = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2019).