

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

**EFEITOS FÍLER E POZOLÂNICO DO PÓ DE VIDRO EM
ARGAMASSAS**

ALEXANDRE LOPES BORGES

São Carlos
2021

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

**EFEITOS FÍLER E POZOLÂNICO DO PÓ DE VIDRO EM
ARGAMASSAS**

ALEXANDRE LOPES BORGES

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

Área de Concentração: Construção Civil

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

São Carlos
2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alexandre Lopes Borges, realizada em 10/06/2021.

Comissão Julgadora:

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

Prof. Dr. Juarez Hoppe Filho (UFOB)

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

***AOS MEUS PAIS, APARECIDA E EMIVAL,
MINHA SUSTENTAÇÃO E MAIORES INCENTIVADORES***

AGRADECIMENTOS

Com absoluta certeza não cheguei até aqui sozinho, e hoje ao estar concluindo esse processo, forma-se na minha mente toda memória coletiva das pessoas que construíram comigo o caminho para que eu pudesse seguir em frente.

Acima de tudo, agradeço a Deus por toda força, proteção, entendimento e benevolência.

Aos meus pais, Aparecida e Emival, e irmã, Paula, deixo expressa minha eterna gratidão por estarem comigo, mesmo distantes, nos dias de paz e nos dias de imensa tempestade. Por colocarem fé no meu potencial, e jamais descreditarem dos meus anseios.

Registro, aqui, minha profunda gratidão à minha orientadora Profa. Dra. Fernanda Giannotti pela experiência compartilhada, pela amizade, pelo apoio e contribuição no amadurecimento do meu conhecimento. E também por sempre estar pronta a ajudar com muita paciência e dedicação, doando-se em um trabalho conjunto. Sua dedicação aos orientados é inspiradora, muito obrigado por tudo.

Aos pesquisadores e técnico do Laboratório de Materiais e Componentes em especial ao José Roberto, Taís, Silvete, Adalberto, Gabriela, Sérgio e Lucas que foram imprescindíveis no desenvolvimento de todo esse trabalho, mas principalmente pela amizade construída. E aos demais, Mariana, Thiago, Carla e Juliana. Sem todos vocês tudo seria mais difícil.

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

Devo, também, meu reconhecimento a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que colaboraram com meu aprendizado por meio de ensinamentos que serão de vital importância no meu futuro profissional.

Aos colaboradores e servidores da UFSCar expresso minha gratidão pelo trabalho bem-feito que pude acompanhar nesses anos, pela atenção com os alunos e com o cuidado pela instituição.

Agradeço aos meus companheiros de apartamento Cléber e Daniele, que em momentos diferentes puderam ser parceiros no dia a dia. Gratidão pela boa convivência e pela amizade construída nesse período de mestrado.

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.

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 nas argamassas.

Aos laboratórios que contribuíram com a caracterização dos materiais: Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), Laboratório de Materiais da Construção Civil do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo.

Agradeço também à Holcim, pela doação de todo o cimento utilizado nesta pesquisa.

Certamente estes parágrafos não atenderam a todos que fizeram parte dessa importante fase da minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àqueles que não estão presentes entre essas palavras, mas podem ter certeza que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

“A tua lei não é a minha lei. A tua lei não é a lei dos deuses. É apenas o capricho ocasional de um homem. E eu não acredito que a tua proclamação tenha tal força que possa substituir as leis não escritas dos costumes e os estatutos infalíveis dos deuses. Porque essas leis não são leis de hoje, não são leis de ontem. São leis de todos os tempos. Ninguém sabe quando essas leis apareceram. E eu não vou arriscar o castigo dos deuses para satisfazer o orgulho de um pobre rei.”

-SÓFOCLES

RESUMO

BORGES, Alexandre L. **Efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro em argamassas**. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

A atividade da indústria cimenteira resulta em uma enorme quantidade de emissões de CO₂ devido principalmente à calcinação do calcário. Neste contexto, inúmeras pesquisas vêm abordando adições nos compósitos cimentícios a fim de substituir frações de cimento na produção de argamassas e concretos. É válido ressaltar que estas adições geralmente são oriundas de resíduos provenientes de outras indústrias, assim, além de diminuir a quantidade de materiais descartados, reduz os danos causados pelo destino inapropriado desses resíduos. No entanto, para que essas substituições sejam consideradas viáveis, diversos fatores devem ser analisados, buscando conhecer o material e o seu comportamento frente à nova aplicação. Estudos acerca do uso de vidro finamente moído como substituto parcial do cimento vêm sendo desenvolvidos, principalmente pela constatação de um bom desempenho como material pozolânico com partículas menores que 300 µm. Além desta pozolanicidade, já foi constatada ação física de preenchimento pelos grãos finos do material (efeito fíler), o que resulta no aperfeiçoamento do compósito cimentício modificado. Mas existem poucos estudos aprofundando a contribuição individual do pó de vidro em compósitos cimentícios devido aos seus efeitos físicos e químicos. Assim, este trabalho teve o objetivo de quantificar o desenvolvimento das propriedades mecânicas de argamassas causado pelo preenchimento e pelo efeito pozolânico do pó de vidro separadamente. Para isso, buscou-se inicialmente caracterizar o pó de vidro e determinar sua atividade pozolânica e comparar os resultados com os encontrados na literatura para outras adições e normas técnicas. Foram desenvolvidas argamassas com diferentes teores de substituição volumétrica (0%, 10%, 20%, 30% e 50%) de cimento pelo vidro finamente moído passante pela malha #200 (75 µm), buscando avaliar a incorporação de pó de vidro nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas. Para diferenciar o efeito fíler do pozolânico, foi utilizado fíler calcário, cuja distribuição granulométrica é similar ao pó de vidro estudado. Foram realizados ensaios de caracterização das argamassas nas propriedades de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático para argamassas com teores de cimento substituídos por vidro e fíler calcário na mesma quantidade. Os resultados da atividade pozolânica do pó de vidro indicaram reatividade pelos ensaios Chapelle modificado e condutividade elétrica, além da composição química com soma de óxidos SiO₂, Al₂O₃, e Fe₂O₃ superior a 70%, e a predominância amorfa por DRX. Os resultados mecânicos obtidos foram favoráveis ao teor de substituição de cimento por pó de vidro em 20% e foi possível constatar que em todas as propriedades analisadas houve a presença dos dois efeitos (fíler e pozolânico) do vidro finamente moído nas argamassas. Observou-se a atividade química mais lenta do pó de vidro em relação a do cimento, apresentando 24% em ganho de resistência à compressão por efeito pozolânico em relação ao valor de referência na idade mais avançada do estudo (91 dias).

Palavras-chave: Argamassa; pó de vidro; reação pozolânica; efeito fíler.

ABSTRACT

BORGES, Alexandre L. Filler and pozzolanic effects of glass powder in mortars. 144p. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Federal University of São Carlos. São Carlos, 2021.

The activity of the cement industry results in a huge amount of CO₂ emissions mainly due to the calcination of limestone. In this context, numerous researches have been approaching additions in cementitious composites to replace cement amounts in the production of mortars and concretes. It is worth noting that these additions usually come from waste from other industries, thus, in addition to reducing the amount of discarded materials, it reduces the damage caused by the inappropriate destination of this waste. However, for these replacements to be considered viable, several factors must be analyzed, seeking to know the material and its behavior given the new utility. Studies on the use of finely ground glass as a partial substitute for cement have been developed, mainly due to the verification of its good performance as a pozzolanic material with particles smaller than 300 µm. In addition to this pozzolanicity, a physical filling action by the fine grains of the material (filler effect) has been observed, which results in the improvement of the modified cementitious composite. But few studies are deepening the individual contribution of glass powder in cementitious composites due to its physical and chemical effects. Thus, this research aimed to quantify the development of mechanical properties of mortars caused by filling and the pozzolanic effect of the glass powder separately. For this, initially sought to characterize the glass powder and determine its pozzolanic activity and compare the results with those found in the literature for other additions and technical standards. Mortars were developed with different levels of volumetric replacement (0%, 10%, 20%, 30%, and 50%) of cement by finely ground glass passing through the mesh #200 (75 µm), seeking to evaluate the incorporation of glass powder in the physical and mechanical properties of mortars. To differentiate the filler effect from the pozzolanic one, limestone filler was used, whose particle size distribution is similar to the studied glass powder. Mortar characterization tests were carried out on the properties of axial compressive strength, water absorption by capillary, tensile strength by diametrical compression, and static modulus of elasticity for mortars with cement contents replaced by glass and limestone filler in the same amount. The results of the pozzolanic activity of the glass powder indicated reactivity by the Modified Chapelle and electrical conductivity tests, in addition to the chemical composition with the sum of SiO₂, Al₂O₃, and Fe₂O₃ oxides greater than 70%, and amorphous predominance by XRD. The mechanical results obtained were favorable to the cement replacement content by glass powder in 20% and it was possible to verify that in all the analyzed properties there was the presence of the two effects (filler and pozzolanic) of the finely ground glass in the mortars. The slower chemical activity of the glass powder was observed in relation to cement, with 24% gain in compressive strength due to pozzolanic effect concerning the reference value at the most advanced age of the study (91 days).

Keywords: Mortar; glass powder; pozzolanic reaction; filler effect.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivo geral.....	19
1.1.2 Objetivos específicos.....	20
1.2 Justificativa	20
1.3 Estrutura da dissertação	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Compósitos cimentícios e hidratação do cimento	25
2.2 Adições minerais em compósitos cimentícios	28
2.3 Avaliação da atividade pozolânica em adições minerais	31
2.4 Vidros	34
2.4.1 Vidro como material pozolânico.....	38
2.4.2 Pó de vidro e o efeito filer (EF)	43
2.5 Diferenciação entre pozolanicidade e efeito filer de pozolanas em compósitos cimentícios	45
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	54
3.1 Materiais Utilizados	55
3.1.1 Cimento	56
3.1.2 Pó de Vidro	57
3.1.3 Filer calcário	66
3.1.4 Agregado Miúdo.....	66
3.2 Definição dos traços e moldagem dos corpos de prova	67
3.3 Ensaio realizado em argamassas	72
3.3.1 Resistência à compressão axial.....	72
3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	73
3.3.3 Módulo de elasticidade estático	74
3.3.4 Absorção de água por capilaridade	75
3.4 Ensaio realizado em pasta: difração de raios X	77
3.5 Análise estatística dos resultados	79
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1 Caracterização dos materiais	81
4.1.1 Agregado Miúdo.....	81
4.1.2 Propriedades químicas, físicas e mineralógicas do cimento e adições minerais	83
4.1.3 Avaliação da atividade pozolânica do pó de vidro em três diferentes tamanhos máximos de grão	87
4.2 Definição dos traços	95
4.3 Ensaio realizado em argamassas	96

4.3.1	Resistência à compressão axial.....	96
4.3.2	Resistência à tração por compressão diametral	103
4.3.3	Módulo de elasticidade estático	106
4.3.4	Absorção de água por capilaridade	108
4.4	Ensaio realizado em pasta: difração de raios X	114
5.	CONCLUSÕES.....	119
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	121
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
	APÊNDICES	130
	Apêndice A – Resistência à compressão axial aos 7 dias	131
	Apêndice B – Resistência à compressão axial aos 28 dias	133
	Apêndice C – Resistência à compressão axial aos 91 dias	135
	Apêndice D – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	137
	Apêndice E – Módulo de elasticidade estático aos 28 dias	139
	Apêndice F – Absorção de água por capilaridade aos 28 dias.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Micrografia eletrônica de varredura da etringita.....	26
Figura 2.2 - Produtos de hidratação dos silicatos: a) Silicato de cálcio hidratado; b) Hidróxido de cálcio.....	27
Figura 2.3 - Taxonomia dos materiais cerâmicos.....	34
Figura 2.4 - Gráfico esquemático de Entalpia <i>versus</i> Temperatura para uma substância formadora de vidro mostrando quatro estados distintos: líquido, líquido super-resfriado, vidro e cristal. T_f = temperatura de fusão, T_{tv} = temperatura de transição vítrea	36
Figura 2.5 - Resistência à compressão do concreto com diferentes teores de pó de vidro	42
Figura 2.6 - Representação esquemática sobre hipótese de nucleação com presença de material inerte para hidratação do cimento	44
Figura 2.7 - Valores experimentais e teóricos de resistência à compressão do concreto com CCA e AN	47
Figura 2.8 - Acréscimos de resistência à compressão no concreto devido os efeitos fíler e pozolânico da CCA.....	47
Figura 2.9 - Distribuição granulométrica de materiais (a) P-CCA; P-AN e (b) G-CCA e G-AN	50
Figura 2.10 - Distribuições granulométricas acumuladas de CBCA e QT	52
Figura 3.1 - Esquematização do programa experimental.....	54
Figura 3.2 - Síntese da etapa de caracterização dos materiais.....	55
Figura 3.3 - Materiais utilizados: a) CP V ARI, b) pó de vidro passante pela #200, c) fíler calcário e d) agregado miúdo.....	56
Figura 3.4 - Aparelhagem utilizada na realização da granulometria a laser.....	57
Figura 3.5 - 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.....	58
Figura 3.6 - Moinho descarregando pó de vidro.....	58
Figura 3.7 - Agitador de peneiras Ro-Tap	59
Figura 3.8 - a) Composição de cada fração granulométrica de areia normal. b) Aferição de consistência da argamassa. c) Processo de mistura dos materiais. d) Processo de cura dos corpos de prova nas primeiras 24 h.	62
Figura 3.9 - a) Determinação do índice de consistência. b) Aferição do diâmetro no espalhamento. c) Primeiras 24 h de cura dos corpos de prova.	64
Figura 3.10 - Atividades realizadas para obtenção e caracterização do agregado miúdo: a) Aquisição do agregado miúdo; b) Recebimento do agregado miúdo; c) Secagem em estufa; d) Etapa de quarteamento para amostragem; e) Determinação das porcentagens de areia retida em cada peneira da série normal; f) Ensaio de determinação de finos por lavagem na peneira 75µm.	67
Figura 3.11 - Medição dos diâmetros para determinação da consistência da argamassa	69
Figura 3.12 - Procedimento de mistura das argamassas	70
Figura 3.13 - Argamassadeira utilizada no estudo	70
Figura 3.14 - a) Detalhe de CPs nas primeiras 24 h de cura; b) Corpos de prova em câmara úmida; c) CPs desmoldados e imersos em solução de água saturada de cal	71
Figura 3.15 - a) Retífica dos corpos de prova. b) Corpo de prova sendo ensaiado à compressão axial. c) Máquina Universal de Ensaios EMIC	73

Figura 3.16 - Procedimentos de ensaio para ensaio de tração por compressão diametral: a) Preparação da aparelhagem. b) Aplicação da carga.	74
Figura 3.17 - Ensaio de módulo de elasticidade estático	75
Figura 3.18 - Ensaio de absorção de água por capilaridade: a) Corpos de prova em estufa. b) Montagem do aparato. c) Amostras em contato com lâmina d'água..	76
Figura 3.19 - Preparação das pastas: a) Distribuição dos moldes confeccionados. b) Corpos de prova na cura em água saturada de cal.	77
Figura 3.20 - Preparação das amostras para ensaio de DRX: a) Moinho tipo almofariz-pistilo. b) Amostras armazenadas.	78
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo	82
Figura 4.2 - Difractogramas: a) Cimento. b) Pó de vidro.	84
Figura 4.3 - Curvas granulométricas do cimento e adições.	86
Figura 4.4 - Micrografias do pó de vidro passante pela peneira #200.	86
Figura 4.5 - Distribuição granulométrica do pó de vidro: a) Acumulada; b) Discreta.	87
Figura 4.6 - Resistência à compressão nos ensaios de IAP com a cal: pó de vidro nas três granulometrias estudadas e comparadas com pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário (BREKAILO <i>et al.</i> , 2019).	88
Figura 4.7 - Índice de desempenho com cimento Portland: pó de vidro nas três granulometrias estudadas e comparadas com pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário (BREKAILO <i>et al.</i> , 2019).	89
Figura 4.8 - Ensaio de Chappelle modificado: pó de vidro nas três granulometrias estudadas e comparadas com pó de cerâmica (BREKAILO <i>et al.</i> , 2019).	91
Figura 4.9 - Variação da condutividade do pó de vidro em três tamanhos máximos de partícula.	92
Figura 4.10 - Curvas de perda relativa de condutividade elétrica versus tempo (s) para a solução de CH e pó de vidro.	93
Figura 4.11 - a) Valores experimentais e teóricos para resistência à compressão axial média com VD e FC aos 7 dias. b) Acréscimos de resistência por EP e EF do pó de vidro aos 7 dias.	98
Figura 4.12 - a) Valores experimentais e teóricos para resistência à compressão axial média com VD e FC aos 28 dias. b) Acréscimos de resistência por EP e EF do pó de vidro aos 28 dias.	99
Figura 4.13 - a) Valores experimentais e teóricos para resistência à compressão axial média com VD e FC aos 91 dias. b) Acréscimos de resistência por EP e EF do pó de vidro aos 91 dias.	100
Figura 4.14 - a) Valores experimentais e teóricos para resistência à tração por compressão diametral com VD e FC aos 28 dias. b) Acréscimos de resistência por EP e EF do pó de vidro aos 28 dias.	104
Figura 4.15 - a) Valores experimentais e teóricos para módulo de elasticidade estático com VD e FC aos 28 dias. b) Acréscimos no módulo de elasticidade por EP e EF do pó de vidro aos 28 dias.	107
Figura 4.16 - Alturas de ascensão de água das argamassas analisadas.	109
Figura 4.17 - Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias.	110
Figura 4.18 - Sortividade para os traços na idade de 28 dias.	112
Figura 4.19 - a) Valores experimentais e teóricos para absorção de água com VD e FC aos 28 dias após 72 h de ensaio. b) Acréscimos na absorção de água por EP e EF do pó de vidro aos 28 dias após 72 h de ensaio.	113
Figura 4.20 - Difractogramas das pastas de cimento dos traços REF, VD20, VD50, FC20 e FC50 aos 28 dias: P – portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); C – calcita (CaCO_3); B – belita (Ca_2SiO_4); A – alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Produção anual de cimento Portland, segundo estados e regiões (em mil toneladas) em comparação com os maiores produtores no mundo no ano de 2018 (em milhões de toneladas).....	22
Tabela 2.1 - Classificação dos materiais pozolânicos.....	30
Tabela 2.2 - Requisitos químicos e físico-mecânicos dos materiais pozolânicos.....	30
Tabela 2.3 - Composições de vidros (%).....	37
Tabela 2.4 - Sinopse das pesquisas relacionadas à avaliação da pozolanicidade do pó de vidro com as respectivas granulometrias utilizadas.....	40
Tabela 2.5 - Resumo acerca de trabalhos analisados que investigam o EF de pozolanas.....	49
Tabela 3.1 Dados do peneiramento do pó de vidro.....	59
Tabela 3.2 - Proporções dos componentes nas misturas das argamassas para IAP com cal.....	61
Tabela 3.3 - Proporção de mistura das argamassas para determinação do índice de desempenho com cimento Portland.....	63
Tabela 3.4 - Ensaio de caracterização do agregado miúdo.....	66
Tabela 3.5 - Nomenclatura adotada para os traços estudados.....	68
Tabela 3.6 - Consumo de materiais em kg/m ³	68
Tabela 3.7 - Detalhamento das quantidades de CPs a serem produzidos.....	71
Tabela 3.8 - Ensaio realizado nas argamassas estudadas.....	72
Tabela 4.1 - Composição granulométrica do agregado utilizado.....	81
Tabela 4.2 - Caracterização física do agregado miúdo.....	82
Tabela 4.3 - Componentes químicos do cimento e adições.....	83
Tabela 4.4 - Propriedades físicas do cimento e adições.....	84
Tabela 4.5 - Condutividade elétrica (C_t) e variação da condutividade elétrica (Δ_t) no decorrer do ensaio entre 0 e 100.000 segundos.....	92
Tabela 4.6 - Avaliação da atividade pozolânica por medição da condutividade elétrica.....	92
Tabela 4.7 - Perda relativa de condutividade elétrica (%) em função do tempo (s) para diferentes adições.....	93
Tabela 4.8 - Resumo com os resultados de atividade pozolânica para pó de vidro.....	94
Tabela 4.9 - Traço unitário e índices de consistência.....	95
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial das argamassas aos 7, 28 e 91 dias.....	97
Tabela 4.11 - Resistência à tração por compressão diametral das argamassas com 28 dias de idade.....	104
Tabela 4.12 - Módulo de elasticidade estático aos 28 dias de idade.....	106
Tabela 4.13 - Absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas aos 28 dias e ao final das 72 horas de ensaio.....	109
Tabela 4.14 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta REF.....	116
Tabela 4.15 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta VD20.....	116
Tabela 4.16 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta VD50.....	116
Tabela 4.17 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta FC20.....	117
Tabela 4.18 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta FC50.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

#100	Peneira número 100 com abertura na malha de 150 µm
#200	Peneira número 200 com abertura na malha de 75 µm
#325	Peneira número 325 com abertura na malha de 45 µm
A	Alita
a/agl	Relação água/aglomerante
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AN	Areia natural
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Belita
C	Calcita
CAT	Concreto com agregado de lascas de tijolo
CAT-CCA	Concreto com agregado de lascas de tijolo com teores de substituição de cimento pela cinza de casca de arroz
CAT-AN	Concreto com agregado de lascas de tijolo com teores de substituição de cimento pela areia natural
CBCA	Cinza do bagaço de cana de açúcar
CCA	Cinza de casca de arroz
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CP	Corpo de prova
CP II F-32	Cimento Portland composto com fíler calcário
CP V ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CR	Concreto referência
CV	Coeficiente de variação
d50	Mediana
DRX	Difratometria de raios X
EF	Efeito fíler
EP	Efeito pozolânico
FC	Fíler calcário

FC10	Traço com substituição volumétrica (em relação ao pó de vidro) do cimento por 10% de filer calcário, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
FC20	Traço com substituição volumétrica (em relação ao pó de vidro) do cimento por 20% de filer calcário, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
FC30	Traço com substituição volumétrica (em relação ao pó de vidro) do cimento por 30% de filer calcário, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
FC50	Traço com substituição volumétrica (em relação ao pó de vidro) do cimento por 50% de filer calcário, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
FRX	Fluorescência de raios X
FWHM	Largura a meia altura dos picos
G-AN	Areia natural em maiores tamanhos de partículas
G-CCA	Cinza da casca de arroz em maiores tamanhos de partículas
H0	Hipótese inicial de médias iguais
H1	Hipótese de médias diferentes
IAP	Índice de atividade pozolânica com cal aos sete dias
ID	Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LMC	Laboratório de materiais e componentes
LSR	Líquido super-resfriado
MCS	Materiais cimentícios suplementares
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MK	Metacaulim
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
P	Portlandita
P-AN	Areia natural em menores tamanhos de partículas
P-CCA	Cinza da casca de arroz em menores tamanhos de partículas
P_r	Perda relativa de condutividade elétrica

QT	Quartzo triturado
R3	Rápido, robusto e relevante
RAS	Reação álcali-sílica
REF	Traço de referência com 0% de substituição volumétrica do cimento, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>
RP	Resíduo de porcelana
SCA	Sílica da casca de arroz
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TC 267-TRM	<i>Tests for Reactivity of Supplementary Cementitious Materials</i>
T_f	Temperatura de fusão
T_{tv}	Temperatura de transição vítrea
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
VD	Pó de vidro
VD10	Traço com substituição volumétrica do cimento por 10% de pó de vidro, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
VD20	Traço com substituição volumétrica do cimento por 20% de pó de vidro, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
VD30	Traço com substituição volumétrica do cimento por 30% de pó de vidro, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
VD50	Traço com substituição volumétrica do cimento por 50% de pó de vidro, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
α	Nível de significância

1. INTRODUÇÃO

A ação antrópica é a maior responsável pelo aquecimento global nos últimos 50 anos, pois a emissão de dióxido de carbono envolvendo as atividades de inúmeras indústrias é muito alta. Nesse contexto, a produção de cimento contribui para aproximadamente 7% das emissões de CO₂ do mundo (SNIC, 2019). Pela relevância social que o cimento possui e pelo vasto abastamento de seus constituintes nas inúmeras localidades do globo, é um material produzido praticamente em todos os países, sendo a substância industrializada mais consumida no mundo (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Ainda segundo Oliveira *et al.* (2014), a indústria cimenteira está mobilizada em mitigar as emissões de CO₂ dos materiais cimentícios, sendo que a estratégia mais comumente utilizada para a redução dos impactos ambientais do concreto é a redução do teor de clínquer no cimento. Para isso, são incorporadas adições ativas e inertes, que são resíduos de outras cadeias produtivas, como as cinzas volantes, oriundas da queima de carvão mineral principalmente em termoelétricas, e a escória de alto-forno, gerada na produção do ferro-gusa, ou ainda o fíler calcário.

Dentro desta perspectiva, 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 Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2011), o Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro e recicla somente 47% destas embalagens. Outro número expressivo é que, no Brasil, em média, 3% de todos os resíduos urbanos são compostos por vidro, e 1% corresponde somente às embalagens de vidro.

Pesquisas mais recentes, como as de Siad *et al.* (2017), Du e Tan (2017), Zheng (2016) e Krstic e Davalos (2019), por exemplo, vem demonstrando grande potencial da utilização do pó de vidro como material cimentício suplementar ao cimento. Tentativas de utilizar o vidro como agregado não demonstraram sucesso devido a sua geometria tipicamente alongada e irregular que prejudica a

trabalhabilidade, além do possível desenvolvimento da reação álcali-sílica (SHARIFI *et al.*, 2016).

Porém, Zheng (2016) explicita que sendo amorfo e contendo grande quantidade de silicato, o vidro pode ser usado como um material pozolânico quando moído finamente (partículas menores que 300 μm). O autor ainda explica que é de grande conhecimento que o concreto com substituição parcial de agregados por fragmentos de vidro não é vantajoso por causa da reação álcali-sílica entre grãos de vidro e solução alcalina em poros.

Em relação à reação álcali-sílica, Soares, Ferreira e Salvador Filho (2018) avaliaram a expansão de matrizes cimentícias com agregado potencialmente reativo e quatro teores de substituição (10, 20, 30 e 50%) de cimento por pó de vidro com maior tamanho de partícula de 75 μm . Para os teores de 10% e 20% de substituição a expansão foi de 0,19% atingida antes do 9º e 16º dias de ensaio, respectivamente. Sendo que o comportamento para o teor de 20% foi praticamente o mesmo que o observado pelo traço de referência. Já para os teores de 30% e 50% a expansão não atingiu o limite de 0,19%, indicando a mitigação da reação álcali-sílica, mesmo o agregado sendo potencialmente reativo.

Desta maneira, pretende-se desenvolver neste trabalho um estudo experimental sobre a substituição de parcelas de cimento por vidro finamente moído em argamassas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as propriedades física e mecânicas de argamassas com a incorporação de pó de vidro em substituição parcial do cimento Portland, buscando-se diferenciar os efeitos fíler e pozolânico do material.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a pozolanicidade do pó de vidro em três tamanhos máximos de grãos: 150 μm , 75 μm e 45 μm ;
- Avaliar a atividade pozolânica por diferentes métodos de ensaio: diretos e indiretos.
- Realizar a caracterização química e mineralógica do pó de vidro a ser utilizado na produção das argamassas;
- Determinar o teor ideal da incorporação de pó de vidro com diferentes teores de substituição volumétrica em relação ao cimento (10%, 20%, 30% e 50%);
- Comparar os efeitos do pó de vidro em argamassas, em relação às propriedades física e mecânicas, com a incorporação de fíler calcário (material com curva granulométrica similar ao pó de vidro) nos mesmos teores.
- Avaliar a microestrutura de pastas com as incorporações de pó de vidro e fíler calcário.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os resíduos de vidro representam problemas ambientais urgentes pelo mundo. Estes materiais ocupam enormes espaços em aterros, e devido a sua natureza não biodegradável, o material é causador de poluições ambientais graves (como ar, água e solo). Além disso, a falta de espaços para novos aterros é um problema enfrentado pelas densas cidades em diferentes países. A melhor solução para superar o impacto ambiental desses resíduos de vidro é reutilizá-los (JANI; HOGGLAND, 2014).

Assim, o uso do vidro na indústria da construção está entre a opção mais atraente para valorizar este desperdício, pois pode consumir uma quantidade significativa desses materiais e não exige condições de qualidade tão altas quanto para a reciclagem do material (JANI; HOGGLAND, 2014; KHMIRI; CHAABOUNI; SAMET, 2013).

Além disso, Mirzahosseini e Riding (2014) expõem que vidros coletados de cores diferentes são frequentemente misturados, mas vidro colorido misto não pode ser reciclado, porque uma mistura de diferentes agentes corantes resulta em uma coloração e propriedades imprevisíveis e incontroláveis no novo vidro. Algumas máquinas são capazes de usar sensores ópticos para classificar eficientemente a cor dos grandes pedaços de vidro. No entanto, a classificação de pequenos pedaços não é viável e econômica. Nesse sentido, a indústria de concreto, para os autores, é um dos caminhos possíveis para reutilizar milhões de toneladas de cascos de vidro por ano como material cimentício suplementar.

Outra questão pertinente é que em alguns locais no Brasil não há indústrias de reciclagem do vidro, como por exemplo a cidade de Manaus, que segundo Nascimento, Costa e Damas (2018) no ano de 2016 apenas 1% do lixo manauara era reciclado, e a outra parcela era descartada no aterro sanitário de Manaus, incluindo o vidro, já que não há empresas de reciclagem do material na cidade. Segundo os autores as dificuldades para se processar a reciclagem do vidro em Manaus são muitas, a falta de política pública específica para o material, o custo, processo de coleta, separação, descontaminação e energia utilizada são alguns exemplos delas.

Nesta mesma perspectiva, a indústria de cimento é uma indústria que produz enormes quantidades de emissões de CO₂, principalmente por decorrência das calcinações de calcário e combustão de combustíveis fósseis. Assim, mais de 80% das emissões de CO₂ da construção civil decorrem da produção de cimento (XU *et al.*, 2012).

Segundo o Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) entre os anos de 1990 e 2018 a produção de cimento brasileira aumentou pouco mais de 200%. Na Tabela 1.1 é apresentada a produção anual (valores em mil toneladas) de cimento entre os anos de 2010 e 2019 por estado, além dos subtotais por região e total pelo país. Também é colocada a produção anual, entre os anos de 2012 e 2018, dos maiores países produtores de cimento do mundo no ano de 2018.

Tabela 1.1 - Produção anual de cimento Portland, segundo estados e regiões (em mil toneladas) em comparação com os maiores produtores no mundo no ano de 2018 (em milhões de toneladas).

ESTADOS/REGIÕES	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Rondônia	576	696	713	553	411	458	256	206	221	179
Amazonas	725	813	785	772	639	667	641	559	286	334
Pará	1502	1553	1636	1709	1597	1272	1486	1333	892	806
Tocantins	470	523	564	510	631	826	705	539	676	572
Ajustes*	-	-	-	-	-	-	-	-	410	247
NORTE	3273	3585	3698	3544	3278	3223	3088	2637	2485	2138
Maranhão	384	425	883	939	793	761	673	468	314	298
Piauí	627	609	655	647	706	680	591	279	-	-
Ceará	1863	1985	2136	2129	2717	2796	2614	2462	2216	2242
Rio Grande do Norte	463	658	1293	1544	1898	1878	1376	1023	811	798
Paraíba	2162	2025	2462	2356	2292	1963	2345	2310	2303	2814
Pernambuco	848	1079	1257	1206	1218	893	550	383	214	317
Alagoas	674	706	703	818	817	551	341	131	47	282
Sergipe	3031	3181	3080	3310	3379	3000	2077	1926	1835	1893
Bahia	1179	1270	1346	1510	1506	1437	1171	1086	1036	1176
Ajustes*	-	-	-	-	284	839	1192	1424	2059	1798
NORDESTE	11231	11938	13815	14459	15610	14798	12930	11492	10835	11618
Mato Grosso do Sul	890	973	1031	949	878	851	734	637	617	701
Mato Grosso	997	1177	1123	1542	1717	1359	1041	1034	1176	1128
Goiás	1324	1392	1599	1650	1617	1327	1070	1486	1716	1920
Distrito Federal	3159	3540	3882	4122	4437	4068	2942	2620	2528	2451
CENTRO-OESTE	6370	7082	7635	8263	8649	7605	5787	5777	6037	6200
Minas Gerais	14162	15240	16465	15650	16354	14153	12006	11577	12701	14998
Espírito Santo	2370	2546	2616	2667	2563	2263	1762	1494	754	682
Rio de Janeiro	4174	4974	5087	5183	3846	3468	2521	1926	2399	2975
São Paulo	9035	9564	9428	9977	9153	7825	5874	5197	5195	5235
Ajustes*	-	-	-	-	2486	3388	4881	5190	4380	3690
SUDESTE	29741	32324	33596	33477	34402	31097	27044	25384	25429	27580
Paraná	5685	5746	5589	6143	6175	6009	6293	5837	5994	6152
Santa Catarina	455	988	1979	1783	2249	1869	1456	1419	1415	1503
Rio Grande do Sul	2122	2190	2225	2228	2057	1830	1509	1402	1346	1357
Ajustes*	240	240	272	264	83	58	53	56	61	63
SUL	8502	9164	10065	10418	10564	9766	9311	8714	8816	9075
TOTAL BRASIL **	59,1	64,1	68,8	70,2	72,5	66,5	58,2	54,0	53,6	56,6
CHINA**	-	-	2137,0	2420,0	2480,0	2350,0	2403,0	2316,3	2176,7	-
ÍNDIA**	-	-	270,0	280,0	260,0	270,0	289,3	285,0	327,7	-
VIETNÃ**	-	-	60,0	58,0	60,5	57,4	77,3	78,8	90,2	-
EUA**	-	-	74,9	77,4	83,2	83,4	84,7	86,1	87,8	-
EGITO**	-	-	46,1	50,0	50,0	55,0	55,0	53,0	81,2	-

*Dados estimados (estimativa da oferta de cimento oriundo de empresas não associadas ao SNIC).

**Em milhões de toneladas.

Fonte: Adaptado de SNIC (2019).

A partir da análise da Tabela 1.1 é possível observar diminuição da produção nacional de cimento entre os anos de 2015 e 2018, que ocorreu devido à diminuição considerável do país no investimento em infraestrutura, segundo SNIC (2019). No ano de 2018 o Brasil ocupava o 12º lugar como maior produtor de cimento no mundo com a produção de 53,6 milhões de toneladas do material. O maior produtor foi a China com 2176,7 milhões de toneladas de cimento produzidas.

Ainda segundo o relatório, a indústria cimenteira nacional recorre ao uso de adições ao cimento. O aproveitamento de subprodutos de outras atividades e matérias-primas alternativas é realizado há mais de 50 anos no país. A produção de cimentos com adições de materiais como escórias siderúrgicas, cinzas volantes, argilas calcinadas e fíler calcário, além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento, contribui significativamente para a redução de emissões, representando também uma solução ambientalmente correta para subprodutos de outros processos produtivos e para a preservação de recursos naturais não renováveis. No período de 1990 a 2018 o setor conseguiu reduzir a relação clínquer/cimento de 80% para 69%, alcançando o maior teor de uso de adições no mundo (SNIC, 2019).

Assim, a substituição parcial do cimento por materiais alternativos, vem há alguns anos se popularizando e mostrando bons resultados econômicos, ambientais, e frente ao comportamento solicitado nas estruturas. O pó de vidro moído é um desses materiais.

Alguns estudos (SHAYAN; XU, 2006; IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2010; MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012; KHMIRI; CHAABOUNI; SAMET, 2013; NWAUBANI; POUTOS, 2013; BARROS, 2016; SHARIFI *et al.*, 2016; DU; TAN, 2017; SIAD *et al.*, 2017) já relataram o bom desempenho do pó de vidro como material cimentício suplementar em argamassas e concretos, principalmente em relação à sua pozolanicidade e ao efeito fíler nas propriedades físicas, mecânicas e relacionadas à durabilidade.

Mas ainda há poucas informações acerca do entendimento de cada um dos efeitos separadamente, buscando compreender especificamente quais componentes, fatores e condições são responsáveis pelos efeitos fíler e pozolânico, diferenciando cada uma dessas ações nas matrizes cimentícias com incorporação de vidro finamente moído. Assim, a investigação deste trabalho se concentra na

identificação e quantificação desses efeitos do pó de vidro como uma adição mineral, por meio de análises das propriedades mecânicas e física.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco 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 as justificativas para o desenvolvimento da pesquisa.

No capítulo dois é apresentada a revisão bibliográfica, em que foi feito o embasamento teórico da pesquisa, sendo apresentados e discutidos basicamente os compósitos cimentícios e a hidratação do cimento, os vidros e a utilização do pó de vidro como material cimentício suplementar e a diferenciação entre pozolanidade e efeito fíler de adições minerais em compósitos cimentícios.

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 que foram analisados.

Os resultados obtidos pela caracterização dos materiais são apresentados no quarto capítulo, bem como a discussão pertinente.

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 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS E HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo devido à sua versatilidade, durabilidade, sustentabilidade e custo favorável (KRSTIC; DAVALOS, 2019). Sua composição é basicamente formada por cimento, agregados, adições, aditivos e água. O cimento é o elemento responsável por aglomerar as partículas e ligá-las por meio da formação de produtos hidratados.

Essa combinação de materiais permite que o concreto tenha uma consistência adequada ao transporte, lançamento e adensamento do material nas formas. A química complexa e a estrutura física dos hidratos de cimento no concreto, no entanto, significam algumas questões da ciência fundamental que ainda precisam ser resolvidas, como questões adicionais sobre a natureza das fases do cimento hidratado e sua interação com aditivos, fílers e fibras (RAKI *et al.*, 2010).

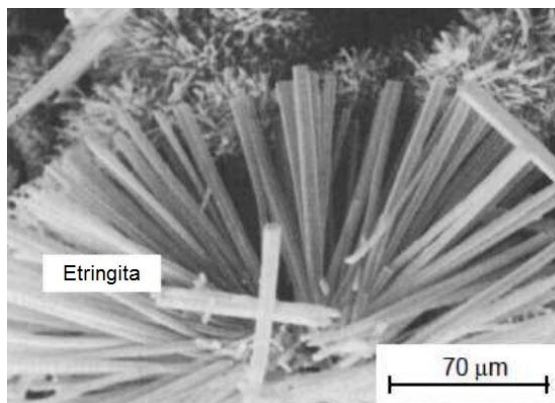
O clínquer é o material básico necessário para a fabricação de cimento. Tal material é obtido pelo aquecimento de uma mistura de farinha crua que contém calcário, argila e óxidos de ferro e alumínio.

O endurecimento hidráulico do cimento ocorre por hidratação desses grãos de clínquer que possuem os principais compostos químicos divididos em dois agentes silicatos (silicato tricálcico, C_3S e silicato dicálcico, C_2S) e dois agentes aluminatos (aluminato tricálcico, C_3A e ferroaluminato tetracálcico, C_4AF) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A hidratação dos aluminatos na presença do gesso, que é adicionado na fabricação do cimento, resulta na formação da etringita, $C_6AS_3H_{32}$, que assume forma de agulhas e começa minutos após o início da hidratação. Este composto é um dos responsáveis pelo fenômeno de início de pega, que se refere ao momento em que, após a adição de água, começam as reações químicas de cristalização do cimento que culminam no endurecimento e na solidificação da mistura (NEVILLE,

2016). Na Figura 2.1 é possível observar a micrografia eletrônica de varredura deste composto.

Figura 2.1 - Micrografia eletrônica de varredura da etringita



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

Nas pastas de cimento puro, a etringita se transforma em monossulfato hidratado, C_4ASH_{18} , esse composto forma cristais de placas hexagonais. A etringita, normalmente é o primeiro hidrato a se cristalizar por causa da alta relação sulfato/aluminato na fase aquosa durante a primeira hora de hidratação (NEVILLE, 2016).

Num próximo momento, após o sulfato ter sido consumido, quando a concentração de íons aluminato aumenta devido à nova hidratação de C_3A e C_4AF , a etringita se torna instável e é gradualmente convertida para a fase monossulfato (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Já a hidratação dos silicatos resulta na formação de hidróxidos de cálcio e silicatos de cálcio hidratado, estes últimos possuem composição química muito variada, sendo que estes compostos são responsáveis pelo preenchimento do espaço previamente ocupado pela água e pelas partículas de cimento em dissolução, além de serem responsáveis pelo endurecimento da pasta de cimento.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o cimento é composto basicamente por clínquer, sulfato de cálcio e adições (como fíler, pozolanas, escórias). Quando disperso em água, o sulfato de cálcio e compostos de cálcio são dissolvidos e a solução fica saturada com espécies iônicas distintas. Nos primeiros minutos acontece a reação dos íons hidroxila com o cálcio, aluminatos, e sulfatos, ocasionando no desenvolvimento do primeiro composto hidratado (etringita), que

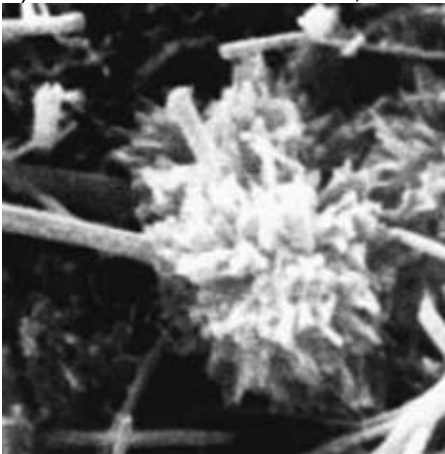
são cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado. Nas próximas horas são formados grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio (portlandita, CH) e pequenos hidratos de silicato de cálcio (C-S-H).

Este último componente (C-S-H) é o principal produto da hidratação do cimento Portland. É um material quase amorfo, que forma até cerca de 60% em volume da pasta. Na química do cimento, CaO, SiO₂ e H₂O são representados por C, S e H, respectivamente. Os hífens em C-S-H indicam estequiometria indefinida e o hidrato às vezes é chamado de "gel C-S-H". Silicato de cálcio hidratado é produzido juntamente com hidróxido de cálcio (portlandita, CH) na reação química das fases de silicato com água. O C-S-H é o principal composto da pasta de cimento e é responsável por propriedades como resistência mecânica, retração e durabilidade. A resolução da estrutura desse material na escala nanométrica é uma parte essencial da compreensão e previsão de seu comportamento (RAKI *et al.*, 2010).

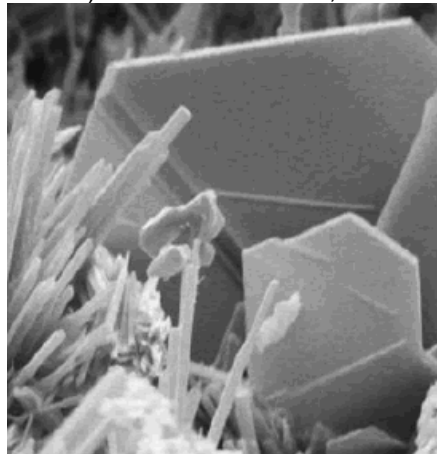
A portlandita, diferente do C-S-H, é um produto de hidratação de estequiometria definida, Ca(OH)₂. Compõe de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada e possui morfologia de placas hexagonais empilhadas. Esse composto possui área superficial menor que o C-S-H e contribui menos que o silicato de cálcio para a resistência da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Na Figura 2.2 é possível observar os produtos da hidratação dos silicatos separadamente.

Figura 2.2 - Produtos de hidratação dos silicatos: a) Silicato de cálcio hidratado; b) Hidróxido de cálcio

a) Silicato de cálcio hidratado, C-S-H



b) Hidróxido de cálcio, CH



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Até recentemente, o cimento Portland era considerado o único material cimentício do concreto, porém diversos materiais cimentícios suplementares são atualmente considerados constituintes do concreto, e é necessário conhecer e aprofundar de forma isolada as influências e o papel de cada um desses materiais no comportamento do concreto (NEVILLE, 2016).

Segundo Bastos *et al.* (2016), nas últimas décadas, um conjunto de micropartículas cimentícias suplementares impulsionou o desenvolvimento de compósitos cimentícios de alto desempenho, sendo cinza volante, sílica ativa e escória granulada de alto forno os mais utilizados.

Faz-se necessário salientar que o uso desses materiais em compósitos cimentícios é um importante exemplo de prática sustentável, onde as adições minerais normalmente utilizadas são resíduos provenientes de outras indústrias, os quais seriam descartados em grandes quantidades em locais impróprios, gerando riscos de contaminação do solo e fontes de água. E, no mundo atual, a incorporação de práticas de sustentabilidade na construção tornou-se um imperativo para todos os agentes da sociedade, tais como governos, consumidores, investidores, construtores e associações (FONSECA, 2010).

2.2 ADIÇÕES MINERAIS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

As adições minerais são definidas por Albuquerque e Lima (2014) como um conjunto de insumos inorgânicos que atuam modificando as propriedades do concreto visando o alcance de um melhor desempenho tanto no âmbito econômico à medida que substituem o cimento, como no enfoque ambiental. Para este último, Dal Molin (2005) expõe a redução dos danos causados pelo descarte inapropriado de resíduos provenientes de outras indústrias.

Além das questões ambientais e econômicas, Isaia e Gastaldini (2004) expõem as vantagens técnicas que as adições minerais trazem para as estruturas de concreto. No campo da durabilidade, por exemplo, o refinamento dos poros e grãos leva à uma microestrutura mais densa e homogênea levando a um bom desempenho mecânico e tamponando os poros, evitando a percolação de fluidos, aumentando a performance frente a ambientes agressivos.

As adições são usadas com a finalidade de substituir frações de cimento. Dessa forma, as adições minerais podem ser classificadas pela sua reatividade, formando assim, três grupos: materiais pozolânicos, cimentantes e fíler.

O primeiro grupo se difere do segundo ao passo que as pozolanas, finamente moídas, necessitam reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio na presença de umidade e à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes. São exemplos de pozolanas: sílica ativa e cinza da casca de arroz.

Já o segundo grupo não necessita do hidróxido de cálcio para formar compostos ligantes. A reatividade das adições cimentantes está relacionada com a solubilidade com álcalis e com a capacidade de precipitação de compostos hidratados insolúveis. São exemplo de adições cimentantes: escória de alto forno e cinza volante (SILVA, 2010).

O fíler, por sua vez, apresenta baixa atividade química e age fisicamente no concreto por meio do empacotamento granulométrico e refinamento dos poros. O fíler calcário é um exemplo desta categoria de adições minerais (DAL MOLIN, 2005).

De acordo com a NBR 12653:2014 (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 divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes.”

Além disso, a NBR 12653:2014 (ABNT, 2014) define atividade pozolânica pela capacidade de determinado material reagir com o hidróxido de cálcio (produto da reação do cimento com água) e formar compostos com propriedades cimentícias.

Basicamente, isso ocorre, pois presença de água o cimento Portland libera hidróxido de cálcio como um subproduto da hidratação dos silicatos (C_3S e do C_2S), este produto é um composto com estequiometria definida, $Ca(OH)_2$, e oferece uma contribuição limitada à resistência e durabilidade da pasta de cimento hidratada quando comparado ao C-S-H, devido à sua área superficial consideravelmente mais baixa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Com a reação pozolânica o hidróxido de cálcio combina-se com material pozolânico, formando C-S-H secundário, o que melhora ainda mais as propriedades mecânicas e durabilidade da pasta de cimento hidratada. “Quando o concreto é

misturado com pozolana em proporção de 20% a 30%, teoricamente toda cal produzida pela hidratação do cimento Portland pode ser transformada em silicato de cálcio hidratado C-S-H” (BARROS, 2016).

Além desse fator, Mehta e Monteiro (2014) salientam outro aspecto técnico importante no uso de cimentos com presença de pozolanas. Segundo os autores, nessas circunstâncias a reação de hidratação é lenta, desta maneira, as taxas de liberação de calor e ganho de resistência também são vagarosas.

Posto isto, a NBR 12653:2014 (ABNT, 2014) estabelece alguns requisitos para classificação dos materiais pozolânicos. Na Tabela 2.1 estão expostos os parâmetros de classificação e na Tabela 2.2 os requisitos químicos e físico-mecânicos para classificação.

Tabela 2.1 - Classificação dos materiais pozolânicos

Classe	Material
N	Pozolanas naturais e artificiais que obedeçam aos requisitos desta Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
C	Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, que obedeçam aos requisitos desta Norma.
E	Quaisquer pozolana, não contempladas nas classes N e C, que obedeçam aos requisitos desta Norma.

Fonte: Adaptado de NBR 12653:2014 (ABNT, 2014).

Tabela 2.2 - Requisitos químicos e físico-mecânicos dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
Material retido na peneira 325 (abertura de 45 μm)	$< 20 \%$	$< 20 \%$	$< 20 \%$
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 90 \%$	$\geq 90 \%$	$\geq 90 \%$
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$

Fonte: Adaptado de NBR 12653:2014 (ABNT, 2014).

Neville (2016) destaca que é essencial que a pozolana seja finamente moída, pois somente assim a sílica pode se combinar com o hidróxido de cálcio na presença de água para formar silicatos de cálcio estáveis com propriedades

cimentícias. O autor ainda coloca que a sílica precisa ser amorfa, ou seja, vítrea, já que sílica cristalina tem baixíssima reatividade.

Assim, o vidro finamente moído, utilizado como material cimentício suplementar, apresenta um potencial pozolânico, pois, seu conteúdo amorfo e com alto teor de sílica confere tal característica (KHMIRI; CHAABOUNI; SAMET, 2013).

2.3 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA EM ADIÇÕES MINERAIS

A combinação de materiais pozolânicos com cimentos há muito é usada em práticas de construção. A pesquisa sobre especificações e métodos de teste de cinzas volantes teve início na década de 1930, quando a cinza volante, proveniente de usinas elétricas a carvão, foi usada em concretos. A primeira classificação de pozolanas naturais, baseada nos constituintes pozolânicos, foi introduzida na década de 1950. Além disso, as investigações sobre o desempenho da sílica ativa em concreto começaram nos países escandinavos por volta de 1950 (POURKHORSHIDI, 2013).

Os métodos e procedimentos padrão para a avaliação das especificações e requisitos para pozolanas são designados em duas categorias principais: métodos diretos e métodos indiretos. Os métodos diretos monitoram a presença de Ca(OH)_2 e sua redução subsequente com o tempo conforme a reação pozolânica prossegue. Ou seja, algumas propriedades químicas e mineralógicas da pozolana são rastreadas e medidas para fornecer uma base e avaliar a qualidade da pozolana. Alguns exemplos de métodos diretos são a análise termogravimétrica, análise mineralógica pela Difração de Raios X, teste Frattini, e Chapelle modificado (POURKHORSHIDI, 2013).

Já os métodos indiretos medem propriedades físicas e mecânicas de uma amostra de teste que indicam a extensão da atividade pozolânica, portanto, algumas características da pozolana em combinação com cimento ou cal (por exemplo, resistência à compressão de argamassa contendo pozolana como substituição de cimento ou em combinação com cal) são medidas e a qualidade pozolânica é avaliada. Alguns exemplos de métodos indiretos são o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com a cal aos sete dias, Índice de Desempenho (ID) com cimento

Portland aos 28 dias e avaliação da pozolanicidade por meio da condutividade elétrica.

Segundo a NBR 12653:2014 (ABNT, 2014), no caso do ensaio de IAP com cal, as argamassas contendo a adição em estudo devem atingir resistência à compressão mínima de 6,0 MPa para os materiais em questão serem classificados como materiais pozolânicos e passíveis de incorporação na composição de cimento Portland composto ou pozolânico.

Este método de investigação é padronizado pela NBR 5751:2015 (ABNT, 2015) e baseado na determinação da resistência à compressão de corpos de prova moldados com proporção volumétrica dos materiais sólidos na mistura fixa e volume de água variável, para obter nas argamassas em estado fresco um índice de consistência pré-estabelecido de (225 ± 5) mm.

Assim, os resultados de resistência à compressão para diferentes materiais pozolânicos não podem ser comparados, mas sim relacionados a um valor mínimo arbitrário, pois, as condições preconizadas pela norma interferem diretamente no valor de resistência à compressão, visto que alterar o volume de água na mistura, mantendo constante o volume de particulados interfere na porosidade do conjunto, o que por sua vez influencia a resistência à compressão do corpo de prova de material endurecido (HOPPE FILHO *et al.*, 2017).

Nesse contexto, Pourkhorshidi (2013) coloca que pesquisas sobre materiais pozolânicos resultaram em vários padrões e métodos de teste para avaliação. No entanto, para o autor é evidente que esses métodos são incapazes de projetar todos os aspectos do desempenho da pozolana no concreto, pois alguns procedimentos padrão negligenciam totalmente a importância do desempenho da pozolana na mistura de concreto, além de apresentarem ambiguidades.

Segundo Luxán, Madruga e Saavedra (1989) os primeiros a desenvolver um método para avaliar a atividade pozolânica pela medição da condutividade elétrica foram Raask e Bhaskar (1975) que investigaram a atividade pozolânica da cinza de combustível pulverizado utilizando ácido hidrossulfúrico como dispersante pelo qual se pode medir a quantidade de sílica dissolvida. Tal método representou um avanço devido à sua velocidade em comparação com os anteriores e foi utilizado para ser aplicado a cinzas volantes de centrais elétricas.

Já Luxán, Madruga e Saavedra (1989) estabeleceram uma correlação entre a pozolanicidade de materiais naturais e sua condutividade elétrica. Tais autores

observaram uma boa correlação entre a diminuição da condutividade e a formação de hidratos durante a reação pozolânica.

Este método apresenta como vantagem uma rápida avaliação da pozolanicidade quando comparada a outros ensaios e tem sido usado em pesquisas recentes (FERREIRA *et al.*, 2013; AMAR *et al.*, 2017; FERNANDES *et al.*, 2017).

As adições minerais possuem uma variedade de características físico-químicas e vários fatores interferem na interação com a cal para formação de constituintes cimentícios. Tais pontos moldam a complexidade de quantificar a atividade pozolânica de um material e dificulta a padronização de uma metodologia normativa para caracterização e hierarquização destes materiais. A compatibilização entre a aplicação com o desenvolvimento do potencial reativo das adições demanda rigor científico para designar à matriz cimentícia apropriadas características físicas e mecânicas, assim, diferentes metodologias avaliativas devem ser empregadas para investigar o desempenho do uso pozolânico de um material (HOPPE FILHO *et al.*, 2017).

Assim, RILEM TC 267-TRM (*Tests for Reactivity of Supplementary Cementitious Materials*) foi estabelecido para avaliar os testes de reatividade pozolânica existentes e desenvolver uma recomendação pré-normativa para testes de reatividade rápidos que podem ser adotados como métodos padrão. Os pesquisadores recomendam que os métodos de teste devem fornecer resultados mais rapidamente do que os regimes de teste de resistência à compressão padrão, devem ser simples e robustos de executar e não devem exigir equipamentos caros ou treinamento avançado dos praticantes (LI *et al.*, 2018).

Li *et al.* (2018) investigaram 10 diferentes testes de reatividade e 11 materiais cimentícios suplementares (MCSs), cobrindo as principais classes de materiais em uso. Os autores utilizaram diferentes métodos buscando fazer uma correlação com a resistência à compressão de corpos de prova de argamassas padrão com substituição de 30% em massa de MCS em relação ao cimento na idade de 28 dias.

Os autores concluíram no estudo que ensaios de calorimetria são os melhores para estimar a pozolanicidade dos materiais, enquanto métodos como Chapelle e Frattini não mostraram correlações aceitáveis em todos os materiais analisados.

Snellings *et al.* (2019) expõem que existem diversos métodos de teste de reatividade para MCSs, mas frequentemente falham em um ou mais dos principais

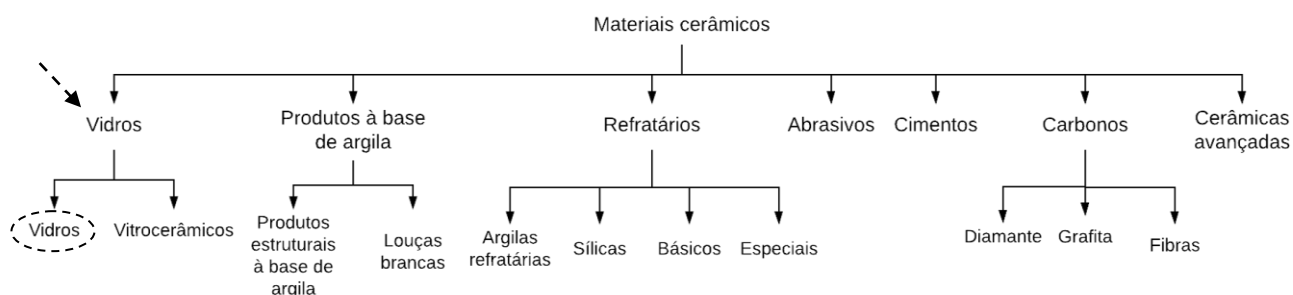
requisitos de um teste adequado (principalmente em fatores como escopo, praticidade, reprodutibilidade e relevância do resultado). Um teste de reatividade química Rápido, Robusto e Relevante (R3) aplicável a uma ampla gama de MCSs serviria não apenas como referência global, mas também removeria as ambiguidades atuais em relação à classificação.

O princípio básico dos métodos de teste R3 é usar um sistema de modelo simplificado para medir separadamente a reação de um MCS. Isso evita a interferência e a sobreposição com as reações de hidratação do clínquer que ocorrem em um sistema de mistura de cimento. Além disso, o uso de produtos químicos de laboratório em vez de cimentos Portland locais evita muita variabilidade relacionada ao material. São exemplos de testes que usam a metodologia R3: calorimetria (*calorimetry test*), água combinada (*bound water*), retração química (*chemical shrinkage*) e consumo de portlandita (*portlandite consumption*) (LI *et al.*, 2018; SNELLINGS *et al.*, 2019).

2.4 VIDROS

Os vidros são classificados por Callister e Rethwisch (2016) como sendo um grupo familiar de materiais cerâmicos. Os autores descrevem que os materiais pertencentes à classificação das cerâmicas possuem variados tipos de aplicações, assim, muitas vezes, se complementam de maneira recíproca. Na Figura 2.3 é apresentada a taxonomia dos materiais cerâmicos, com ênfase ao grupo dos vidros.

Figura 2.3 - Taxonomia dos materiais cerâmicos



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

O vidro é o resultado da fusão de vários minerais inorgânicos, que, após passarem por um processo de resfriamento controlado, tornam-se um material duro, homogêneo, estável, inerte, amorfo e isotrópico (MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012).

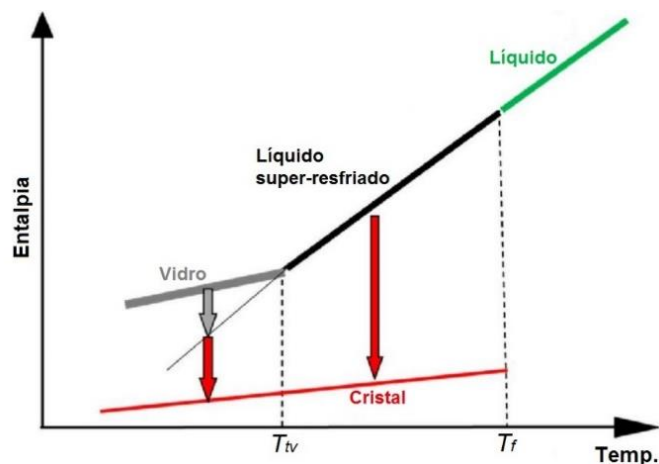
Assim, se a diminuição da temperatura ocorrer de maneira lenta ocorrerá formação de cristais. Porém, com o decréscimo acelerado da temperatura, se toda a massa fundida passar pela transição vítrea, haverá a formação de um vidro (BARROS, 2016).

Barros (2016) ainda expõe que, por anos era válida a definição de vidro como sendo um material inorgânico, tendo como principal componente a sílica, resfriado sem cristalização para uma condição rígida, formando um conjunto tridimensional desproporcionado e sem periodicidade. Mas, o autor salienta que a estrutura química do material não mais pode ser um fator único para definir vidro, ao passo que apesar de a maioria dos vidros possuir em sua composição elementos inorgânicos, contendo sílica em sua formulação, existem vidros metálicos e vidros orgânicos que hoje são conhecidos.

Zanotto e Mauro (2017), buscando esclarecer significados de sólido e líquido e revisando várias definições de vidro anteriormente publicadas, propuseram uma definição do material. Segundo os autores: “O vidro é um estado de matéria condensada não cristalina, sem equilíbrio, que exibe uma transição vítrea. A estrutura dos vidros é semelhante à de seus líquidos super-resfriados (LSR), e eles relaxam espontaneamente em direção ao estado do LSR. Seu destino final, no limite do tempo infinito, é cristalizar”.

Na Figura 2.4 está exposto o gráfico de entalpia *versus* temperatura, em que é possível observar que os vidros encontram-se abaixo da temperatura de transição vítrea (T_{tv}). Eles são termodinamicamente instáveis e relaxam espontaneamente em direção ao estado LSR a qualquer temperatura diferente de zero (seta cinza na Figura 2.4). Com o aumento de temperatura, um vidro muda para um LSR em T_{tv} . Acima ou abaixo de T_{tv} , por períodos de tempo suficientemente longos, qualquer LSR ou vidro relaxa e depois cristaliza (setas vermelhas na Figura 2.4).

Figura 2.4 - Gráfico esquemático de Entalpia versus Temperatura para uma substância formadora de vidro mostrando quatro estados distintos: líquido, líquido super-resfriado, vidro e cristal. T_f = temperatura de fusão, T_{tv} = temperatura de transição vítrea



Fonte: Adaptado de Zanotto e Mauro (2017)

Assim, é possível observar o quão dinâmico o vidro é frente aos diferentes estados da matéria, havendo diferenças entre pesquisadores na definição do material.

Com base na composição principal, o vidro pode ser classificado em várias categorias, mas o vidro soda-cal é o mais amplamente utilizado (MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012).

Os principais tipos de vidro citados por Vieitez *et al.* (2011) são:

1. Soda-cal ou sodocálcico;
2. Borossilicato;
3. Cristal de chumbo e cristal;
4. Vidro elétrico, também chamado de E.

Ainda segundo Vieitez *et al.* (2011), as três primeiras categorias apresentadas representam mais de 95% de todo o vidro produzido. Os vidros de soda-cal (sem cor e coloridos) e os de borossilicato são os tipos de vidro mais utilizados. O vidro de soda-cal é frequentemente usado para produzir recipientes de vidro (embalagem, frascos), vidro doméstico (copos, louças) e vidro plano (janelas de edifícios). Já o vidro de borossilicato é utilizado para uso farmacêutico, equipamentos de laboratório

e iluminação (como lâmpadas de alta potência). As composições e características de alguns vidros comerciais comuns são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Composições de vidros (%)

Tipo de Vidro	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Outros	Características e Aplicações
Sílica Fundida	>99,5	-	-	-	-	-	Elevada temperatura de fusão, coeficiente de expansão muito pequeno (resistente a choques térmicos)
96% de Sílica (Vycor)	96	-	-	-	4	-	Resistente a choques térmicos e a ataques químicos – vidrarias de laboratório
Borossilicato (Pyrex)	81	3,5	-	2,5	13	-	Resistente a choques térmicos e a ataques químicos – usado em vidros para fornos
Recipientes (sodocálcico)	74	16	5	1	-	4 MgO	Baixa temperatura de fusão, trabalhabilidade e também durável
Fibra de vidro	55	-	16	15	10	4 MgO	Facilmente estirada na forma de fibras – compósitos de fibras de vidro e resina
Sílex óptico	54	1	-	-	-	37 PbO, 8 K ₂ O	Alta massa específica e alto índice de refração – lentes ópticas
Vitrocerâmico (Pyroceram)	43,5	14	-	30	5,5	6,5 TiO ₂ , 0,5 As ₂ O ₃	Facilmente fabricada; resistente; resiste a choques térmicos – vidros para fornos

Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2016).

Os vidros sodocálcicos possuem o carbonato de sódio ou soda (Na₂CO₃) que é adicionado para diminuir o ponto de fusão da sílica para cerca de 1500°C. No entanto, a adição de soda leva à corrosão do vidro. Para proporcionar uma melhor durabilidade química do vidro, são adicionados óxido de cálcio ou cal (CaO), óxido de magnésio (MgO) e óxido de alumínio (Al₂O₃). Assim, a soda serve como uma substância para baixar a temperatura na qual a sílica derrete, e a cal atua como um estabilizador da sílica. O vidro com sodocálcico é barato, quimicamente estável, razoavelmente duro e extremamente viável, porque é capaz de ser reabilitado várias vezes, se necessário (VIEITEZ *et al.*, 2011).

Entre os diversos tipos de vidros, o vidro sodocálcico é o mais comumente utilizado, como em garrafas, janelas e refratários. Esta é a razão pela qual a maioria

das pesquisas e publicações se concentra no reuso do vidro sodocálcico como materiais cimentícios suplementares no concreto (DU; TAN, 2017).

2.4.1 VIDRO COMO MATERIAL POZOLÂNICO

Pesquisas sobre o uso de vidros triturados como substituto parcial para agregados remonta algumas décadas. Embora o trabalho sobre o uso de vidro finamente moído como material pozolânico também tenha começado no início da década de 1970, a maior parte dos trabalhos nessa área é relativamente recente e tem sido incentivada como resultado do contínuo acúmulo de vidro residual e suas consequentes questões ambientais. Além disso, o vidro residual é potencialmente um material muito útil e aplicações econômicas apropriadas precisam ser encontradas para ele (SHAYAN; XU, 2006).

Tal ideia é reforçada por Sharifi *et al.* (2016), que descrevem que o conceito de usar resíduos de vidro no concreto não é novo, e que os estudos iniciais foram realizados para usar resíduos de vidro triturado como um substituto para o agregado. No entanto, os autores relatam que essas tentativas não foram satisfatórias devido à forte reação entre os álcalis presentes no cimento e a sílica reativa no vidro (reação álcali-sílica: RAS).

Entretanto, os autores expõem que o vidro em pó com granulometrias menores (como as apresentadas pelos estudos na Tabela 2.3), apresenta bom desempenho como um material pozolânico em concreto. Eles relataram que as misturas contendo pó de vidro também obtiveram um desempenho satisfatório em relação à retração por secagem e reatividade alcalina, além da redução de penetração do íon cloreto no concreto, mitigando, assim, o risco de corrosão induzida por cloreto do reforço de aço no concreto (SHARIFI *et al.*, 2016).

O mesmo é observado por Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) que relatam que o tamanho da partícula de vidro é o principal parâmetro que controla os valores de RAS. Um limiar crítico 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 entre 2,5–5 mm e 1,25–2,5 mm levaram a uma expansão significativa dos prismas

de concreto. O tamanho das partículas abaixo desse limiar não teve efeito nas variações dimensionais.

Da mesma forma, Khmiri, Chaabouni e Samet (2013) estudando a atividade pozolânica de resíduos de vidro finamente moídos com tamanhos de partícula na faixa de 100-80 μm ; 80-40 μm ; <40 μm e <20 μm , quando utilizados como substitutos parciais do cimento em argamassas encontraram que a classe de 20 μm (menor finura) exibiu um melhor comportamento pozolânico.

Outra análise interessante evidenciada por Nwaubani e Poutos (2013), com base em um estudo sobre a viabilidade da inclusão de vidro residual como substituição parcial de cimento em sistemas cimentícios, é que para a atividade pozolânica se tornar evidente a curto prazo, os autores indicam que a finura das partículas de vidro usadas devem ser pelo menos tão fina quanto a do pó de cimento.

Além disso, os autores salientam que o nível de substituição mais o tamanho e a distribuição das partículas são fatores de fundamental importância para que a vantagem da atividade pozolânica com pó de vidro se torne notória (NWAUBANI; POUTOS, 2013). Na Tabela 2.4 é exposta uma síntese com as granulometrias de pó de vidro utilizadas por pesquisadores em trabalhos anteriores.

Tabela 2.4 - Sinopse das pesquisas relacionadas à avaliação da pozzolanicidade do pó de vidro com as respectivas granulometrias utilizadas.

Autor(es)	Material estudado	Teores de substituição / Granulometria de pó de vidro	Propriedades estudadas	Principais resultados
(SHAYAN; XU, 2006)	Concreto	0%, 20% e 30% em relação ao cimento / 88% <10 µm e 12% > 15 µm.	Resistência à compressão, tração por compressão diametral, resistência à flexão, retração, expansão, velocidade de pulso ultrassônico, volume de vazios e permeabilidade ao cloreto.	Aos 28 dias, apenas a mistura com 20% de pó de vidro, havia cumprido o requisito de resistência para concreto de 40 MPa. No entanto, aos 404 dias, todas as outras misturas alcançaram a resistência de 55 MPa.
(IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2010)	Argamassa	20% e 40% em relação à areia / 8 granulometrias diferentes: entre 3750 µm e 8 µm	Avaliação pozzolânica por ensaio de resistência à compressão em amostras argamassa e análise de reação álcali-silica por meio do monitoramento de alterações dimensionais.	Não foi registrada expansão devido à reação álcali-silica quando o diâmetro dos grãos de vidro é menor que 1000 µm.
(MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012)	Argamassa	10 e 20% em relação ao cimento / < 50 µm	Resistência à tração e à flexão aos 7, 28, 90 e 180 dias, reação álcali-silica, difusão de íons cloreto, absorção de água por capilaridade, resistência à carbonatação, resistência ao ataque de sulfatos.	Bom desempenho de resistência com pó de vidro foram obtidos aos 90 dias de cura, melhor resultado com 20% de substituição. Apesar do alto conteúdo alcalino no pó de vidro, a expansão pela reação álcali sílica foi reduzida drasticamente.
(KHMIRI; CHAABOUNI; SAMET, 2013)	Argamassa	20% em relação ao cimento / 100-80 µm; 80-40 µm; <40 µm e <20 µm.	Atividade pozzolânica pelos métodos indiretos de IAP com cal e ID com cimento, e resistência à compressão.	O pó de vidro < 20 µm exibiu um melhor comportamento pozzolânico.
(NWAUBANI; POUTOS, 2013)	Argamassa	5%, 20% e 30% em relação ao cimento / < 300 µm	Resistência à compressão, absorção de água	Concreto com 5% de substituição aos 28 dias obteve o melhor resultado de resistência à compressão. Já a absorção de água aumentou com o aumento do teor de pó de vidro.

Tabela 2.4 - Sinopse das pesquisas relacionadas à avaliação da pozzolanicidade do pó de vidro com as respectivas granulometrias utilizadas (continuação).

Autor(es)	Material estudado	Teores de substituição / Granulometria de pó de vidro	Propriedades estudadas	Principais resultados
(SHARIFI et al., 2016)	Concreto autoadensável	5, 10, 15, 20, 25 e 30% em relação ao cimento / <100 µm.	Resistência à compressão, tração por compressão diametral e flexão, absorção de água, retração por secagem livre, densidade e reação álcali-sílica (RAS).	O uso de pó de vidro até a substituição máxima de 15% produz concreto com melhor desempenho de resistência à compressão. Com o aumento da quantidade de pó de vidro, houve uma redução gradual na expansão da RAS.
(BARROS, 2016)	Concreto	10, 15 e 20% em relação ao cimento. / < 75µm	Compressão axial e tração por compressão diametral aos 7, 14, 21, 28 e 90 dias de cura.	Misturas de concreto contendo 10% vidro apresentaram melhores resultados de resistência à compressão e tração por compressão diametral.
(DU; TAN, 2017)	Concreto	15, 30, 45 e 60% em relação ao cimento / < 120 µm	Resistência à compressão, absorção de água, condutividade elétrica, penetração e difusão de cloretos.	15% e 30% de pó de vidro apresentaram o maior aumento de resistência e correspondeu à menor porosidade. A partir de 30%, o hidróxido de cálcio tornou-se insuficiente para a reação pozzolânica do pó de vidro.
(SIAD et al., 2017)	Argamassa	25, 50, 75 e 100% em relação à cinza volante / < 100 µm	Resistência à compressão e à flexão, atividade pozzolânica por métodos diretos de análises microestruturais, penetração de cloretos e testes de resistividade.	Melhor desempenho em 25% de substituição. Boa capacidade de cura das argamassas com pó de vidro, especialmente a um nível de substituição de 25%.
(PATEL et al., 2019)	Pasta e argamassa	5, 10, 15, 20 e 25% em relação ao cimento / < 75 µm e 63 µm	Resistência à compressão axial, retração por secagem, absorção de água, índice de consistência	A comparação do resultado mostra que a mistura com pó de vidro passante pela abertura de 63 µm é, em geral, mais eficiente na substituição do cimento em até 20% com microestrutura melhorada.
(HE et al., 2019)	Concreto	10, 20 e 30% em relação ao cimento / < 100 µm	Resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, fluência,	O uso de pó de vidro reduz as resistências à compressão e o módulo de elasticidade nas primeiras idades, mas o uso de teores menores que 20% aumentam a resistências à compressão e o módulo de elasticidade nas idades posteriores.

Fonte: Autor

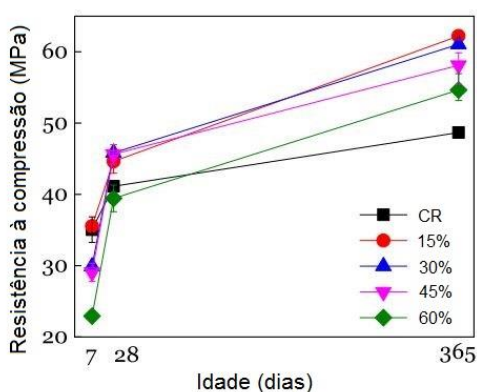
Um resultado interessante sobre a análise da pozolanicidade do vidro finamente moído (partículas menores que 120 μm) em compósitos cimentícios é averiguado por Du e Tan (2017). Os pesquisadores avaliaram propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto com cimento substituído por vidro finamente moído na proporção em volume de até 60%, relação a/agl de 0,49 e consumo de cimento de 380 kg/m^3 no traço de referência.

Para os autores as análises microestruturais de difração de raios X e termogravimetria indicaram que o pó de vidro fino reagiu com o hidróxido de cálcio para formar silicatos de cálcio hidratado. Como tal, a microestrutura dos concretos era mais compacta e homogênea, especialmente na zona de transição.

Concretos com cimento substituído por 15% e 30% de pó de vidro apresentaram o maior aumento de resistência à compressão na idade de 365 dias (cerca de 27% maior que a mistura de referência) e correspondeu à menor porosidade. Acima de 30% de substituição, foi observado que o hidróxido de cálcio se tornou insuficiente para a ocorrência da reação pozolânica do pó de vidro. No entanto, o concreto com alto volume de pó de vidro manteve uma resistência distinta contra a entrada de água (sortividade referente a apenas 9% da mistura de referência), devido à redução no tamanho dos poros e conectividade (DU; TAN, 2017).

Na Figura 2.5 é possível observar os resultados obtidos pelos autores, em que o aumento de resistência dos materiais com diferentes níveis de substituição de pó de vidro (15, 30, 45 e 60%) em relação ao concreto referência (CR) principalmente na idade de 365 dias.

Figura 2.5 - Resistência à compressão do concreto com diferentes teores de pó de vidro



Fonte: Adaptado de Du e Tan (2017)

2.4.2 PÓ DE VIDRO E O EFEITO FÍLER (EF)

Basicamente, fíler é uma adição mineral com diâmetro médio próximo ao do cimento, que atua sem atividade química. Sua influência “se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para hidratação de grãos de cimento” (DAL MOLIN, 2005).

Ainda segundo a autora, sua ação física confere benefícios para algumas propriedades do concreto, quando presente em pequenas quantidades (geralmente menor que 15% sobre a massa do cimento). Entre as características aperfeiçoadas, pode-se citar a trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, exsudação e a tendência à fissuração (DAL MOLIN, 2005).

Goldman e Bentur (1993) salientam que a influência dos microfílers não reativos tem a ver com a modificação da microestrutura da zona de transição no concreto, tornando-a muito mais densa e mais resistente do que em concretos convencionais. Isto evidencia a grande importância para concretos de alta resistência, pois tendem a exibir um comportamento interessante devido a uma ligação mais eficaz entre a matriz da pasta com o agregado, ocasionada pela presença do fíler.

Outro aspecto importante destacado por Hoppe Filho (2008), é o fato de que a presença de materiais inertes na pasta, de distribuição granulométrica próxima à do cimento, intervém na cinética de reação da hidratação do cimento. O autor explicita que:

As finas partículas do material inerte atuam como pontos extras de nucleação, favorecendo a precipitação dos hidratos sobre a superfície dos grãos do fíler, além do próprio cimento. Como resultado, a camada de hidratos gradualmente formada sobre os grãos anidros do cimento demanda maior intervalo de tempo para recobri-los, aumentando o período em que a hidratação ocorre por dissolução/precipitação. Com a evolução das reações, a espessura da camada de hidratos formada é mais delgada em relação à da pasta sem a presença do fíler, facilitando a difusão da água rumo à fração anidra para prosseguimento da hidratação por mecanismo topoquímico (HOPPE FILHO, 2008, p. 113).

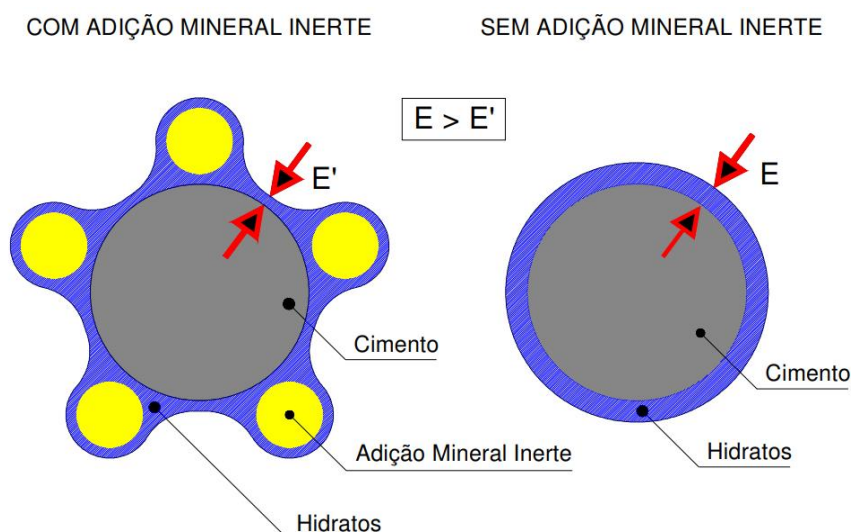
Esta questão sobre a indução de pontos extras de nucleação na hidratação de grãos de cimento pela ação de partículas não reativas de fíler é evidenciada por Cyr, Lawrence e Ringot (2005). Os pesquisadores evidenciaram mudanças na hidratação do cimento quando pós de quartzo quimicamente inertes são utilizados

em argamassas. Os autores determinaram o grau de hidratação por meio de um método empírico pelo calor liberado nas reações.

Os autores concluíram que a precipitação dos hidratos ocorre exclusivamente na superfície dos grãos do clínquer, mantendo o grau de hidratação constante, porém proporcional à quantidade de material ligante presente na argamassa. Observaram que o grau de hidratação do cimento aumentava quanto maior a área específica do fíler utilizado, ou seja, quanto menor a dimensão das partículas do material inerte.

A disponibilidade de novos pontos de nucleação no sistema cimentício estimula a precipitação dos hidratos na superfície dos grãos do cimento e do material inerte (HOPPE FILHO, 2008). Esta hipótese apresentada por Cyr, Lawrence e Ringot (2005) sobre o efeito superficial para nucleação heterogênea na presença de material fíler pode ser observada na Figura 2.6, em que a camada de hidratos que recobre os grãos de clínquer possui menor espessura que na pasta de cimento sem a presença de quartzo.

Figura 2.6 - Representação esquemática sobre hipótese de nucleação com presença de material inerte para hidratação do cimento



Fonte: Adaptado de Lawrence, Cyr e Ringot (2003)¹ *apud* Hoppe Filho (2008)

Em um estudo sobre a viabilidade da utilização de argamassas de revestimento cimentícias com a incorporação de agregados muito finos de vidro, realizado por Oliveira, Brito e Veiga (2013), foram encontradas melhorias em várias

¹ LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 12, p. 1939–1947, 2003.

características que podem ser explicadas pelo efeito fíler, como contribuição para o aumento da compacidade, reduzindo a absorção de água e aumentando a resistência mecânica.

Já Sharifi *et al.* (2016) destacam que o efeito fíler de micro-partículas de vidro residual na produção de misturas de concreto autoadensável é um fator que pode ter causado um aumento na resistência à compressão devido o efeito de preenchimento dos grãos de partículas de pó de vidro. Mas os autores salientam, ainda, que nas misturas com 25 e 30% de pó de vidro, obtiveram um leve decréscimo na resistência à compressão, cerca de 2,8 e 6,9% em comparação com a referência, respectivamente. Isso pode ser devido ao fato de que a quantidade de vidro presente na mistura foi maior do que a quantidade necessária para combinar com a cal liberada durante o processo de hidratação, levando ao excesso de sílica e causando uma diminuição na resistência mecânica.

2.5 DIFERENCIAÇÃO ENTRE POZOLANICIDADE E EFEITO FÍLER DE POZOLANAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Expostas as análises sobre o efeito fíler (EF) e estudos acerca da presença desta característica em compostos cimentícios com suplemento de vidro finamente moído, faz-se necessário destacar como pesquisadores vêm desenvolvendo métodos para a investigação deste efeito de preenchimento nos variados modelos de estudo.

Khan *et al.* (2017), em sua pesquisa acerca do efeito fíler de materiais pozolânicos no desenvolvimento de resistência e microestrutura em argamassa, descrevem que para verificar o efeito de preenchimento de pozolanas no concreto faz-se necessário um estudo comparativo com uso de materiais não reativos quimicamente (como negro de fumo e calcário, por exemplo) em vez de pozolanas reativas como materiais de substituição de cimento. Esses materiais devem ser quimicamente inertes e idênticos, considerando o tamanho das partículas e a finura dos materiais pozolânicos estudados.

Noaman, Karim e Islam (2019) utilizaram este método para diferenciar os efeitos pozolânico e fíler da cinza de casca de arroz (CCA) sobre as propriedades mecânicas e a microestrutura do concreto com agregado de lascas de tijolo (CAT). Os autores descrevem que o EF da cinza da casca de arroz foi calculado com base no método proposto por Khan *et al.* (2017), e a areia natural (AN) disponível localmente foi usada como material não reativo, com tamanho de partícula semelhante à da CCA.

É válido ressaltar que na avaliação física dos materiais, as massas específicas de CCA e AN foram, respectivamente, 2,00 g/cm³ e 2,63 g/cm³. Para obter dois materiais fisicamente semelhantes, os autores realizaram moagens de ambos por meio da máquina de abrasão de Los Angeles, com 14 esferas de aço de 48 mm de diâmetro. Para CCA foram realizadas moagens de 60, 90 e 150 min, já AN passou pelo mesmo processo durante 150 min. Por fim, ambos materiais foram passados pela peneira #200. Ao final do processo, AN e CCA possuíam tamanho mediano de partícula de 9,85 µm (NOAMAN; KARIM; ISLAM, 2019).

Assim, o EP da CCA sobre as propriedades mecânicas do concreto foi determinado pela Equação 2.1:

$$EP = \alpha - \beta \quad (2.1)$$

Onde, EP = efeito pozolânico do concreto; α = propriedades do concreto com substituição pela cinza; β = propriedades do concreto com substituição pela areia natural (NOAMAN; KARIM; ISLAM, 2019).

Já o EF da cinza da casca de arroz nas propriedades mecânicas do concreto foi avaliado pela comparação entre os valores experimentais do concreto com a areia natural (material quimicamente inativo) e os valores da mistura de referência (sem nenhuma substituição).

Por exemplo, o valor para resistência à compressão do concreto com 10% de areia natural (AN) é “X” MPa e o valor de referência é “Y” MPa, assim o efeito fíler (EF) de 10% de CCA é dado pela Equação 2.2:

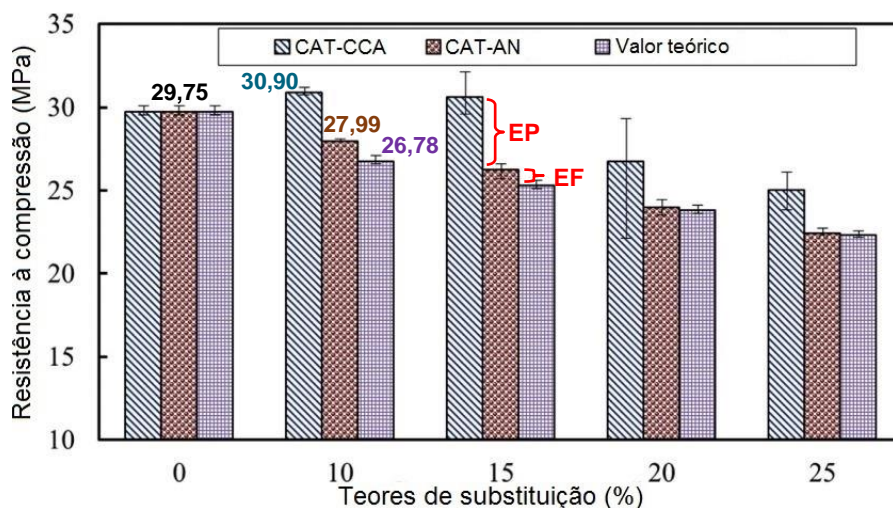
$$EF = X - 0,9.Y \quad (2.2)$$

Para outros teores, basta substituir o multiplicador de “Y”.

Na Figura 2.7 é possível analisar comparativamente os valores de resistência à compressão obtidos com o concreto com diferentes teores de substituição pela cinza (CAT-CCA) e pela areia natural (CAT-AN) em relação aos valores de referência. Enquanto que na Figura 2.8 há um gráfico diferenciando os ganhos de resistência do concreto por efeito pozolânico e efeito fíler da cinza da casca de arroz (NOAMAN; KARIM; ISLAM, 2019).

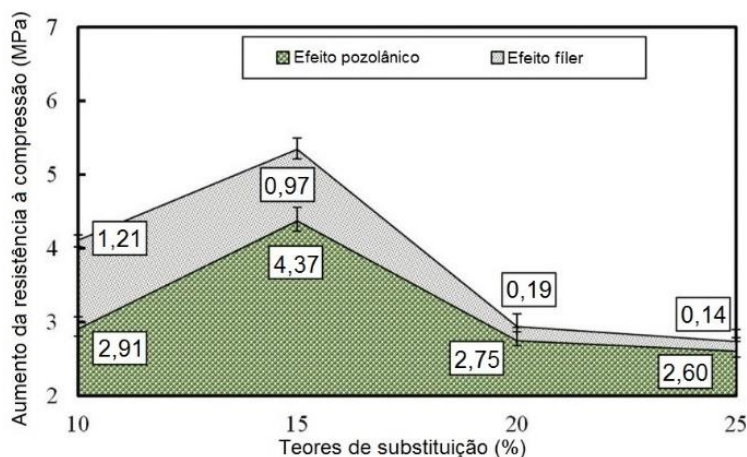
Além da resistência à compressão, os autores avaliaram comparativamente, por meio do mesmo método, resistência à tração, resistência à flexão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Figura 2.7 - Valores experimentais e teóricos de resistência à compressão do concreto com CCA e AN



Fonte: Adaptado de Noaman, Karim e Islam (2019)

Figura 2.8 - Acréscimos de resistência à compressão no concreto devido os efeitos fíler e pozolânico da CCA



Fonte: Adaptado de Noaman, Karim e Islam (2019)

É possível verificar pela Figura 2.7 os detalhes no teor de substituição de 10%, em que 30,90 MPa se refere ao valor de resistência à compressão do concreto com CCA e 27,99 MPa do concreto com AN. Já o valor de 26,78 MPa é 90% do valor obtido pela mistura de referência (29,75 MPa).

Já na Figura 2.8 é possível observar a aplicação das Equações 2.1 e 2.2, em que o EP do teor de substituição de 10% foi de 2,91 MPa (30,90 – 27,99). Já o EF para o mesmo teor foi de 1,21 MPa (27,99 – 26,78).

Assim, os autores concluíram que a inclusão da CCA como uma substituição parcial do cimento possui um efeito pozolânico mais significativo do que o efeito fíler nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto com agregado de lascas de tijolo.

Para conhecer o desempenho do EF de materiais pozolânicos em argamassa de cimento, alguns pesquisadores como Cordeiro *et al.* (2008), Jaturapitakkul *et al.* (2011), Jamil *et al.* (2016), e Khan *et al.* (2017) usaram areia de rio moída ou quartzo triturado com diferentes tamanhos de partículas de materiais de preenchimento não reativos como substitutos de pozolanas pela substituição de cimento. Esses materiais de enchimento eram quase análogos fisicamente às pozolanas, e não eram de natureza reativa. Como resultado, eles determinam o EF de pozolanas na argamassa pela comparação entre valores experimentais de concreto contendo areia natural e valores de concreto sem areia natural (controle) com tamanho de partícula semelhante e mesmos níveis de substituição de cimento, relações água/cimento e idades de cura.

Na Tabela 2.5 está exposto um resumo sintetizando os trabalhos que avaliaram os efeitos fíler e pozolânico de adições minerais.

Tabela 2.5 - Resumo acerca de trabalhos analisados que investigam o EF de pozolanas.

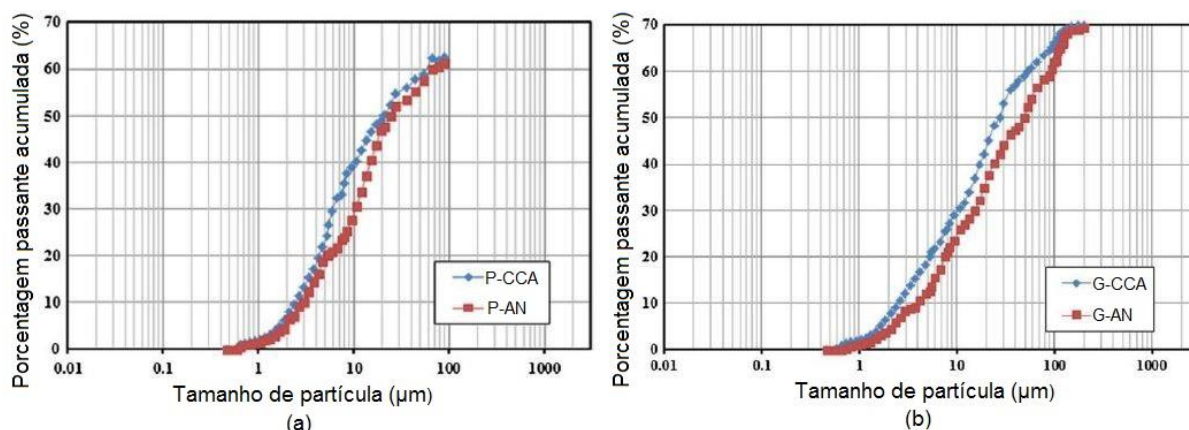
Autor(es)	Material estudado	Adição mineral / fíler utilizados	Propriedades avaliadas	Resultados Obtidos
(CORDEIRO et al., 2008)	Argamassa	Cinza do bagaço da cana de açúcar (CBCA) / quartzo triturado (QT)	Influência do tamanho de partícula da CBCA na densidade de empacotamento, atividade pozolânica da CBCA (IAP-Cal, ID-Cimento, Método do Chappelle Modificado), e resistência à compressão das argamassas	Após 28 dias de cura, a resistência à compressão da argamassa com CBCA foi 31% superior à resistência da mistura com QT. Essa discrepância também foi observada na atividade pozolânica, na resposta mecânica e nos resultados do método de Chappelle modificado. Assim, os resultados sugeriram que a CBCA apresenta propriedades físico-químicas apropriadas para seu uso como mistura mineral e sua reatividade depende principalmente do tamanho e finura das partículas
(JATURAPITA KKUL et al., 2011)	Argamassa	Apenas cimento Portland (sem adições) / areia subterrânea de rio em substituição ao cimento nos teores de 10, 20, 30 e 40%	Resistência à compressão	Os resultados mostram que a contribuição na resistência à compressão das argamassas por efeito fíler foi maior com a substituição por partículas mais finas em comparação com partículas de maior diâmetro.
(JAMIL et al., 2016)	Argamassa	Cinza da casca de arroz (CCA) / areia natural	Propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à flexão), absorção de água, porosidade e desenvolvimento da microestrutura	A resistência à compressão máxima da argamassa devido à reação pozolânica da CCA é de 21,5 MPa (quando $d_{50} = 6,72 \mu\text{m}$) e 10,1 MPa (quando $d_{50} = 18,6 \mu\text{m}$) após 90 dias de cura e 20% de nível de reposição de cimento. Os resultados também mostram que, para um nível específico de substituição de cimento, a resistência à compressão devido ao efeito de enchimento da areia natural é quase constante e máxima de 3,3 MPa com 20% de substituição de cimento.
(KHAN et al., 2017)	Argamassa	Apenas cimento Portland (sem adições) / areia natural moída em substituição ao cimento nos teores de 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5 e 20%	Resistência à compressão da argamassa em diferentes idades e análise microestrutural da argamassa aos 28 dias foram realizadas neste estudo.	Os resultados dos testes mostraram que o efeito fíler do material é mais pronunciado em porcentagens de reposição mais baixas de cimento (0-10%) enquanto se utiliza materiais de enchimento não reativos menores. A resistência máxima devido ao efeito de preenchimento da areia moída é alcançada com a substituição de 7,5% do cimento.

Fonte: Autor

Jamil *et al.* (2016) utilizaram dois tipos de areia natural fina (tamanhos médios de partículas de 6,85 e 18,9 μm) para avaliar a pozolanicidade e efeito físico da cinza da casca de arroz (CCA), também com duas granulometrias similares (6,72 μm e 18,6 μm). A areia natural (AN) foi utilizada como material de preenchimento com uma substituição parcial de cimento em amostras com uma relação água/cimento constante de 0,485. Os autores produziram amostras cúbicas de argamassa de 50 mm e barras de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Determinaram o EF de pozolanas na argamassa pela comparação entre as resistências das argamassas contendo tamanhos pequeno e grande de areia natural como material de enchimento não reativo, onde usaram nível de substituição de cimento semelhante, tamanho de partícula, finura, relação água/cimento e idade de cura para produzir amostras de argamassa usando pozolanas ou cargas não reativas. Os autores relataram que a resistência à compressão ou à flexão da argamassa aumenta ou diminui devido ao EF por consequência do tamanho de partícula da areia natural.

Na Figura 2.9 é possível analisar comparativamente os tamanhos pequeno (P) e grande (G) da cinza da casca de arroz (CCA) e areia natural (AN). Pela observação dos gráficos, é notória a aproximação das curvas granulométricas entre os materiais utilizados com mesma dimensão no estudo de Jamil *et al.* (2016).

Figura 2.9 - Distribuição granulométrica de materiais (a) P-CCA; P-AN e (b) G-CCA e G-AN



Fonte: Adaptado de Jamil *et al.* (2016)

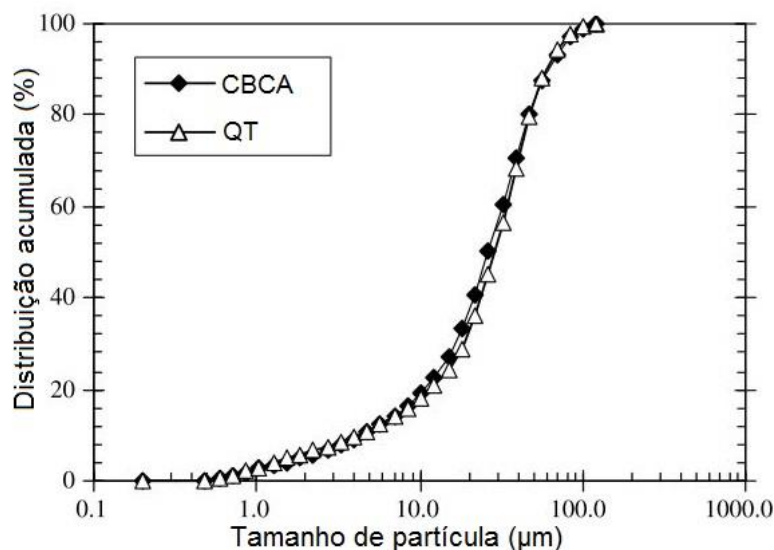
Além desta pesquisa, JATURAPITAKKUL *et al.* (2011) usaram areia de rio como material de enchimento com três tamanhos de partículas diferentes (8,1 μm , 11,5 μm e 21,4 μm) para preparar amostras de argamassa com uma relação água/cimento constante de 0,493. Os autores concluíram que a resistência à

compressão da argamassa aumenta com o aumento da finura das partículas do material de enchimento devido ao EF da areia do rio. Os autores também afirmaram que, durante a cura entre 3 e 90 dias, as diferenças na resistência à compressão de argamassas contendo areia de rio são quase constantes devido ao EF de areia de rio com tamanhos de partículas de 8,1 e 21,4 μm , 8,1 e 11,5 μm , 11,5 e 21,4 μm .

Da mesma forma, Khan *et al.* (2017) usaram areia natural fina disponível localmente, com tamanho médio de partícula de 7,6 μm , que passam pela peneira de 45 μm para preparar o cubo de argamassa de 50 mm com uma relação água/cimento constante de 0,485. Os autores determinam o EF das pozolanas para a resistência à compressão da argamassa pela comparação entre a resistência à compressão teórica da argamassa de controle e a resistência à compressão experimental de argamassas com areia natural fina. Os resultados dos testes mostraram que o efeito fíler do material é mais pronunciado em porcentagens de substituição mais baixas de cimento (0-10%) enquanto se utiliza materiais de enchimento não reativos menores. A maior resistência à compressão devido ao efeito de preenchimento da areia moída é alcançada com a substituição de 7,5% do cimento.

Cordeiro *et al.* (2008) investigando os efeitos pozolânicos e de enchimento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) residual em argamassas, inicialmente analisaram a influência do tamanho de partícula do CBCA na densidade de empacotamento, na atividade pozolânica do CBCA e na resistência à compressão das argamassas. Posto isto, os pesquisadores também compararam o desempenho de argamassas contendo CBCA e quartzo triturado QT (considerado um material insolúvel ou de baixa reatividade) com a mesma densidade de empacotamento e distribuições granulométricas semelhantes. Sob essas condições, o efeito físico de ambas as argamassas foi aproximadamente equivalente e a atividade pozolânica real da CBCA pôde ser estimada. Na Figura 2.10 é possível observar a semelhança entre as distribuições granulométricas de CBCA e QT.

Figura 2.10 - Distribuições granulométricas acumuladas de CBCA e QT



Fonte: Adaptado de Cordeiro *et al.* (2008)

O quartzo triturado utilizado como material de enchimento insolúvel e sem reatividade na preparação de argamassa possuía tamanhos médios de partícula e finura Blaine de 29,1 μm e 210 m^2/kg , respectivamente. Os autores relataram que o efeito de diluição foi o responsável pelas diferenças de resistência entre a argamassa de controle e a argamassa de quartzo triturada após 28 dias de cura. Os pesquisadores também relataram que, em idades precoces, o desenvolvimento da resistência da argamassa de quartzo triturada foi notável devido à atividade de fíler do material. Portanto, pode-se concluir a partir da discussão acima que, em idades iniciais, o EF é mais evidente que o EP na melhoria da resistência à compressão, flexão e tração de concreto e argamassa. Esse efeito depende de vários fatores, como o tamanho das partículas inertes, o teor de substituição, a idade de cura e a relação água/cimento (CORDEIRO *et al.*, 2008).

Para Silva (2010), fíler é um material finamente dividido, como diâmetro médio próximo ao do cimento Portland, que, em decorrência da sua ação física, melhora algumas propriedades do concreto, quando menores que 15% em relação à massa de cimento. Ainda segundo a autora, usualmente, os fílers são inertes, mas podem apresentar alguma atividade hidráulica ou participar de reações com os compostos do clínquer, como o C₃A e o C₄AF.

O fíler calcário é um material pouco reativo. Segundo Neville (2016), este é um material que possui características nos compósitos cimentícios de ação física,

mas leve hidraulicidade (propriedade que certos ligantes têm de endurecer com a adição de água) latente com cimento Portland. Então, apesar da ação física notória, pode-se esperar uma ação química pouco reativa do composto quando empregado como material cimentício suplementar.

Um exemplo da atividade do calcário é apresentado por Scrivener *et al.* (2018), que observaram questões acerca do uso de argilas calcinadas como pozolanas, já que estas passam por etapa de calcinação em sua preparação. Tal etapa torna a viabilidade e economia da aplicação da argila calcinada reduzida. Então, os autores optaram pela possibilidade de fazer uma substituição de teores de cimento por mistura da argila calcinada com o calcário. Isso permite níveis muito mais elevados de substituição.

Segundo Scrivener *et al.* (2018), misturas em que a argila calcinada é usada como pozolana costumam ter teores de clínquer em torno de 65–70%. A combinação de argila calcinada com calcário permite níveis mais elevados de substituição (teores de clínquer de até 50%) com propriedades mecânicas semelhantes e melhoria em alguns aspectos de durabilidade. A substituição do clínquer por calcário nessas misturas diminui o custo e o impacto ambiental.

Basicamente, quando a argila contendo caulinita é calcinada, o metacaulim é formado, que é essencialmente um silicato de alumina amorfo ($Al_2Si_2O_7$), este composto reage com o hidróxido de cálcio, como uma pozolana convencional, formando C-(A)-S-H e hidratos de aluminato. O calcário reage com a alumina para produzir hidratos de carbo-aluminato. Todos esses produtos preenchem vazios e contribuem para o desenvolvimento de propriedades mecânicas e relacionadas à durabilidade (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Por apresentar similaridade física com o pó de vidro, o fíler calcário foi utilizado neste estudo como material pouco reativo para etapa de diferenciação dos efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro.

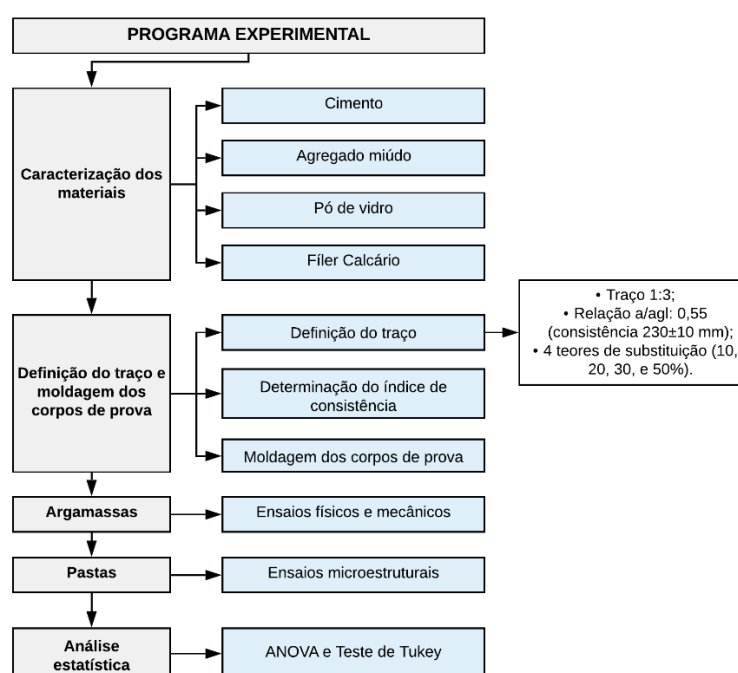
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o intuito de analisar o efeito da incorporação do pó de vidro em matrizes cimentícias de argamassas, o programa experimental visa determinar propriedades físicas e mecânicas do novo material, buscando-se principalmente distinguir os efeitos fíler e pozolânico do vidro finamente moído como material cimentício suplementar. Essa separação entre os efeitos nas propriedades estudadas foi realizada seguindo a metodologia apresentada por Noaman, Karim e Islam (2019) e exposta no item 2.5 deste trabalho.

Esta pesquisa relaciona-se a outras pesquisas que foram realizadas e que ainda estão sendo desenvolvidas no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), do Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana.

O programa experimental foi dividido em cinco partes: caracterização química e física dos materiais, definição dos traços e moldagem dos corpos de prova, ensaios físicos e mecânicos das argamassas, ensaios microestruturais nas pastas e análise estatística. Essas etapas foram realizadas de acordo com a Figura 3.1.

Figura 3.1 - Esquemática do programa experimental



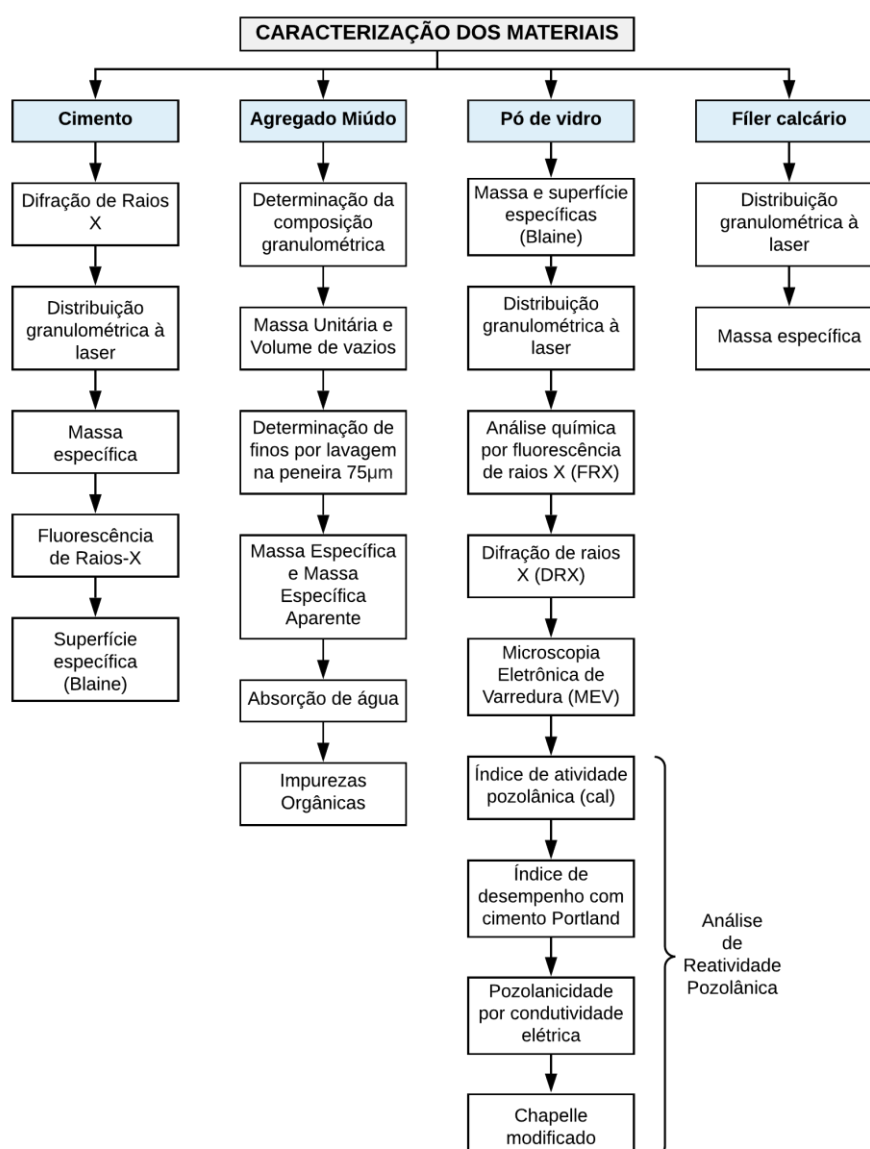
Fonte: Autor

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Foram utilizados para produção das argamassas os seguintes materiais: cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), pó de vidro passante na peneira de malha #200 (abertura 75 μm), agregado miúdo com dimensão máxima característica de 2,4 mm e filer calcário com distribuição granulométrica similar a do pó de vidro para quantificação do ganho de resistência por EF do material pozolânico em estudo (vidro finamente moído).

Na Figura 3.2 é exposto um resumo contendo as etapas para realização da caracterização dos materiais necessários.

Figura 3.2 - Síntese da etapa de caracterização dos materiais



Fonte: Autor

Na Figura 3.3 são apresentadas imagens dos materiais utilizados na confecção das argamassas.

Figura 3.3 - Materiais utilizados: a) CP V ARI, b) pó de vidro passante pela #200, c) fíler calcário e d) agregado miúdo.



3.1.1 CIMENTO

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP V ARI, fabricado pela Holcim do Brasil S/A, observando que as especificações para este material são normatizadas pela NBR 16697:2018 (ABNT, 2018).

A análise granulométrica do cimento foi realizada no granulômetro a laser FRITSCH, Alemanha, modelo ANALYSETTE 22 NanoTec, que utiliza de difração de lasers para determinar o tamanho das partículas pela teoria de cálculo de Mie. Os ensaios de granulometria a laser foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), São Carlos/SP. Destaca-se que, para evitar a aglomeração de partículas no granulômetro a laser, utilizou-se como meio de dispersão água potável em temperatura ambiente junto a um dispersante químico de polimetacrilato de amônio Darvan C-N da Vanderbilt. Na Figura 3.4 é apresentado o aparato utilizado na determinação da distribuição granulométrica.

Figura 3.4 - Aparelhagem utilizada na realização da granulometria a laser



Fonte: Autor

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, com varredura nominal 2θ de 3° a 120° , passo de $0,02^\circ$, varredura de $2^\circ/\text{min}$, tensão de 40 kV e 60 mA, ânodo de cobre.

Para a caracterização química do cimento 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.

A determinação da massa específica do cimento foi determinada pelo método do frasco volumétrico de Le Chatelier, de acordo com a NBR 16605:2017 (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 16372:2015 (ABNT, 2015).

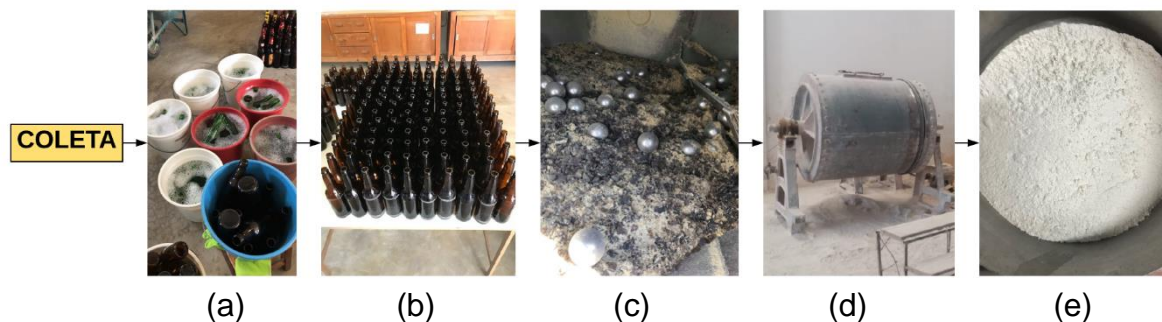
3.1.2 PÓ DE VIDRO

Foi utilizado pó de vidro, classificado como sodocálcico, proveniente de garrafas de cor âmbar, lavadas, com rótulos e cola removidos, em seguida quebradas em cacos em uma betoneira com bolas de aço. Logo após a quebra o material foi processado em moinho de bolas. O produto obtido é um pó de vidro que foi fracionado em 3 tamanhos máximos de grão: passante na peneira #100, malha

de 150 μm ; passante na peneira #200, malha de 75 μm ; e passante na peneira #325, malha de 45 μm .

O processo de obtenção do material pode ser observado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - 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: FREITAS (2019)

Para moagem, foi utilizado moinho revestido de sílex, rocha sedimentar silicatada, e as bolas utilizadas para o processo de moagem são do mesmo material (FREITAS, 2019). Foram moídos, a seco, 250 kg de pó de vidro em uma única moagem com duração de 14 horas. Na Figura 3.6 é possível observar o lançamento do material moído pelo equipamento.

Figura 3.6 - Moinho descarregando pó de vidro



Fonte: FREITAS (2019)

O peneiramento final foi realizado no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), da Universidade Federal de São Carlos. Inicialmente o pó de vidro foi seco em estufa na temperatura de 110 (± 5) $^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Em seguida, realizou-se o

peneiramento mecânico por meio do agitador de peneiras Ro-Tap, apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Agitador de peneiras Ro-Tap



Fonte: Autor

A porcentagem de material passante nas peneiras com aberturas de 150 μm , 75 μm e 45 μm foi respectivamente: 92%, 65% e 18%. Esses dados de peneiramento são expostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Dados do peneiramento do pó de vidro

Peneira	Massa inicial média (g)	Massa passante média (g)	% Passante
#100		448,87	92%
#200	487,90	317,14	65%
#325		87,82	18%

Fonte: Autor

Foi realizado o estudo da atividade pozolânica do pó de vidro nos três tamanhos máximos de grãos, porém para determinação dos efeitos fíler e pozolânico das argamassas, optou-se por utilizar o vidro passante pela #200 (<75 μm). Além de uma boa eficiência nos peneiramentos, optou-se por dar continuidade nos estudos do Grupo de Pesquisa que utilizaram o pó de vidro passante na peneira #200.

Vários trabalhos já foram desenvolvidos pelo grupo, avaliando-se o efeito do pó de vidro na mitigação da reação álcali-sílica (FREITAS, 2019), compósitos cimentícios com a incorporação de pó de vidro submetidos a altas temperaturas

(OLIVEIRA JÚNIOR, 2020) e a durabilidade de compósitos cimentícios com pó de vidro frente a ação de cloretos (SOARES, 2021).

O pó de vidro foi caracterizado física e quimicamente por meio dos ensaios: massa específica, distribuição granulométrica a laser, análise química por fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), massa específica e superfície específica (método Blaine). As condições e equipamentos para realização destes ensaios foram os mesmos aplicados ao cimento Portland (procedimentos descritos no Item 3.1.1).

A morfologia de amostras foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), no estado seco particulado (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016). As análises de MEV foram executadas em microscópio eletrônico de varredura, marca FEI, modelo Inspect F50. As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), São Carlos/SP.

Para as análises de reatividade pozolânica foram realizados os ensaios de Chapelle modificado conforme a NBR 15895:2010 (ABNT, 2010), índice de atividade pozolânica com cal e índice de desempenho com cimento Portland conforme NBR 5751:2015 (ABNT, 2015) e NBR 5752:2014 (ABNT, 2014), respectivamente, e pozolanidade por condutividade elétrica pela metodologia apresentada por Fernandes *et al.* (2017).

- **Índice de atividade pozolânica (IAP) – Cal**

O IAP com cal foi determinado de acordo com a NBR 5751:2015 (ABNT, 2015). Para a produção de argamassas, foram utilizados hidróxido de cálcio LABSYNTH (grau de pureza 95,0%), água, pó de vidro nos três tamanhos máximos de partícula e areia normal brasileira separada nas quatro frações granulométricas (grossa, #16; média grossa, #30; média fina, #50 e fina, #100), beneficiada e produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) conforme estabelecido pela NBR 7214:2015 (ABNT, 2015).

Para a determinação do IAP com cal, a argamassa a ser avaliada deve ter uma massa de hidróxido de cálcio definida (104 g) e uma quantidade material

pozolânico que corresponda ao dobro do volume de hidróxido de cálcio. A massa de material pozolânico (pó de vidro), m , em gramas para a mistura é dada pela equação (3.1).

$$m = 2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot 104 \text{ g} \quad (3.1)$$

onde,

δ_{poz} é o valor da massa específica do material pozolânico;

δ_{cal} é o valor da massa específica do hidróxido de cálcio.

A argamassa para o ensaio de resistência à compressão deve apresentar, no estado fresco, um índice de consistência de (225 ± 5) mm, o que conduz a variados volumes de água de mistura, conforme as características físico-químicas das adições minerais avaliadas (HOPPE FILHO *et al.*, 2017). Na Tabela 3.2 é possível observar as proporções dos componentes nas misturas das argamassas, as relações água/aglomerantes e os valores de consistência obtidos em cada mistura.

Tabela 3.2 - Proporções dos componentes nas misturas das argamassas para IAP com cal

Pó de vidro	Massa dos materiais (g)				Relação água/aglomerantes ² (g/g)	Consistência ³ (mm)
	CH	Areia ¹	Pó de vidro	Água		
#100	104,00	936,00	248,04	205,00	0,58	225,00
#200	104,00	936,00	248,04	205,00	0,58	226,00
#325	104,00	936,00	251,00	228,00	0,64	226,00

¹Areia normal brasileira conforme NBR 7214:2015 (ABNT, 2015) : 234 g de cada fração granulométrica.

²Relação água/aglomerantes: quociente entre a massa de água e a soma das massas de hidróxido de cálcio e pó de vidro contidas na argamassa: $m_{\text{água}} / (m_{\text{hidróxido de cálcio}} + m_{\text{pó de vidro}})$.

³Consistência obtida pelo ensaio de espalhamento, conforme a NBR 7215:2019 (ABNT, 2019).

Fonte: Autor

As proporções das misturas apresentadas na Tabela 3.2 seguem a NBR 5751:2015 (ABNT, 2015) para moldagem de três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para cada granulometria. Para aumentar a quantidade de amostras, melhorando a precisão dos resultados, optou-se por dobrar a proporção estabelecida pela norma, produzindo-se argamassa para seis corpos de prova para cada granulometria, que foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão na idade de sete dias.

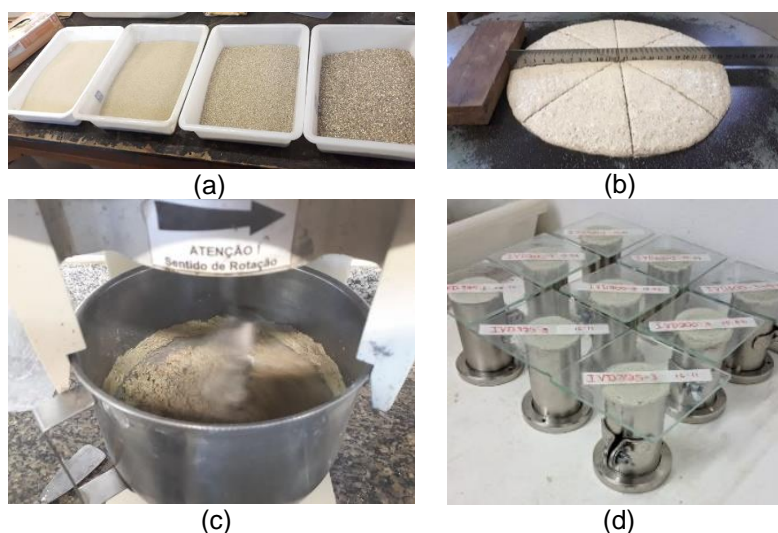
É interessante observar que a massa utilizada de pó de vidro passante pelas peneiras #100 e #200 se manteve constante (248,04 g), enquanto que utilizou-se

uma quantidade um pouco maior (251 g) do material passante pela #325. Isso ocorreu porque este ensaio requer uma quantidade de material pozolânico que corresponda ao dobro do volume do hidróxido de cálcio, conforme NBR 5751:2015 (ABNT, 2015). Assim, a diferença entre as massas ocorreu pois a massa específica do pó de vidro passante pela peneira #325 ($2,57 \text{ g/cm}^3$) é um pouco maior que o valor de #100 e #200 ($2,54 \text{ g/cm}^3$), estes possuem a mesma massa específica.

A cura dos corpos de prova foi realizada nos próprios moldes mantidos fechados. Durante as primeiras 24 h, os corpos de prova foram mantidos à temperatura ambiente, e depois em estufa à $55 \pm 2 \text{ °C}$ até a idade do ensaio (7 dias).

Na Figura 3.8 são mostradas algumas etapas do processo de moldagem dos corpos de prova para o ensaio de IAP com a cal.

Figura 3.8 - a) Composição de cada fração granulométrica de areia normal. b) Aferição de consistência da argamassa. c) Processo de mistura dos materiais. d) Processo de cura dos corpos de prova nas primeiras 24 h.



Fonte: Autor

- **Determinação do índice de desempenho (ID) com cimento Portland**

A determinação do índice de desempenho com cimento obedeceu a NBR 5752:2014 (ABNT, 2014). Como preconiza a norma, para esta análise utilizou-se cimento Portland composto com fíler (CP II-F 32), areia normal, água e amostras do vidro finamente moído nos três tamanhos máximos de partícula analisados. Foram produzidas duas argamassas, a primeira de referência (sem o material pozolânico), e a segunda com pó de vidro.

Para esta determinação faz-se necessária a preparação das argamassas com dosagens específicas. A argamassa de referência contém apenas cimento, areia normal e água. Já para a segunda, substituiu-se 25% em massa de cimento CP II F-32 pelo material pozolânico.

Na Tabela 3.3 são apresentadas as quantidades de materiais necessárias para a moldagem de seis corpos de prova para as argamassas com pó de vidro nas três granulometrias e para a mistura de referência.

Tabela 3.3 - Proporção de mistura das argamassas para determinação do índice de desempenho com cimento Portland

Argamassas	Massa dos materiais (g)				Relação a/agl ² (g/g)	Consistência ³ (mm)
	Cimento	Areia normal ¹	Pó de vidro	Água		
Referência	624,00	1872,00	-	300,00	0,48	156,00
#100	468,00	1872,00	156,00	300,00	0,48	154,30
#200	468,00	1872,00	156,00	300,00	0,48	151,00
#325	468,00	1872,00	156,00	300,00	0,48	150,00

¹Areia normal brasileira conforme NBR 7214:2015 (ABNT, 2015): 234 gramas de cada fração granulométrica.

²Relação água/aglomerantes: quociente entre a massa de água e a soma das massas de cimento e pó de vidro contidas na argamassa: $m_{\text{água}} / (m_{\text{cimento}} + m_{\text{pó de vidro}})$.

³Consistência obtida pelo ensaio de espalhamento, conforme a NBR 7215:2019 (ABNT, 2019).

Fonte: Autor

Segundo a NBR 5752:2014 (ABNT, 2014), se o índice de consistência normal da argamassa com material pozolânico for menor que o limite de (± 10 mm) em relação à argamassa de referência, faz-se necessária a utilização de aditivo superplastificante na mistura, caso contrário (como foi obtido na análise com as três diferentes granulometrias de pó de vidro) é dispensável o uso do aditivo.

Para cada dosagem de argamassa estabelecida, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm que foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão na idade de 28 dias, período em que ficaram na cura com água saturada de cal, conforme a NBR 7215:2019 (ABNT, 2019), exceto nas primeiras 24 h, nas quais foram colocados em câmara úmida ainda nos moldes.

Segundo a NBR 5752:2014 (ABNT, 2014), o índice de desempenho com cimento Portland é definido como a razão entre a resistência à compressão média de corpos de prova cilíndricos contendo o material pozolânico e a resistência à

compressão média de corpos de prova de referência, produzidos apenas com cimento, Eq. (3.2). O desvio relativo máximo não pode ultrapassar 6%.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cVD}}{f_{cREF}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Onde,

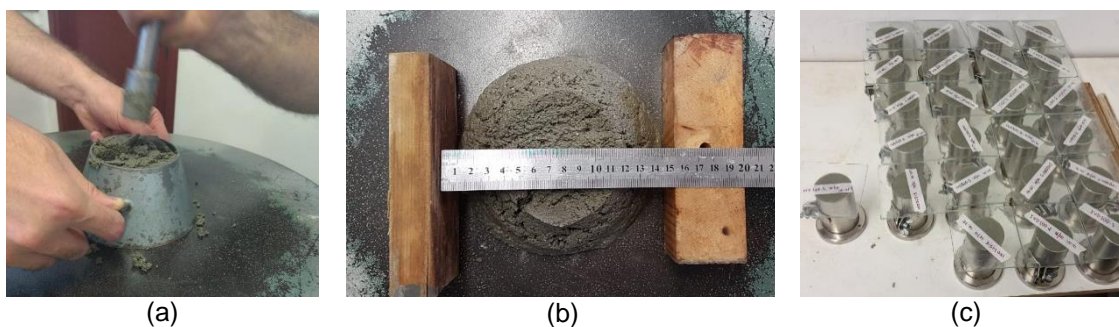
I é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Resultado é expresso em porcentagem (%);

f_{cVD} é a resistência média dos corpos de prova moldados com cimento e 25% de pó de vidro. Expressa em MPa;

f_{cREF} é a resistência média dos corpos de prova moldados apenas com cimento (MPa).

Na Figura 3.9 são mostradas algumas etapas do processo de moldagem e cura dos corpos de prova para o ensaio de índice de desempenho.

Figura 3.9 - a) Determinação do índice de consistência. b) Aferição do diâmetro no espalhamento. c) Primeiras 24 h de cura dos corpos de prova.



Fonte: Autor

- **Chapelle modificado**

O ensaio de Chapelle Modificado foi realizado de acordo com a NBR 15895:2010 (ABNT, 2010). Neste ensaio, a pozolanicidade é determinada pela capacidade do material em fixar cal por ação pozolânica para formação de compostos hidratados em ensaio acelerado. Para isso, o material é mantido em suspensão aquosa com óxido de cálcio (CaO) durante (16 ± 1) h à (90 ± 5) °C, sob agitação constante.

A mistura consiste em $(1,00 \pm 0,001)$ g de adição mineral e $(2,00 \pm 0,001)$ g de óxido de cálcio em 250 mL de água, acondicionada em *Erlenmeyer* polimérico. O resultado foi obtido por titulação com solução de HCl e expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio fixado por grama de adição mineral. Para este método foram ensaiadas amostras de pó de vidro nas três granulometrias estabelecidas.

- **Pozolanicidade por condutividade elétrica**

Neste ensaio a pozolanicidade é indicada pela variação da condutividade elétrica, representada pela Perda Relativa de Condutividade em função do tempo. Há uma correlação evidente entre a diminuição da condutividade elétrica e a formação de hidratos durante a reação pozolânica. Segundo os autores, nos momentos iniciais da reação entre pozolana e cal (CH), há uma diminuição significativa da condutividade devido à fixação precoce de cálcio por sílica amorfa (AMAR *et al.*, 2017).

A condutividade elétrica de uma solução de pó de vidro e água deionizada foi medida para avaliar a contribuição para a condutividade total dos íons Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e outros íons minoritários que pudessem estar presentes no vidro finamente moído. Posteriormente, foi medida a condutividade elétrica de uma solução com hidróxido de cálcio, água deionizada e pó de vidro. No segundo caso, 250 mL de água deionizada foram aquecidos a 80 °C em *Erlenmeyer*, em seguida adicionou-se 200 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para se obter uma solução insaturada. A mistura foi homogeneizada por 1 h para a dissolução de todo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (FERNANDES *et al.*, 2017). Após este período, diminuiu-se a temperatura da solução para 60 °C. Ao atingir essa temperatura, iniciou-se a coleta de dados de condutividade elétrica por meio de um condutímetro. Na sequência foi adicionado 5,25 g de pó de vidro na solução aquecida e os dados para o cálculo da Perda Relativa de Condutividade Elétrica (P_r), de acordo com a Eq. (3.3), foram coletados por um período de 24 h.

$$P_r (\%) = \frac{C_0 - (C_{pa})}{C_0} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Onde,

C_0 é o valor de condutividade elétrica da solução insaturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ antes da adição da pozolana (pó de vidro). A unidade de medida é dada por milisemens por centímetro (mS/cm);

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

Após os cálculos, foram traçadas as curvas de variação de condutividade elétrica e comparadas com os parâmetros estabelecidos por Luxán, Madruga e Saavedra (1989). Também foram traçadas as curvas de perda relativa de condutividade elétrica e comparadas com outras adições. A avaliação da pozolanicidade por condutividade elétrica foi realizada para as três granulometrias de pó de vidro.

3.1.3 FÍLER CALCÁRIO

Foi utilizado como um material inerte de curva granulométrica próxima à do pó de vidro passante pela #200, sendo um material auxiliar para diferenciação entre os efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro. Assim, para caracterizá-lo, foi realizada a distribuição granulométrica à laser do material e comparada com o pó de vidro passante pela peneira #200 (75 µm). Também foi realizado o ensaio de massa específica do fíler calcário conforme a NBR 16605:2017 (ABNT, 2017), para este ensaio foi empregado o querosene como reagente.

Foi utilizado o fíler calcário 325, comercializado pela BRASIL MINAS.

Antes da tomada de decisão de utilizar o fíler calcário como material pouco reativo para aplicação do método, foram realizados estudos iniciais com outros possíveis materiais, como quartzo triturado (bastante empregado nos trabalhos apresentados na Tabela 2.5) e sílicas moídas. Mas como os materiais não apresentaram curva granulométrica similar ao pó de vidro, optou-se pelo fíler calcário.

3.1.4 AGREGADO MIÚDO

Foi utilizado agregado miúdo natural, areia de rio, disponível na região de São Carlos, peneirado, com dimensão máxima característica de 2,4 mm, caracterizada a partir dos ensaios expostos na Tabela 3.4.

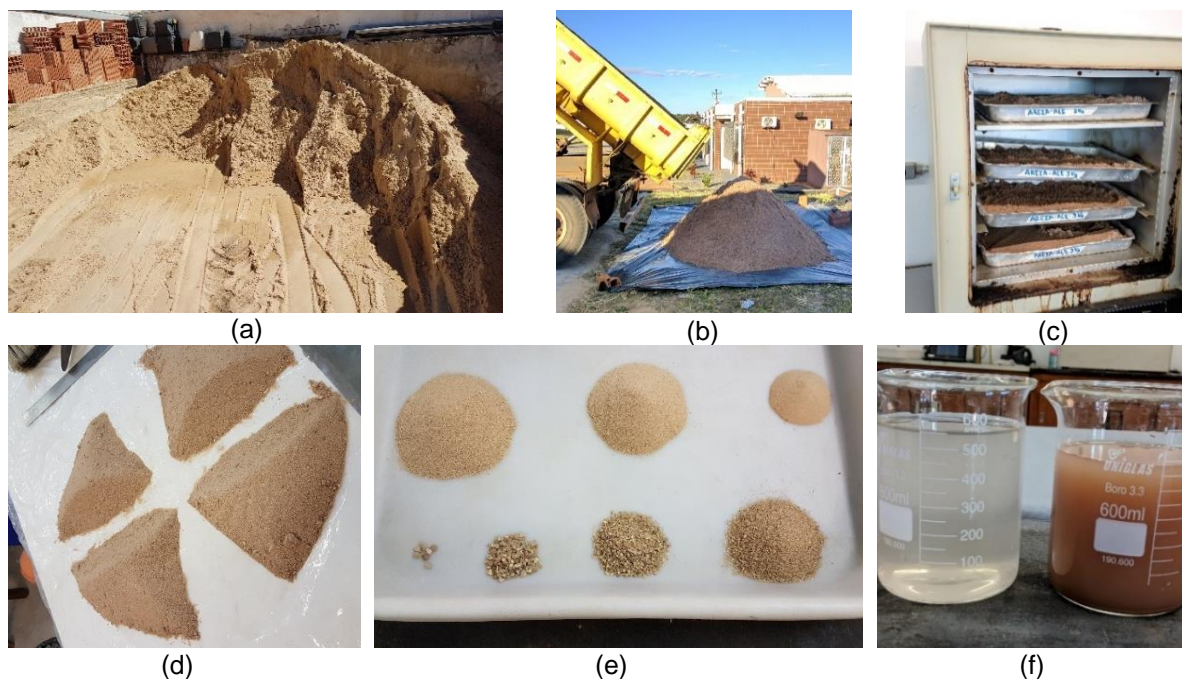
Tabela 3.4 - Ensaio de caracterização do agregado miúdo

Ensaio	Norma Regulamentadora
Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003)
Absorção de água (%)	NBR NM 30:2001 (ABNT, 2001)
Massa específica e massa específica aparente (g/cm ³)	NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009)
Massa unitária e volume de vazios (kg/m ³)	NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006)
Impurezas orgânicas	NBR NM 49:2001 (ABNT, 2001)
Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem	NBR NM 46:2003 (ABNT, 2003)

Fonte: Autor

Na Figura 3.10 são apresentadas imagens das atividades realizadas para aquisição, organização e caracterização do agregado miúdo.

Figura 3.10 - Atividades realizadas para obtenção e caracterização do agregado miúdo: a) Aquisição do agregado miúdo; b) Recebimento do agregado miúdo; c) Secagem em estufa; d) Etapa de quarteamento para amostragem; e) Determinação das porcentagens de areia retida em cada peneira da série normal; f) Ensaio de determinação de finos por lavagem na peneira 75 μ m.



Fonte: Autor

3.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Embora para a avaliação de atividade pozolânica tenha se trabalhado com três tamanhos máximos de grão, para produção das argamassas foi utilizado o vidro passante pela peneira #200.

As argamassas foram produzidas e moldadas em corpos de prova cilíndricos (50 x 100 mm), e foram estabelecidos alguns parâmetros: traço em massa para mistura de referência (REF) de 1:3 (cimento:agregado miúdo) e relação água/aglomerante (a/agl) igual 0,55, visando a obtenção de uma consistência de (230 \pm 10) mm. Os teores de substituição de cimento pelo vidro finamente moído foram de 10%, 20%, 30% e 50% em volume e a cura dos corpos de prova foi por imersão em água saturada com cal.

Para análise do ganho de resistência por efeito fíler do pó de vidro, foi moldada a mesma quantidade de corpos de prova (CPs), porém, neste momento os diferentes teores de substituição de cimento foram feitos por fíler calcário. Para estes CPs foram mantidos o mesmo traço e a mesma relação a/agl do que nos CPs

com vidro finamente moído, assim foi possível fazer um estudo analítico sobre o incremento em cada propriedade analisada por ação pozolânica e por efeito fíler.

Os parâmetros que se mantiveram fixos ao longo do estudo foram: o tipo de cimento, o agregado miúdo e a água. Como variáveis do estudo têm-se os teores de pó de vidro e de fíler calcário empregados em substituição volumétrica de cimento e, conseqüentemente, o consumo de cimento das misturas. As nomenclaturas utilizadas para cada traço são descritas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Nomenclatura adotada para os traços estudados

Nomenclatura do traço	Composição
REF	Traço de referência com 0% de substituição volumétrica do cimento, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
VD10	Traço com substituição volumétrica do cimento por 10% de pó de vidro, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
VD20	Traço com substituição volumétrica do cimento por 20% de pó de vidro, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
VD30	Traço com substituição volumétrica do cimento por 30% de pó de vidro, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
VD50	Traço com substituição volumétrica do cimento por 50% de pó de vidro, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
FC10	Traço com substituição volumétrica (em relação ao pó de vidro) do cimento por 10% de fíler calcário, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
FC20	Traço com substituição volumétrica (em relação ao pó de vidro) do cimento por 20% de fíler calcário, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
FC30	Traço com substituição volumétrica (em relação ao pó de vidro) do cimento por 30% de fíler calcário, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)
FC50	Traço com substituição volumétrica (em relação ao pó de vidro) do cimento por 50% de fíler calcário, agregado miúdo e água (a/agl: 0,55)

Fonte: Autor

O consumo de materiais em kg/m³ das argamassas utilizadas neste estudo pode ser observado na Tabela 3.6. Pela análise da tabela é possível observar que foi feita a substituição volumétrica de cimento para os teores com pó de vidro. E, conforme a metodologia adotada de Noaman, Karim e Islam (2019), utilizou-se a mesma quantidade de pó de vidro para os teores com substituição de cimento pelo fíler calcário.

Tabela 3.6 - Consumo de materiais em kg/m³.

Traços	Cimento	Pó de vidro	Fíler calcário	Agregado miúdo	Água
REF	499,30	-	-	1497,89	274,61
VD10	449,37	40,13	-	1497,89	269,22
VD20	399,44	80,27	-	1497,89	263,84
VD30	349,51	120,40	-	1497,89	258,45
VD50	249,65	200,67	-	1497,89	247,67

Tabela 3.6 - Consumo de materiais em kg/m³ (continuação).

Traços	Cimento	Pó de vidro	Fíler calcário	Agregado miúdo	Água
FC10	449,37	-	40,13	1497,89	269,22
FC20	399,44	-	80,27	1497,89	263,84
FC30	349,51	-	120,40	1497,89	258,45
FC50	249,65	-	200,67	1497,89	247,67

Fonte: Autor

Foram realizadas verificações das consistências para todos os traços de argamassas, sendo adotada uma consistência estabelecida de (230 ± 10) mm. Para a realização do ensaio de consistência foi utilizada a NBR 13276:2016 (ABNT, 2016). Os equipamentos utilizados para o ensaio foram: a mesa para índice de consistência, molde tronco cônico, paquímetro, soquete metálico e régua metálica. 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 três aferições do diâmetro, e o valor adotado foi uma média desses três valores.

Na Figura 3.11 são apresentados registros da etapa de determinação da consistência das argamassas.

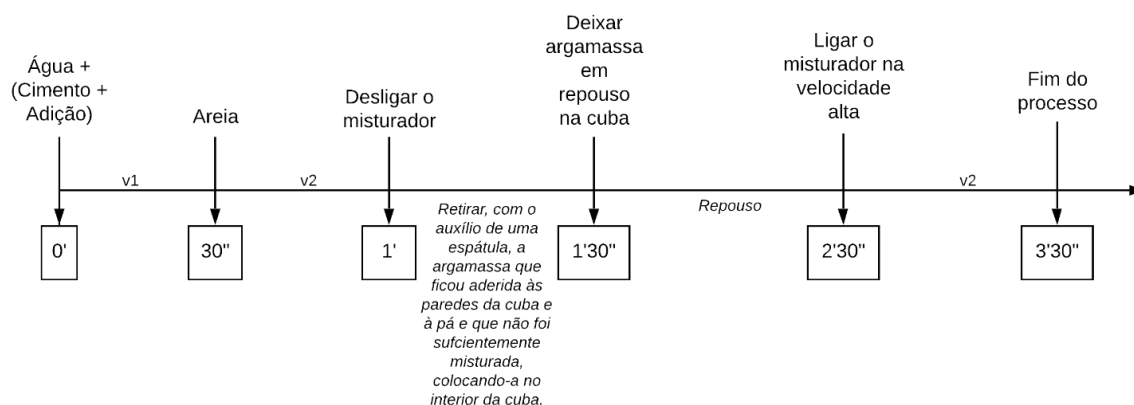
Figura 3.11 - Medição dos diâmetros para determinação da consistência da argamassa

Fonte: Autor

O procedimento de mistura adotado para as argamassas é o apresentado pela NBR 7215:2019 (ABNT, 2019), norma que visa a determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Antes da realização do processo de mistura mecânica, as adições utilizadas neste estudo (pó de vidro ou fíler calcário) e o cimento Portland eram previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado durante dois minutos, aproximadamente.

Assim, o procedimento de mistura adotado é esquematizado na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Procedimento de mistura das argamassas



Fonte: Autor

Na Figura 3.13 é apresentada a argamassadeira utilizada no estudo.

Figura 3.13 - Argamassadeira utilizada no estudo



Fonte: Autor

A moldagem dos corpos de prova foi feita imediatamente após o preparo das argamassas. A colocação da argamassa nos moldes era feita com o auxílio da espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, com cada camada recebendo 30 golpes uniformes e homoganeamente distribuídos com o soquete normal. Após o adensamento e acabamento da última camada dos corpos de prova, era colocada uma placa de vidro na face superior do molde para evitar a evaporação da água.

Além dos CPs para investigação da resistência mecânica, foram produzidas argamassas para avaliar absorção de água por capilaridade, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático. Buscando-se, da mesma maneira, diferenciar os efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro sobre estas características. Na Tabela 3.7 estão detalhadas as quantidades de corpos de prova por ensaios e por idades (em dias).

Tabela 3.7 - Detalhamento das quantidades de CPs a serem produzidos

MATERIAIS EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO (TEORES EM %)	Pó de vidro (VD)	Fíler calcário (FC)				Argamassa de Referência (REF)				
		10	20	30	50					
ENSAIOS	% Idades	10	20	30	50	10	20	30	50	
Resistência à compressão	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	28	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	91	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Absorção de água	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Tração por compressão diametral	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Módulo de elasticidade estático	28	5	5	5	5	5	5	5	5	5

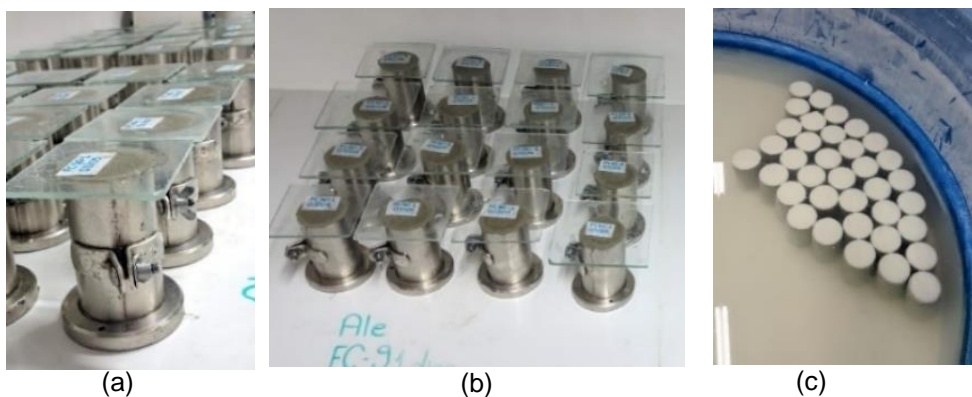
Fonte: Autor

Pela análise da Tabela 3.7 é possível observar que foram produzidos 92 CPs com diferentes teores de substituição por pó de vidro, outros 92 CPs com fíler calcário. Além disso, para obter um material de referência, foram produzidos 23 corpos de prova de referência (sem adição mineral). Assim, o total de CPs produzidos foi de 207 unidades.

A cura foi realizada de acordo com o indicado pela NBR 7215:2019 (ABNT, 2019), em que os corpos de prova foram mantidos durante as primeiras 24 h em câmara úmida com a face superior protegida com a placa de vidro.

Terminado este período inicial de cura, os corpos de prova foram retirados dos moldes, identificados e imersos em recipientes com água saturada de cal, onde permaneceram até a realização dos ensaios. Os processos referentes à cura dos corpos de prova são apresentados na Figura 3.14.

Figura 3.14 - a) Detalhe de CPs nas primeiras 24 h de cura; b) Corpos de prova em câmara úmida; c) CPs desmoldados e imersos em solução de água saturada de cal



(a)
Fonte: Autor

(b)

(c)

3.3 ENSAIOS REALIZADOS EM ARGAMASSAS

A metodologia empregada no estudo com argamassas para diferenciação dos efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro foi a apresentada na pesquisa de Noaman, Karim e Islam (2019) e exposta no Item 2.5 deste trabalho. O material fisicamente análogo ao pó de vidro para aplicação do método foi o fíler calcário.

A caracterização das argamassas foi realizada por avaliações de propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova. Na Tabela 3.8 estão detalhados os ensaios realizados nas argamassas para avaliação destas propriedades, bem como a metodologia, as idades, a quantidade e dimensão dos CPs.

Tabela 3.8 - Ensaios realizados nas argamassas estudadas

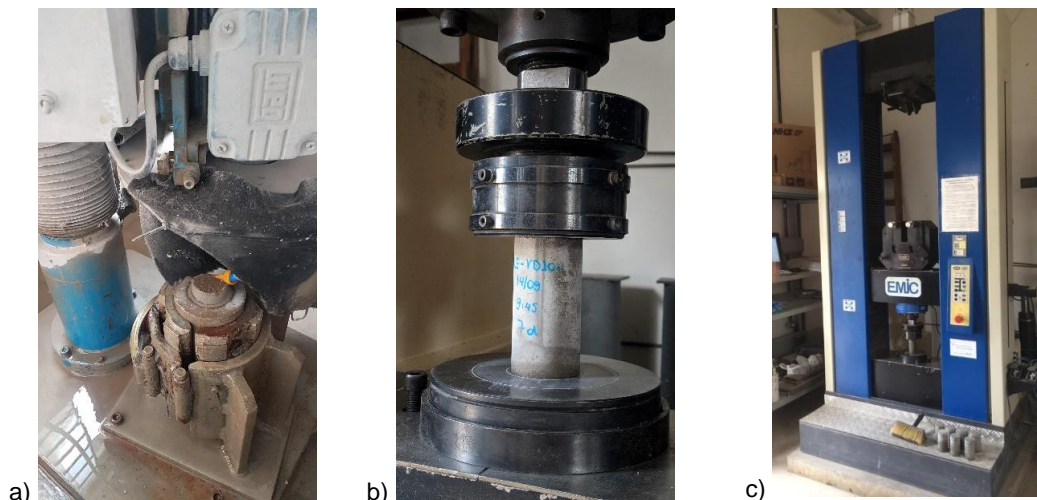
Característica	Metodologia	Idades	Quantidade de CPs/idade/traço	Dimensão dos CPs
Resistência à compressão axial (MPa)	NBR 7215:2019 (ABNT, 2019)	7, 28 e 91 dias	4	Cilíndrico – 50x100 mm
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	NBR 7222:2011 (ABNT, 2011)	28 dias	3	Cilíndrico – 50x100 mm
Módulo de elasticidade estático (GPa)	NBR 8522:2017 (ABNT, 2017)	28 dias	5, sendo 3 para módulo e 2 para compressão axial	Cilíndrico – 50x100 mm
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	NBR 9779:2012 (ABNT, 2012)	28 dias	3	Cilíndrico – 50x100 mm

Fonte: Autor

3.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os corpos de prova foram retificados antes da ruptura para uma distribuição uniforme da carga, sendo o processo de retífica mostrado na Figura 3.15 a). Em seguida, os corpos de prova foram ensaiados na Máquina Universal de Ensaios EMIC com capacidade de carga de 600 kN (Figuras 3.15 b; 3.15 c).

Figura 3.15 - a) Retífica dos corpos de prova. b) Corpo de prova sendo ensaiado à compressão axial. c) Máquina Universal de Ensaio EMIC



Fonte: Autor

Antes da aplicação da carga nos CPs até a ruptura, era determinado com o auxílio de um paquímetro digital o diâmetro de cada CP que é utilizado para o cálculo da área da seção transversal. Os diâmetros eram medidos ortogonalmente na metade da altura do corpo de prova. Além disso, foram aferidas as alturas dos CPs que eram medidas sobre os eixos longitudinais, incluindo a retífica.

Após estas aferições iniciais com o paquímetro, os CPs foram levados para realização do ensaio. Neste momento as faces dos pratos e do corpo de prova eram limpas e secas, antes destes serem colocados em posição de ensaio. O corpo de prova era cuidadosamente centralizado no prato inferior, com o auxílio dos círculos concêntricos de referência, observando-se o sentido de moldagem.

Os carregamentos dos ensaios eram aplicados continuamente e sem choques, com velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. A velocidade de carregamento era mantida constante durante todo o ensaio, que só era cessado na ocorrência da queda de força que indica a ruptura do CP.

3.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

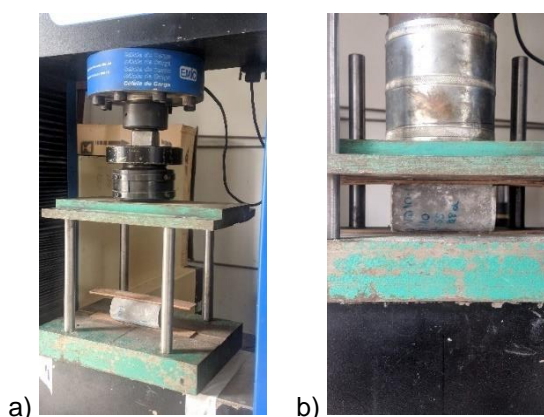
Neste ensaio o corpo de prova é submetido a cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais que são diametralmente opostas, para isso o CP deve ser posicionado de forma que o plano axial coincida com eixo de aplicação de carga.

Para isso eram colocadas, entre os pratos da máquina e os CPs em ensaio, duas tiras de chapa dura de fibra de madeira.

A carga é aplicada continuamente e sem choques, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s até a ruptura do corpo de prova. A tensão de compressão produz uma tensão de tração transversal, que é uniforme ao longo do diâmetro vertical.

Os procedimentos para o ensaio são demonstrados na Figura 3.16.

Figura 3.16 - Procedimentos de ensaio para ensaio de tração por compressão diametral: a) Preparação da aparelhagem. b) Aplicação da carga.



Fonte: Autor

3.3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Para cada traço foram moldados cinco corpos de prova com 50 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento. 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. O ensaio foi realizado na máquina de ensaios EMIC, com capacidade de carga de 600 kN.

Foi empregada a Metodologia A descrita na NBR 8522:2017 (ABNT, 2017), em que primeiramente carregou-se o corpo de prova até a força correspondente à tensão do limite superior (30% da tensão de ruptura obtida pelo ensaio de resistência à compressão axial), e manteve-se a força neste nível por 60 s. Em seguida, descarregou-se o corpo de prova até uma força próxima de zero.

Em um segundo momento, carregou-se o corpo de prova até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa, e manteve-se a força neste nível por 60 s. Em

seguida, carregou-se o corpo de prova até a força correspondente à tensão do limite superior e manteve-se a força neste nível por mais 60 s. Por fim, descarregava-se o corpo de prova até uma força próxima de zero. Esta segunda etapa era repetida.

Por fim, realizava-se o mesmo carregamento da segunda etapa, porém neste momento eram registradas as deformações. Após as leituras das deformações, era liberada a instrumentação e o corpo de prova era carregado até que ocorresse a ruptura, obtendo-se a resistência efetiva.

O registro do procedimento realizado com a utilização do medidor de deformação é mostrado na Figura 3.17.

Figura 3.17 - Ensaio de módulo de elasticidade estático



Fonte: Autor

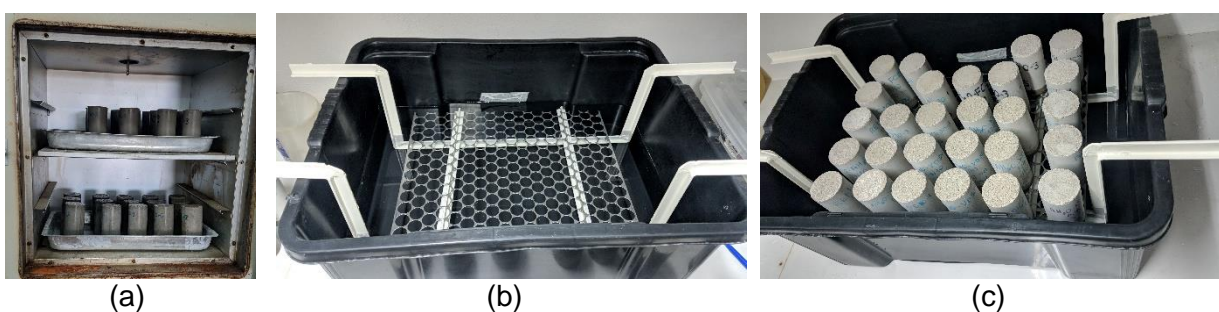
3.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A absorção de água em compósitos cimentícios é um fator importante na classificação de sua durabilidade, uma vez que avalia indiretamente a permeabilidade do material.

Para este ensaio, 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, após os 28 dias, os corpos de prova foram colocados em estufa à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, até constância de massa (tempo de 72 horas em estufa) e resfriados em ambiente de laboratório. Em seguida, as laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas com silicone para garantir que a absorção de água ocorresse unicamente pela base do CP. Após a secagem do silicone as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca.

Para imersão dos CPs foi montado um aparato em um recipiente de plástico, em que foram posicionados suportes metálicos para apoiar as amostras, em seguida o recipiente foi preenchido com água até a altura de (5 ± 1) mm acima da face inferior dos CPs. As massas saturadas dos corpos de prova foram determinadas após 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h do contato da amostra com a água. Na figura 3.18 é possível observar os procedimentos para o ensaio.

Figura 3.18 - Ensaio de absorção de água por capilaridade: a) Corpos de prova em estufa. b) Montagem do aparato. c) Amostras em contato com lâmina d'água.



(a)
Fonte: Autor

(b)

(c)

Para analisar a qualidade do material frente à capilaridade, é possível obter o coeficiente de sortividade (ou coeficiente de absorção capilar). A sortividade caracteriza a tendência de um material poroso de absorver e transmitir água por capilaridade (HALL, 1989) e essa propriedade é obtida pela aplicação da Equação 3.3.

$$i = S \cdot t^{0,5} \quad (3.3)$$

Onde,

i = absorção capilar por unidade de área (g/cm^2);

S = sortividade ($g/cm^2 \cdot min^{-0,5}$);

t = tempo (min)

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

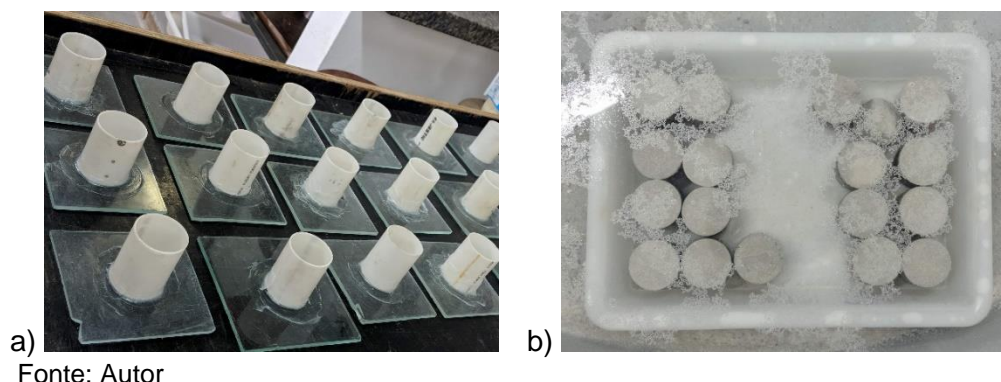
3.4 ENSAIO REALIZADO EM PASTA: DIFRAÇÃO DE RAIOS X

O ensaio em pastas foi realizado com traço de referência (REF) e com os traços relativos aos teores de substituição de 20% e 50% de cimento por pó de vidro (VD20 e VD50) e por fíler calcário (FC20 e FC50).

Para confecção dos CPs das pastas, foi mantido o mesmo traço das argamassas, retirando-se apenas o agregado miúdo da mistura. Também se manteve o mesmo procedimento de mistura apresentado na Figura 3.13. Já para moldagem das pastas foram confeccionados moldes plásticos com dimensões de 40 mm de diâmetro por 50 mm de comprimento.

A cura das pastas foi realizada pelos mesmos procedimentos realizados nas argamassas. O procedimento para preparação dos CPs para pastas é exposto na Figura 3.19.

Figura 3.19 - Preparação das pastas: a) Distribuição dos moldes confeccionados. b) Corpos de prova na cura em água saturada de cal.



Para as pastas foi realizado o ensaio de Difração de Raios X (DRX) na idade de 28 dias. Para preparação das amostras destinadas ao ensaio realizou-se, primeiramente, a quebra dos CPs em partes menores para retirada de algumas lascas da pasta endurecida. Estes pedaços menores eram levados ao moinho tipo almofariz-pistilo da marca Marconi (Figura 3.20 a) para serem reduzidos em grãos de pó que foram secos em estufa e passados pela malha #200 no agitador de peneiras Ro-Tap. Apenas o material passante foi armazenado para realização do DRX.

O pó extraído das argamassas foi armazenado em microtubos plásticos EPPENDORF e colocados, sob imersão em sílica gel, em sacos plásticos vedados. Este processo é exposto na Figura 3.20 (b).

Figura 3.20 - Preparação das amostras para ensaio de DRX: a) Moinho tipo almofariz-pistilo. b) Amostras armazenadas.



Com a realização deste ensaio, procura-se identificar as fases cristalinas das substâncias presentes em cada amostra. É uma análise qualitativa e indica os compostos presentes nos picos que aparecem nos difratogramas.

Este ensaio consiste na incidência de um feixe de raios X monocromático na amostra em estudo. O fenômeno de difração ocorre quando a onda eletromagnética encontra obstáculos regularmente espaçados que são capazes de espalhar a onda ou desviar a onda, desta maneira, os espaços entre os obstáculos são comparáveis em magnitude com o comprimento de onda.

A Lei de Bragg expõe uma relação simples entre o comprimento de onda dos raios X e o espaçamento interatômico ao ângulo de difração do feixe. Os picos do difratograma correspondem a planos cristalinos em que esta relação é satisfeita. Desta forma, o DRX produz padrões de posições de pico e intensidades relativas que caracterizam diferentes estruturas cristalinas e permitem identificar sua presença em amostras desconhecidas (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016).

Segundo Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), a aplicação da técnica de difração de Raios X em amostras de compósitos cimentícios pode ser usada para quantificar o grau de hidratação do cimento anidro e fornece informações sobre a formação de fases individuais de hidratos.

Os ensaios de DRX foram realizados nas amostras pulverizadas das pastas na idade de 28 dias. 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 Ultima IV, modelo: Ultima IV, com varredura normal $2\theta/\theta$ de 3° a 80° , passo de $0,02^\circ/\text{seg}$, velocidade de $1^\circ/\text{min}$. Fenda $1/2^\circ$, 1° e $2/3^\circ$. Tensão de 40 kV e 30 mA, tubo selado de cobre.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os dados dos ensaios em argamassas foram analisados pela Análise de Variância (ANOVA), metodologia utilizada para comparar três ou mais tratamentos, uma das técnicas mais flexíveis e práticas para comparar várias médias. É importante observar que ANOVA não se trata de analisar a variância da população. Na verdade, analisa-se os meios de tratamento, identificando fontes de variabilidade dos dados. Em sua forma mais simples, ANOVA pode ser considerada como uma extensão do teste de hipótese para a igualdade de duas médias (MILLER, 1985).

Para o método da ANOVA realiza-se um teste estatístico para verificar se há diferença entre distribuição de um valor entre três ou mais grupos. Isso é feito por meio da decomposição da soma dos quadrados para cada fonte de variação no modelo. A partir do teste F de *Fisher-Snedecor*, testa-se a hipótese de que não há fonte de variação entre as amostras.

As hipóteses são as seguintes: H_0 – Não existe diferença estatisticamente significativa; H_1 – Há pelo menos um valor com diferença estatística.

Compara-se também o valor de p-valor com o α (adotado neste trabalho como sendo 5%). Se $p\text{-valor} \geq \alpha$, aceita-se H_0 (não existem diferenças significativas); Se $p\text{-valor} < \alpha$, rejeita-se H_0 (há diferenças significativas).

Posteriormente os dados que apresentaram diferença significativa foram submetidos ao teste de Tukey utilizando o software de análises estatísticas PAST, de forma a determinar quais valores da amostragem possuem diferenças estatísticas significativas. Se a hipótese H_0 for rejeitada, o procedimento de Tukey pode ser usado para determinar quais pares de médias têm diferenças estatisticamente significativas (DRISCOLL, 1996).

Segundo Driscoll (1996), os desenvolvimentos teóricos de ambos os procedimentos baseiam-se na suposição de que os dados são amostras aleatórias de distribuições de probabilidade normais. Na prática, raramente se sabe se isso é verdade. Além disso, os dados podem não estar disponíveis para apoiar o

desempenho de um teste de qui-quadrado para qualidade de ajuste e, frequentemente, não é econômico coletar mais dados. Consequentemente, o analista deve frequentemente usar procedimentos baseados na suposição de normalidade em dados que podem não ser normalmente distribuídos.

Neste estudo, a ANOVA verifica a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os valores médios das amostras avaliadas, já o teste de Tukey foi utilizado para identificar quais médias são diferentes.

Os dados de análise estatística, bem como os valores individuais registrados para cada amostra nos ensaios, estão apresentados em detalhe nos apêndices deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos deste estudo, sendo eles de caracterização dos materiais, ensaios em argamassas, estudos em pasta com e sem a incorporação de pó de vidro e fíler calcário e suas devidas análises estatísticas. A caracterização acerca do pó de vidro e cimento Portland foi realizada pelo grupo de pesquisa, e os dados também são encontrados em outras produções dos pesquisadores que compõem o grupo (FREITAS, 2019; OLIVEIRA JÚNIOR, 2020; SOARES, 2021).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 AGREGADO MIÚDO

A composição granulométrica, a dimensão das peneiras, bem como a porcentagem retida e acumulada em cada uma das peneiras e o módulo de finura, podem ser observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Composição granulométrica do agregado utilizado

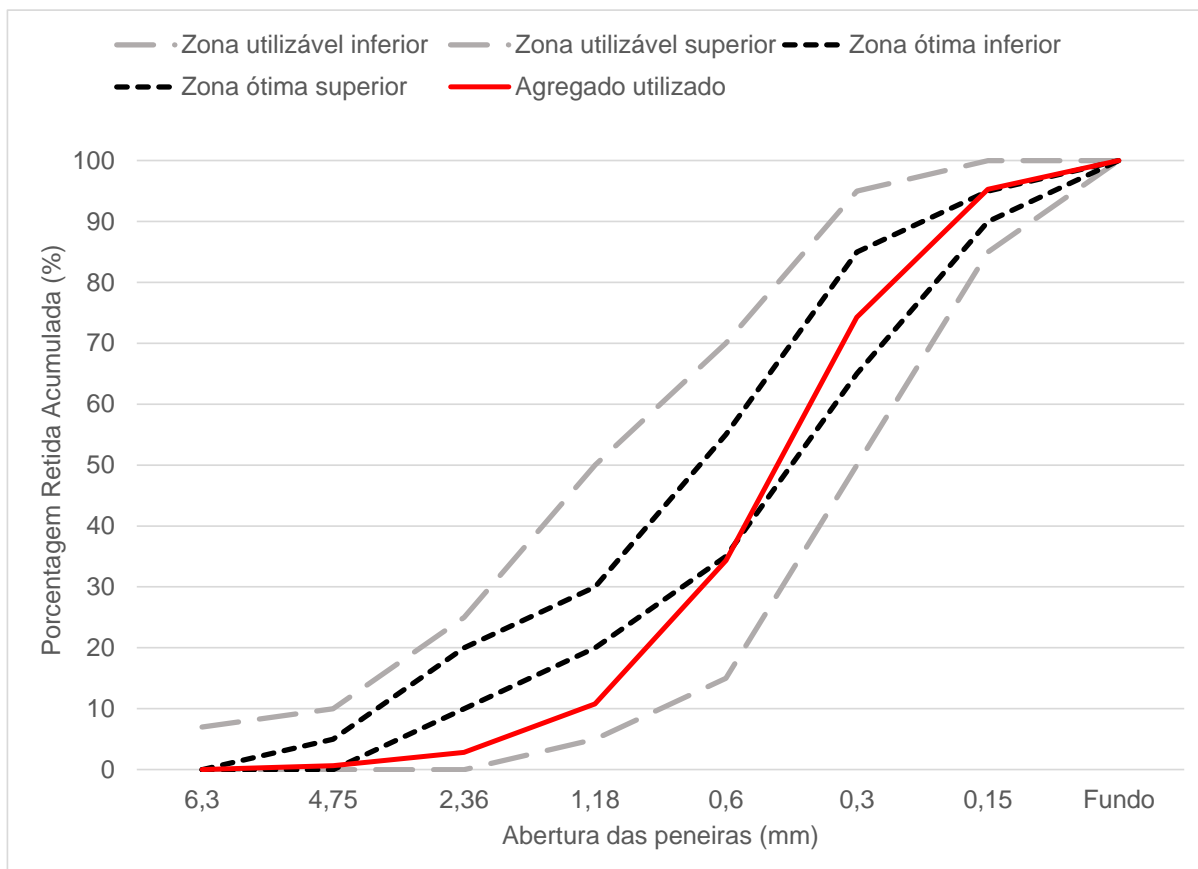
Peneira (mm)	% Retida	% Acumulada
4,8	0,64	1
2,4	2,18	3
1,2	7,95	11
0,6	23,59	34
0,3	39,91	74
0,15	21,01	95
Fundo	4,72	100
	MF	2,18
	Dimensão máxima característica	2,40 mm

Fonte: Autor

O agregado apresentou módulo de finura de 2,18, a dimensão máxima característica encontrada foi de 2,40 mm. A curva de distribuição granulométrica do agregado encontra-se entre a zona ótima superior e a zona utilizável inferior, segundo o estabelecido pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).

Na Figura 4.1 é possível observar o gráfico de distribuição granulométrica do agregado utilizado.

Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor

Já a caracterização quanto a outros parâmetros físicos do agregado pode ser observada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Caracterização física do agregado miúdo

Característica	Metodologia	Agregado utilizado
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	0,21
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,64
Massa unitária seca e solta (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1275,83
Massa unitária compactada (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1709,00
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 (ANBT, 2003)	0,64

Fonte: Autor

4.1.2 PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E MINERALÓGICAS DO CIMENTO E ADIÇÕES MINERAIS

A composição química do cimento, pó de vidro e fíler calcário é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Componentes químicos do cimento e adições

Componentes	Cimento (%)	Pó de vidro (%)	Fíler Calcário* (%)
Óxido silícico (SiO_2)	23,00	74,00	0,11
Óxido férrico (Fe_2O_3)	2,49	0,42	0,02
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	4,31	3,70	0,16
Óxido de cálcio (CaO)	61,40	9,10	55,69
Trióxido de enxofre (SO_3)	2,97	-	-
Óxido de estrôncio ($SR O$)	0,27	0,04	-
Óxido de tório (ThO_2)	< 0,01	< 0,01	-
Óxido de potássio (K_2O)	0,96	0,56	-
Óxido de sódio (Na_2O)	-	11,00	-
Óxido de urânio (U_3O_2)	< 0,01	< 0,01	-
Óxido de fósforo (P_2O_5)	0,52	-	-
Óxido de titânio (TiO_2)	-	-	-
Cloro (Cl^-)	0,12	-	-
Óxido de rubídio (Rb_2O)	-	0,02	-
Óxido de Magnésio (MgO)	-	0,74	0,26
Perda ao fogo (PF)	4,05	0,58	Máx 45,00

*Dados fornecidos pelo fabricante.

Fonte: Autor

Para o cimento, verifica-se a presença de elevados teores de óxidos de CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SO_3 , como era esperado. Os requisitos químicos para o cimento utilizado foram todos atendidos, estando em conformidade com a NBR 16697:2018 (ABNT, 2018). Alguns desses requisitos são as porcentagens referentes ao óxido de magnésio ($MgO \leq 6,5\%$) e trióxido de enxofre ($SO_3 \leq 4,5\%$). Quanto à perda ao fogo a norma coloca para cimento Portland CP V ARI um valor menor ou igual a 6,5%.

Para pó de vidro é possível identificar uma grande quantidade (74%) de anidro silícico (SiO_2), como também a presença dos óxidos de sódio (11,0%), cálcio (9,1%), alumínio (3,7%) e ferro (0,42%), entre outros. Diante da composição química do material, as recomendações da NBR 12653:2014 (ABNT, 2014) para materiais pozolânicos são válidas, já que essa norma determina que a soma dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deve ser maior que 70% para pozolanas classes N e C: materiais vulcânicos, argilas calcinadas, cinzas volantes.

Já a composição básica do fíler calcário é carbonato de cálcio (CaCO_3). Na Tabela 4.4 são apresentadas algumas propriedades físicas do cimento e adições minerais.

Tabela 4.4 - Propriedades físicas do cimento e adições

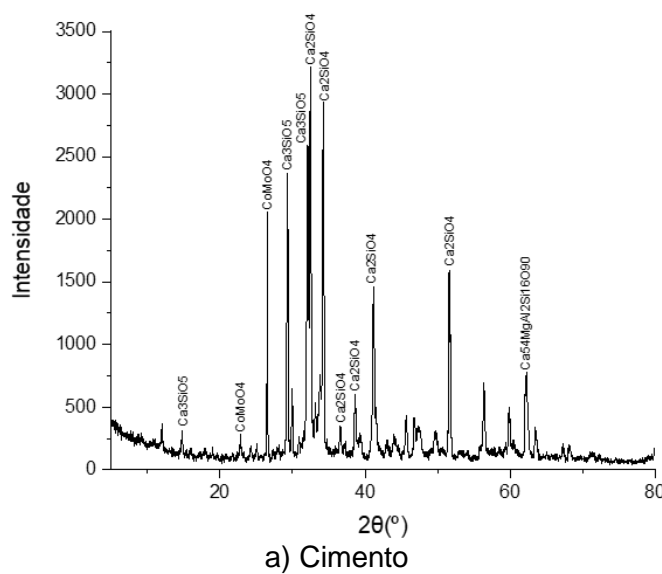
Propriedades	Cimento	Pó de vidro	Fíler calcário
Massa específica (g/cm^3)	3,16	2,54	2,75
Superfície específica (Blaine) (cm^2/g)	6650,00	3930,00	-
Densidade aparente compactada (g/cm^3)	-	-	1,15 a 1,35*
pH (solução aquosa 5%)	-	-	8,5 a 10,5*

*Dados fornecidos pelo fabricante.

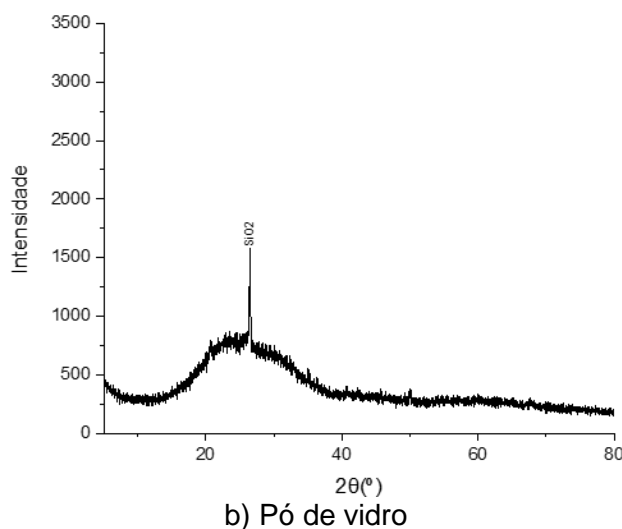
Fonte: Autor

As características mineralógicas, obtidas por DRX, do cimento e pó de vidro passante na peneira #200 são apresentadas pelos difratogramas na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Difratogramas: a) Cimento. b) Pó de vidro.



a) Cimento



b) Pó de vidro

Fonte: Autor

O cimento apresenta números consideráveis de picos cristalinos, em sua maioria constituídos de silicato tricálcico ou alita - C_3S (Ca_3SiO_5) e silicato dicálcico ou belita - C_2S (Ca_2SiO_4). Para estimar a composição teórica ou potencial dos compostos do cimento Portland são utilizadas as equações de Bogue.

É possível observar na Figura 4.2 (b) que o pó de vidro é predominantemente amorfo, com um pico de SiO_2 entre os ângulos 2θ ($^\circ$) de 25 a 30. O pico de SiO_2 pode ser explicado pela contaminação do material durante o processo de moagem a seco com esferas de sílex, indicando o desgaste do moinho e das bolas ricas em SiO_2 . No entanto, considerou-se que o efeito dessa contaminação não foi significativo.

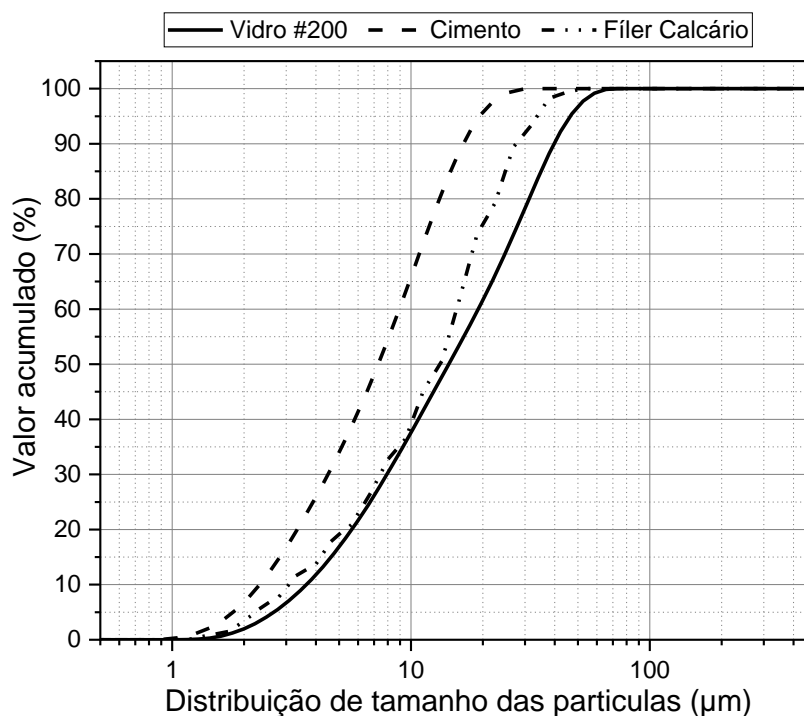
Entende-se o pico cristalino por contaminação já que vidro, por natureza, é um material que sempre apresenta difratometria amorfa. E, neste caso o material pode ser associado ao quartzo (sílica cristalina). Por se tratar de uma contaminação por sílica cristalina, não haveria interferência na reação de hidratação do cimento, uma vez que não é um constituinte reativo com os outros compostos presentes, comportando-se como um agregado em menores dimensões, da mesma forma que um fíler.

Um exemplo de identificação de contaminação em moagem foi identificado por Elaqra e Rustom (2018) que identificaram contaminação do pó de vidro por cimento que foi proveniente de resquícios do material no equipamento de moagem. Ainda que o pó de vidro tenha apresentado um pequeno pico de sílica cristalina, a quantidade de material amorfo identificado pelos outros ângulos de banda é consideravelmente maior, indicando o amorfismo e o potencial pozolânico do pó de vidro.

Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas granulométricas do cimento, pó de vidro passante pela peneira #200 e fíler calcário. Analisando a distribuição granulométrica, o cimento apresentou tamanho de partícula em d_{50} igual a $7,37 \mu m$, o pó de vidro $14,19 \mu m$, e o fíler calcário $13,40 \mu m$, mostrando a grande semelhança entre esses dois últimos materiais na distribuição de tamanho de grão.

Assim, o fíler calcário possui uma análise satisfatória para atuar como material não reativo em substituição ao pó de vidro, possibilitando o seu uso no presente estudo.

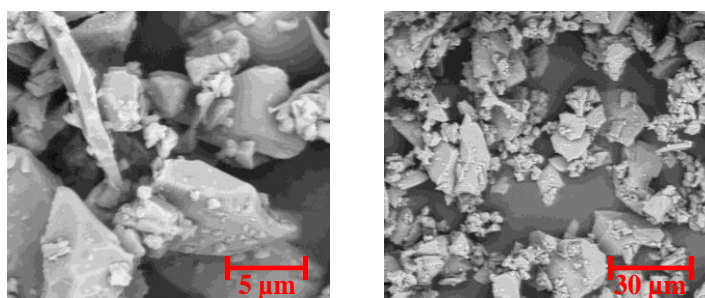
Figura 4.3 - Curvas granulométricas do cimento e adições.



Fonte: Autor

Para o pó de vidro foi realizada a análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Na Figura 4.4 é possível observar as micrografias obtidas.

Figura 4.4 - Micrografias do pó de vidro passante pela peneira #200.



Fonte: Autor

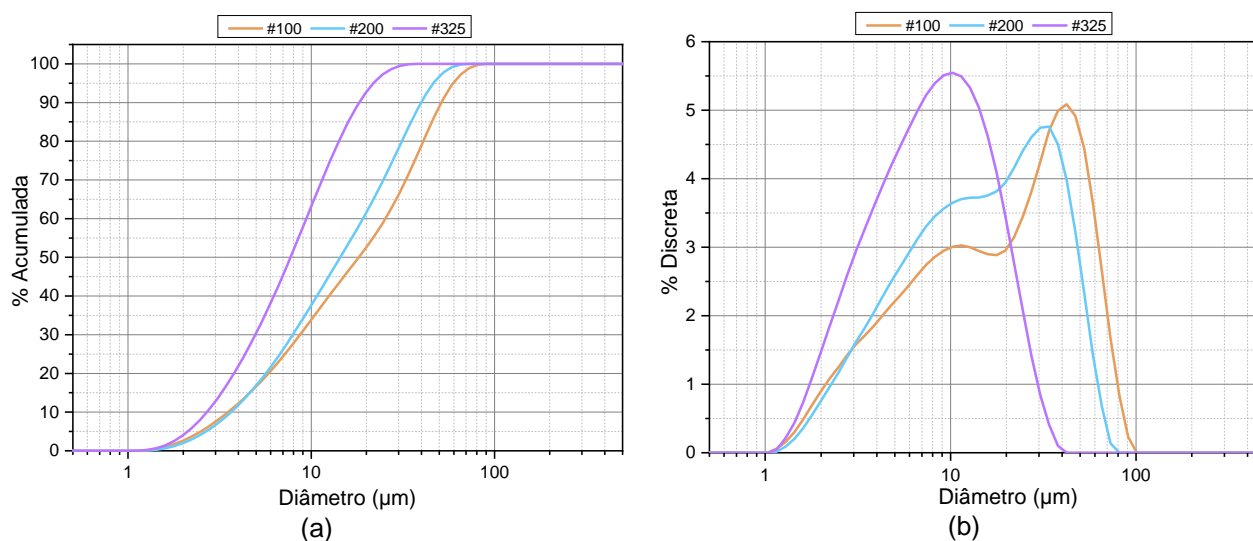
Pela análise da Figura 4.4 é possível verificar a similaridade entre a morfologia das partículas do vidro com a típica dos cimentos, isto é, com arestas definidas e formato angular. As adições minerais incorporadas em uma mistura de concreto podem ser classificadas, de acordo com sua forma, em três diferentes categorias morfológicas: esférica, lamelar e irregular (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). Assim, pela análise das micrografias é possível identificar uma morfologia irregular do pó de vidro.

4.1.3 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO PÓ DE VIDRO EM TRÊS DIFERENTES TAMANHOS MÁXIMOS DE GRÃO

Para este trabalho, a atividade pozolânica do vidro finamente moído foi analisada pela determinação indireta da atividade pozolânica com a cal hidratada e com cimento Portland, e a pozolanicidade por condutividade elétrica. Já como método direto, foi utilizado o método de Chappelle modificado. Procurou-se a classificação e hierarquização de diferentes granulometrias de pó de vidro perante os parâmetros estabelecidos por esses métodos e analisar os resultados encontrados do pó de vidro com os expostos pela bibliografia de algumas adições em outros estudos e com as especificações de normas técnicas. Destaca-se que o método de avaliação por condutividade elétrica, embora utilizado em outras adições pozolânicas, não apresenta dados na bibliografia acerca da aplicação do procedimento em misturas com vidro.

Na Figura 4.5 é possível observar as distribuições granulométricas acumulada e discreta do vidro finamente moído nas três granulometrias estudadas.

Figura 4.5 - Distribuição granulométrica do pó de vidro: a) Acumulada; b) Discreta



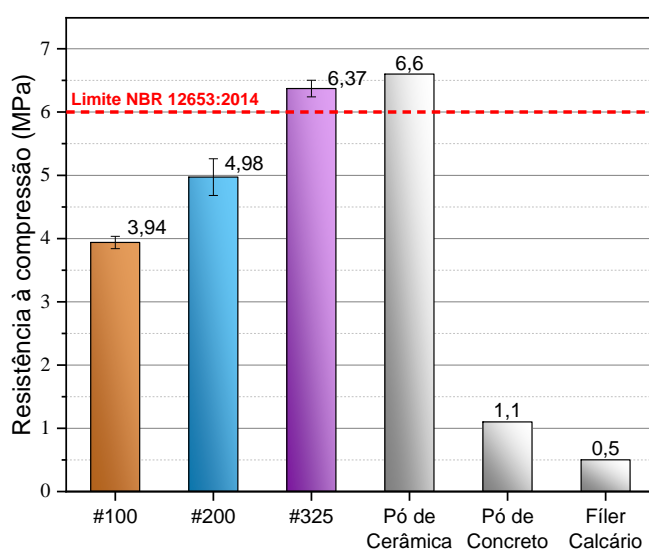
Fonte: Autor

Pela análise gráfica das curvas granulométricas (Figura 4.5), é possível observar que o tamanho máximo de partícula, 90 µm, é encontrado no material passante pela peneira #100 (maior malha analisada). É interessante notar que o tamanho mínimo de partícula de aproximadamente 1 µm é o mesmo para as três

curvas granulométricas. Já os diâmetros medianos (d50) são de 7,7 μm ; 14,4 μm e 18,1 μm para os vidros passantes nas malhas #325, #200 e #100, respectivamente.

A Figura 4.6 mostra os resultados de IAP com cal para as argamassas com vidro nas três granulometrias estudadas, e comparados aos resultados obtidos por Brekailo *et al.* (2019), que avaliaram o potencial reativo de resíduos de cerâmica vermelha (d50 = 30 μm) e concreto (d50 = 25 μm), além de fíler calcário (d50 = 20 μm) como referência.

Figura 4.6 - Resistência à compressão nos ensaios de IAP com a cal: pó de vidro nas três granulometrias estudadas e comparadas com pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário (BREKAILO *et al.*, 2019).



Fonte: Autor

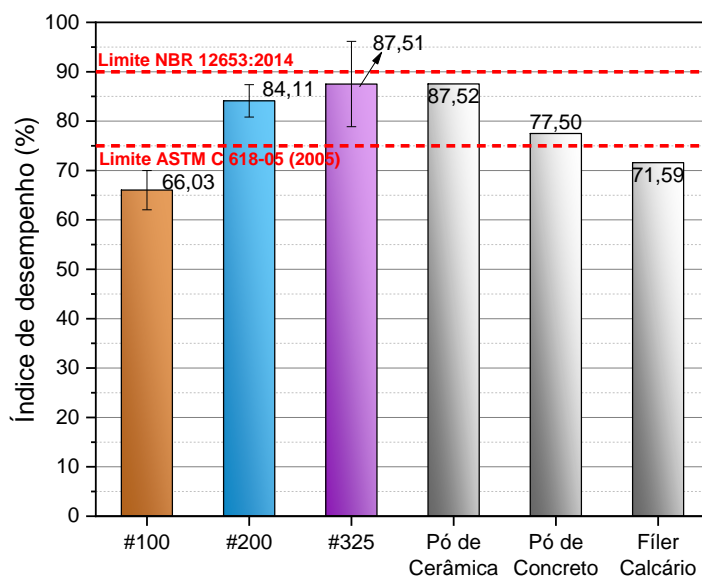
Na Figura 4.6 é possível observar que o pó de vidro #325 foi o único que alcançou resultados satisfatórios pelo IAP com cal aos 7 dias, enquanto as demais granulometrias não atingiram a resistência de 6,0 MPa indicada pela NBR 12653:2014 (ABNT, 2014). Observa-se ainda que a atividade pozolânica do pó de vidro aumenta com a diminuição da granulometria (aumento da finura).

Em relação à referência analisada (BREKAILO *et al.*, 2019), apenas o pó de cerâmica apresentou resultado acima do limite de 6,0 MPa. Também é válido observar que o material fíler, que se espera baixa reatividade, apresentou de fato a menor resistência.

A Figura 4.7 mostra os resultados da determinação do índice de desempenho com cimento Portland para o vidro finamente moído nas três granulometrias,

comparados com dados de Brekailo *et al.* (2019) para pós de cerâmica, concreto e fíler calcário.

Figura 4.7 - Índice de desempenho com cimento Portland: pó de vidro nas três granulometrias estudadas e comparadas com pó de cerâmica, pó de concreto e fíler calcário (BREKAILO *et al.*, 2019).



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 4.7 que o índice de desempenho de materiais pozolânicos com o cimento Portland aos 28 dias de nenhuma das granulometrias estudadas atingiu o índice de desempenho de 90% preconizado como requisito pela NBR 12653:2014 (ABNT, 2014) para classificação de materiais pozolânicos.

Em contrapartida, a norma americana ASTM C 618-05 (2005) estabelece que 75% é o índice de desempenho mínimo necessário para classificar um material como pozolânico. Nesse contexto, os vidros passantes pelas peneiras #200 e #325 se enquadram no que é estabelecido. Uma comparação da pozolanicidade determinada pelas normas brasileira e americana também foi apresentada por Cordeiro *et al.* (2008) acerca da atividade pozolânica e efeito fíler da cinza do bagaço da cana de açúcar.

Assim como observado no pó de vidro passante pela peneira #325 no presente estudo, Brekailo *et al.* (2019) encontrou como melhor performance de índice de desempenho com o cimento Portland a argamassa analisada com adição de pó de cerâmica vermelha. O vidro passante pela peneira #100 e o fíler calcário apresentaram os desempenhos mais baixos, demonstrando baixa atividade pozolânica.

Mesmo apresentando desempenho inferior, confirmando o caráter inerte do material, o fíler calcário apresenta resultado próximo ao limite da norma americana, isso ocorre, pois mesmo materiais inertes misturados com cimento podem ter um efeito significativo na hidratação das fases do clínquer, tal atividade é chamada de efeito de fíler.

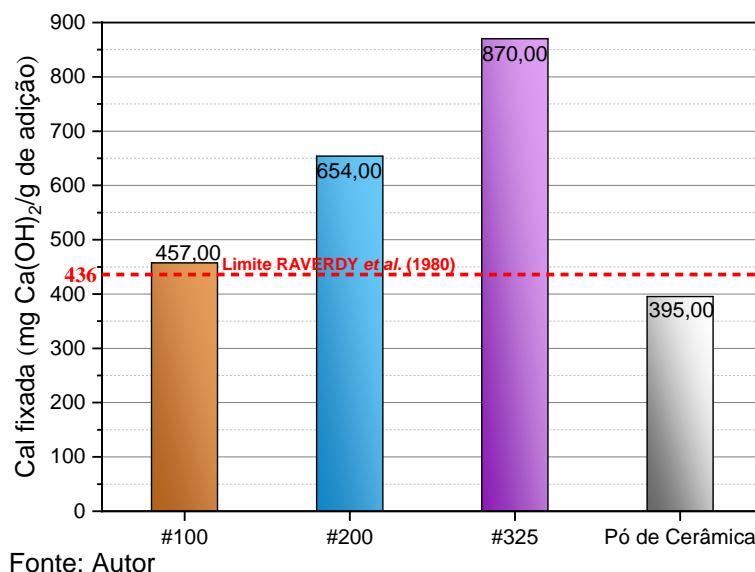
O efeito físico, conhecido como efeito fíler, corresponde ao processo de refinamento dos poros: os produtos da reação de hidratação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, aumentando a resistência e reduzindo a permeabilidade do sistema (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Existem dois mecanismos principais que contribuem para o efeito fíler: a) o primeiro é relacionado ao espaço extra: como o material de enchimento não produz hidratos, na mesma proporção água/sólidos, a proporção água/clínquer é maior e há mais espaço para os produtos de hidratação das fases do clínquer; b) o segundo mecanismo se relaciona ao efeito de nucleação em que a elevada superfície específica do material cimentício suplementar atua como locais de nucleação para os produtos de hidratação das fases do clínquer, que ocasiona um refinamento dos poros da matriz hidratada (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

O método de Chapelle modificado foi proposto por Raverdy *et al.* (1980), segundo os quais 330 mg CaO/g de adição (equivalente, por cálculo estequiométrico a 436 mg Ca(OH)₂/g de adição) é o consumo mínimo estabelecido para classificação da adição mineral como material pozolânico.

Na Figura 4.8, estão expressos os resultados com o consumo de Ca(OH)₂/g de pó de vidro nas três granulometrias analisadas. Já em relação ao estudo comparativo (BREKAILO *et al.*, 2019), o ensaio de Chapelle modificado foi realizado apenas na análise com adição de pó de cerâmica vermelha, considerando que as outras duas adições (pó de concreto e fíler calcário) possuíam quantidade mais elevada de cálcio em sua composição (52,23% e 78,03% de CaO, respectivamente, enquanto pó de cerâmica possui 9,10% de CaO em sua composição), não sendo recomendada a quantificação da cal remanescente nessas condições para pó de concreto e fíler calcário.

Figura 4.8 - Ensaio de Chapelle modificado: pó de vidro nas três granulometrias estudadas e comparadas com pó de cerâmica (BREKAILO *et al.*, 2019).



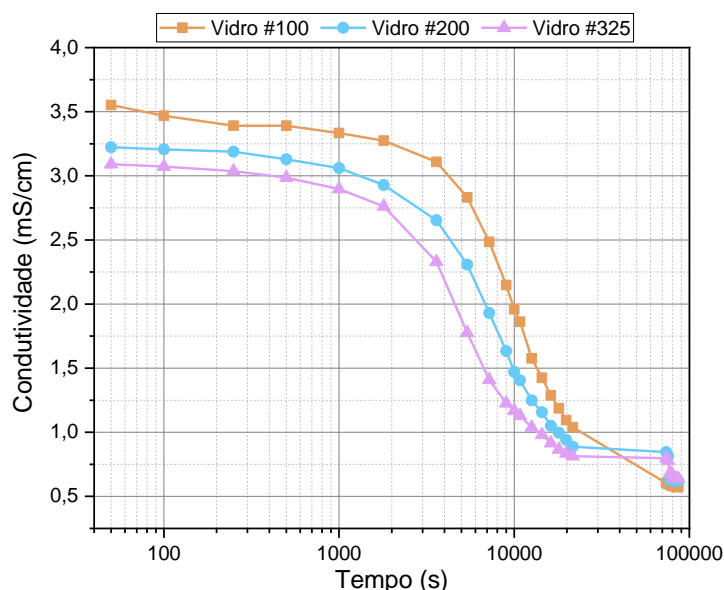
Pela análise da Figura 4.8 é possível observar que todas as três granulometrias de pó de vidro atingiram o limite mínimo de 436 mg Ca(OH)₂/g de adição mineral, mas é notável o aumento do desempenho pozolânico com partículas mais finas do vidro, já que o material passante pela peneira de malha #325 atingiu 870 mg de cal fixada por cada grama de pó de vidro, valor bem acima do limite mínimo.

Outra análise importante de se destacar é que a NBR 15894-1:2010 (ABNT, 2010) estabelece que no caso do metacaulim (material pozolânico destinado ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta) o índice de atividade pozolânica Chapelle deve ser maior ou igual a 750 mg Ca(OH)₂/g. E, neste estudo, o pó de vidro com menor granulometria ultrapassou o limite deste material.

Já o pó de cerâmica vermelha apresentou o teor de 395 mg Ca(OH)₂/g, resultado abaixo do mínimo, não podendo ser classificado como pozolana neste ensaio.

Os resultados da variação da condutividade elétrica das soluções com pó de vidro com três tamanhos máximos de grão estão apresentados na Figura 4.9. A condutividade é expressa por microsiemens/centímetro (mS/cm).

Figura 4.9 - Variação da condutividade do pó de vidro em três tamanhos máximos de partícula.



Fonte: Autor

A Tabela 4.5 apresenta os valores de condutividade imediatamente antes da inserção do material em estudo (C_0), após decorrer 100, 1.000, 10.000, e 100.000 segundos do material ser inserido na solução (C_t), e a variação entre a condutividade inicial e final para cada tempo (Δ_t).

Tabela 4.5 - Condutividade elétrica (C_t) e variação da condutividade elétrica (Δ_t) no decorrer do ensaio entre 0 e 100.000 segundos.

Amostra	C_0	C_{100}	$C_{1.000}$	$C_{10.000}$	$C_{100.000}$	Δ_{100}	$\Delta_{1.000}$	$\Delta_{10.000}$	$\Delta_{100.000}$
<i>(mS/cm)</i>									
#100	3,55	3,47	3,33	1,96	0,57	0,08	0,22	1,59	2,98
#200	3,42	3,21	3,06	1,47	0,62	0,21	0,36	1,95	2,80
#325	3,34	3,07	2,90	1,17	0,64	0,27	0,44	2,17	2,70

Fonte: Autor

Segundo Luxán, Madruga e Saavedra (1989), a adição mineral em estudo, pelo método da condutividade elétrica, pode ser classificada em três categorias de pozolanidade de acordo com a variação entre condutividade inicial e final, conforme indicado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Avaliação da atividade pozolânica por medição da condutividade elétrica.

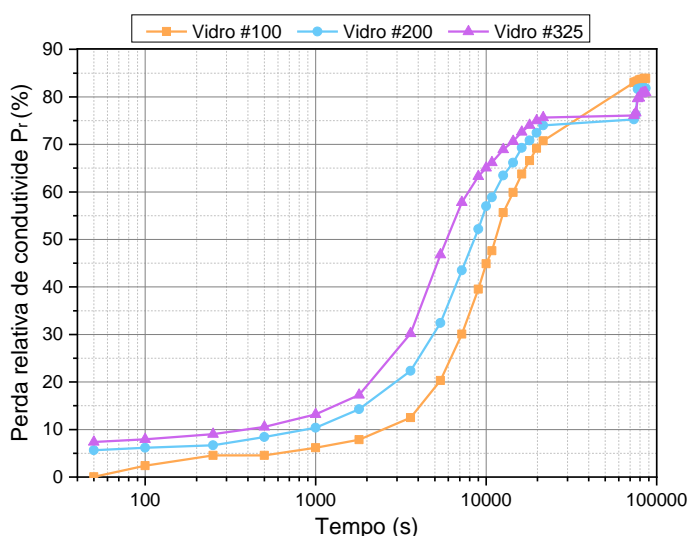
Classificação do material	Variação da condutividade elétrica (mS/cm)
Não pozolânico	< 0,40
Pozolânico variável	0,40 < Δ < 1,20
Boa pozolanidade	> 1,20

Fonte: Adaptado de Luxán, Madruga e Saavedra (1989)

É possível observar que até o tempo de 1.000 segundos apenas o pó de vidro passante pela peneira #325 apresenta uma pozolanicidade variável, já que nesse tempo foi a única granulometria que apresentou variação de condutividade entre 0,40 e 1,20 mS/cm. Passados 10.000 s da mistura, o pó de vidro passante pelas três peneiras analisadas apresentou boa atividade pozolânica, já que todos exibiram neste tempo, variação de condutividade maior que 1,20 mS/cm.

Também foram traçadas as curvas de Perda Relativa de Condutividade Elétrica (P_r) em função do tempo de reação (s). Na Figura 4.10 estão apresentadas as curvas com os resultados do ensaio para pó de vidro nas três granulometrias.

Figura 4.10 - Curvas de perda relativa de condutividade elétrica versus tempo (s) para a solução de CH e pó de vidro.



Fonte: Autor

Para complementar a análise, na Tabela 4.7 são apresentados os resultados com pó de vidro comparados aos resultados de Fernandes *et al.* (2017), que avaliou a pozolanicidade por condutividade elétrica do resíduo de porcelana (RP), em relação à pozolanas já conhecidas e tradicionais em argamassas e concretos: metacaulim (MK) e sílica da casca do arroz (SCA).

Tabela 4.7 - Perda relativa de condutividade elétrica (%) em função do tempo (s) para diferentes adições

Tempo (s)	Vidro #100	Vidro #200	Vidro #325	RP*	MK*	SCA*
100	2,40	6,15	7,94	5	63	27
1000	6,16	10,39	13,21	14	69	46
10.000	44,86	56,97	65,00	45	80	48
100.000	83,87	81,82	80,92	83	74	58

*(FERNANDES *et al.*, 2017)

Fonte: Autor

Pela análise da Figura 4.10 é possível observar que os baixos valores iniciais de P_r do pó de vidro ocorrem pois no início das reações o material ainda estava sendo dissolvido. A tendência de estabilização das curvas ocorre após 20.000 segundos e indica que existe uma redução da atividade química, sendo o momento em que a reação praticamente é finalizada. Isso se deve pela reação entre a sílica amorfa e o cálcio para formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Assim, à medida que diminui a concentração de Ca(OH)_2 na solução pelo consumo da pozolana, os valores de condutividade elétrica diminuem, pois a reação forma produtos insolúveis e a menor quantidade de Ca^{2+} diminui os valores de condutividade elétrica (FERNANDES *et al.*, 2017).

É possível observar que nos primeiros momentos do ensaio, o pó de vidro com menor tamanho máximo de partícula (#325) obteve maiores porcentagens de perda relativa de condutividade, mostrando uma melhor reatividade desta finura em relação as outras granulometrias estudadas.

Pode-se observar pela análise da Tabela 4.7 que o comportamento das três granulometrias de pó de vidro perante a perda de condutividade é similar aos valores encontrados com o resíduo de porcelana. O MK e a SCA tiveram uma P_r mais elevada nas idades iniciais, atendendo para uma maior afinidade química com o cálcio presente na solução. Nos 1000 segundos, o valor obtido pelo MK é o que mais se destaca em relação às outras adições analisadas. Vale ressaltar que este material possui alta pozolanicidade (FERNANDES *et al.*, 2017).

Destaca-se que, apesar de apresentar uma reação mais lenta, após os 100.000 segundos, as três granulometrias estudadas do vidro finamente moído atingem o mesmo valor encontrado pelo metacaulim (80%).

Apresentadas as análises, na Tabela 4.8 é mostrado um resumo com os resultados obtidos por cada granulometria do pó de vidro em relação aos ensaios de avaliação da atividade pozolânica que foram realizados. É indicado um sinal positivo no caso de indicação para pozolana e um negativo quando ocorre situação contrária.

Tabela 4.8 - Resumo com os resultados de atividade pozolânica para pó de vidro.






Granulometria de pó de vidro	IAP Cal	ID - Cimento (Limite NBR 12653:2014)	ID - Cimento (Limite ASTM C 618-05)	Chapelle	Pozolanicidade por condutividade elétrica
#100 (150 μm)					

Tabela 4.8 - Resumo com os resultados de atividade pozolânica para pó de vidro (continuação).

Granulometria de pó de vidro	IAP Cal	ID - Cimento (Limite NBR 12653:2014)	ID - Cimento (Limite ASTM C 618-05)	Chapelle	Pozolanidade por condutividade elétrica
#200 (75 µm)	✗	✗	✓	✓	✓
#325 (45 µm)	✓	✗	✓	✓	✓

Fonte: Autor

Em todas as análises realizadas foi possível identificar que o vidro finamente moído com menor tamanho máximo de partícula obteve melhores resultados de atividade pozolânica. Esta evidência também foi relatada por Khmiri, Chaabouni e Samet (2013) que estudaram a atividade pozolânica e a resistência à compressão de argamassas com 20% de substituição de pó de vidro em relação ao cimento com diferentes granulometrias de pó de vidro. Os autores evidenciaram que a menor granulometria estudada (<20 µm) exibiu um melhor comportamento pozolânico.

Outros autores também evidenciam um melhor comportamento pozolânico do vidro finamente moído quando utilizado em menores granulometrias (IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2010; SHARIFI *et al.*, 2016). Além disso, estes autores destacam que com a diminuição das partículas de vidro utilizadas como material cimentício suplementar, ocorre um controle das taxas de reação álcali-sílica (RAS) nos compósitos cimentícios.

4.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

O traço unitário (em massa) e o índice de consistência das argamassas podem ser observados na Tabela 4.9. A relação água/aglomerante das misturas foi fixada em 0,55.

Tabela 4.9 - Traço unitário e índices de consistência.

Traço	Cimento	Pó de vidro	Fíler calcário	Agregado miúdo	Consistência (mm)
REF	1,00	-	-	3,00	233,67
VD10	1,00	0,09	-	3,33	231,00
VD20	1,00	0,20	-	3,75	235,00
VD30	1,00	0,34	-	4,29	233,33
VD50	1,00	0,80	-	6,00	220,67
FC10	1,00	-	0,09	3,33	227,33

Tabela 4.9 - Traço unitário e índices de consistência (continuação).

Traço	Cimento	Pó de vidro	Fíler calcário	Agregado miúdo	Consistência (mm)
FC20	1,00	-	0,20	3,75	227,67
FC30	1,00	-	0,34	4,29	224,00
FC50	1,00	-	0,80	6,00	220,33

Fonte: Autor

Analisando resultados, é possível observar que todas as consistências ficaram dentro do limite estabelecido de (230 ± 10) mm. Atenta-se que os maiores teores de substituição (VD50 e FC50) apresentaram menores consistências.

O estudo de Nwaubani e Poutos (2013), acerca da influência de vidro finamente moído (tamanho médio de partícula $<300 \mu\text{m}$) nas propriedades de argamassas de cimento, traz como resultado que com a inclusão de maiores teores de vidro, a trabalhabilidade das misturas tende a diminuir proporcionalmente.

Patel *et al.* (2019) também avaliaram o índice de consistência para misturas de argamassas com teores de substituição entre 0% e 20% de cimento por pó de vidro, os autores verificaram um aumento de trabalhabilidade no teor de 20% e justificam este aumento devido às partículas mais finas e alta área específica do vidro finamente moído. Os autores utilizaram duas classes de tamanhos de grão de vidro finamente moído ($\leq 75 \mu\text{m}$ e $\leq 63 \mu\text{m}$), a menor granulometria apresentou um maior aumento na trabalhabilidade.

4.3 ENSAIOS REALIZADOS EM ARGAMASSAS

4.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

As resistências à compressão axial das argamassas podem ser observadas na Tabela 4.10 em que são apresentados os valores para as idades de 7, 28 e 91 dias. Os valores individuais e as análises estatísticas para as três idades estão apresentadas nos Apêndices A, B e C deste trabalho.

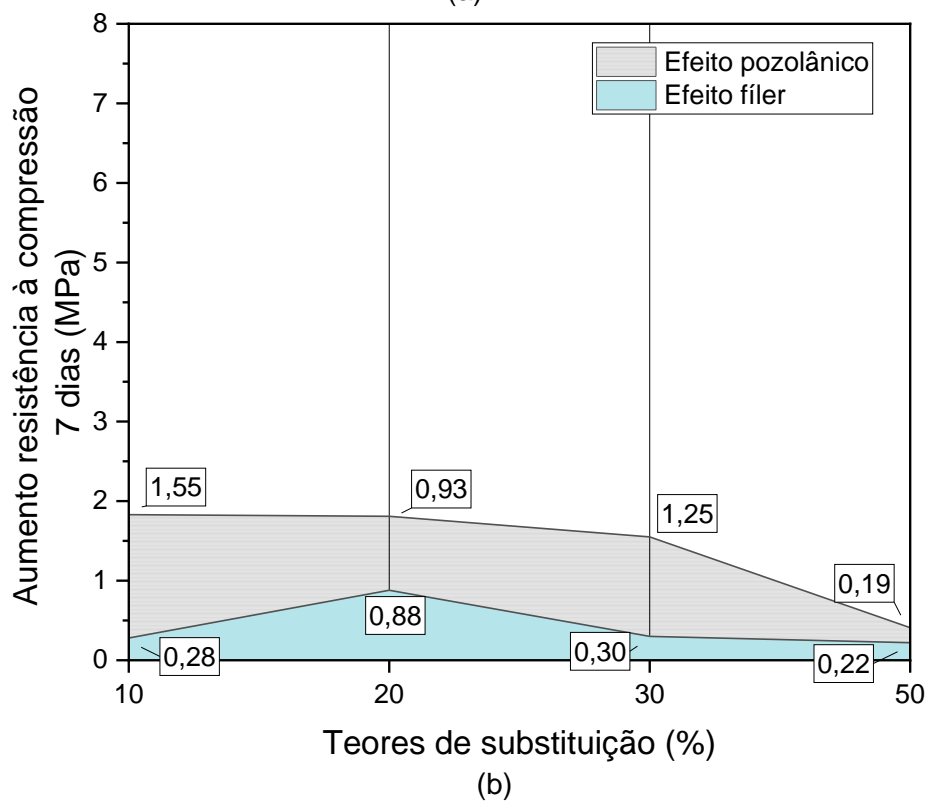
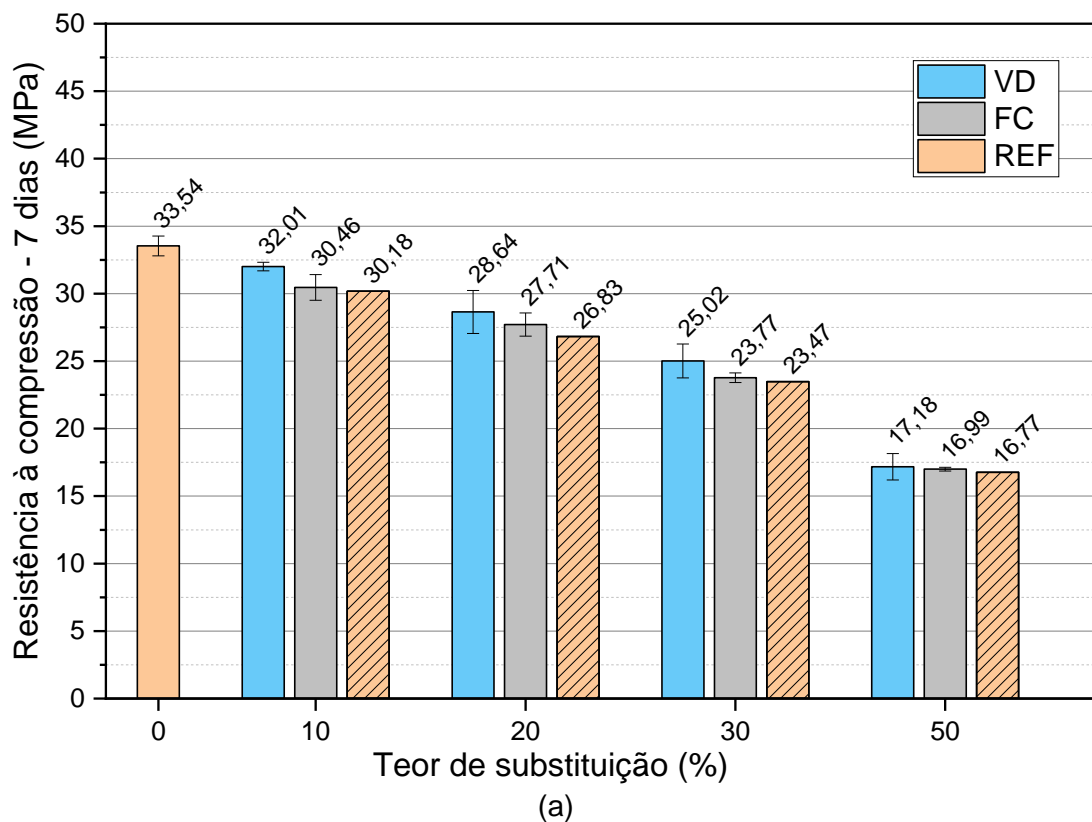
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial das argamassas aos 7, 28 e 91 dias.

Resistência à compressão axial (MPa)									
Traço	7 dias			28 dias			91 dias		
	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
REF	33,54	0,73	2,19	39,78	1,11	2,79	43,48	0,75	1,73
VD10	32,01	0,32	0,99	38,57	2,33	6,05	41,70	0,76	1,83
VD20	28,64	1,59	5,55	36,87	0,79	2,15	40,29	1,76	4,38
VD30	25,02	1,26	5,02	32,93	0,49	1,50	36,18	0,93	2,56
VD50	17,18	0,98	5,71	22,21	1,63	7,34	28,67	1,09	3,80
FC10	30,46	0,95	3,13	38,33	0,28	0,72	39,60	2,28	5,76
FC20	27,71	0,86	3,09	34,36	1,02	2,97	36,33	1,57	4,33
FC30	23,77	0,36	1,52	28,20	0,22	0,78	32,05	1,23	3,85
FC50	17,00	0,14	0,82	21,42	0,51	2,40	23,44	1,22	5,19
Traço	Diferença significativa em relação ao REF			Diferença significativa em relação ao REF			Diferença significativa em relação ao REF		
VD10	NÃO			NÃO			NÃO		
VD20	SIM			SIM			NÃO		
VD30	SIM			SIM			SIM		
VD50	SIM			SIM			SIM		
FC10	SIM			NÃO			SIM		
FC20	SIM			SIM			SIM		
FC30	SIM			SIM			SIM		
FC50	SIM			SIM			SIM		

Fonte: Autor

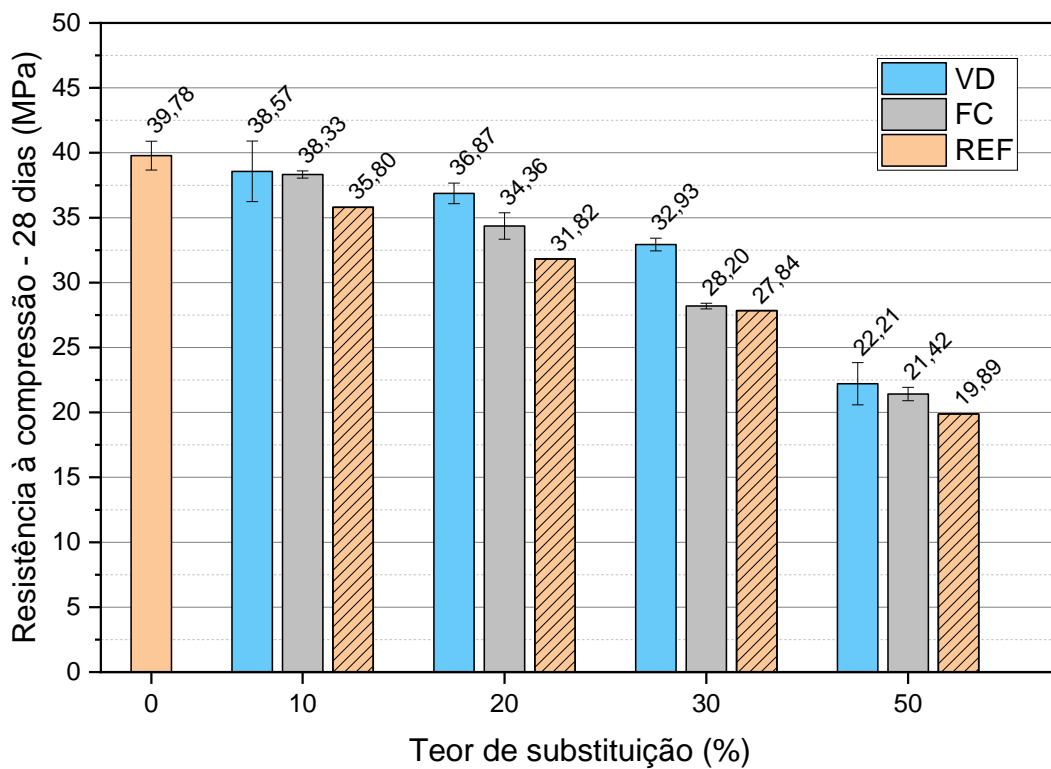
Nas Figuras 4.11(a), 4.12(a), e 4.13(a) são apresentadas comparações dos resultados de compressão axial para as argamassas de referência, com os diferentes teores de pó de vidro e fíler calcário. Assim como realizado por Noaman, Karim e Islam (2019), também é apresentado um valor teórico para cada teor sem substituição em relação ao cimento (ex: REF em 10% = REF \times 0,9). Além disso, nas Figuras 4.11(b), 4.12(b), e 4.13(b) são diferenciados os acréscimos de resistência por efeito pozolânico (EP) e efeito fíler (EF) por meio da aplicação das Equações (2.1) e (2.2) definidas no Referencial Teórico deste trabalho.

Figura 4.11 - a) Valores experimentais e teóricos para resistência à compressão axial média com VD e FC aos 7 dias. b) Acréscimos de resistência por EP e EF do pó de vidro aos 7 dias.

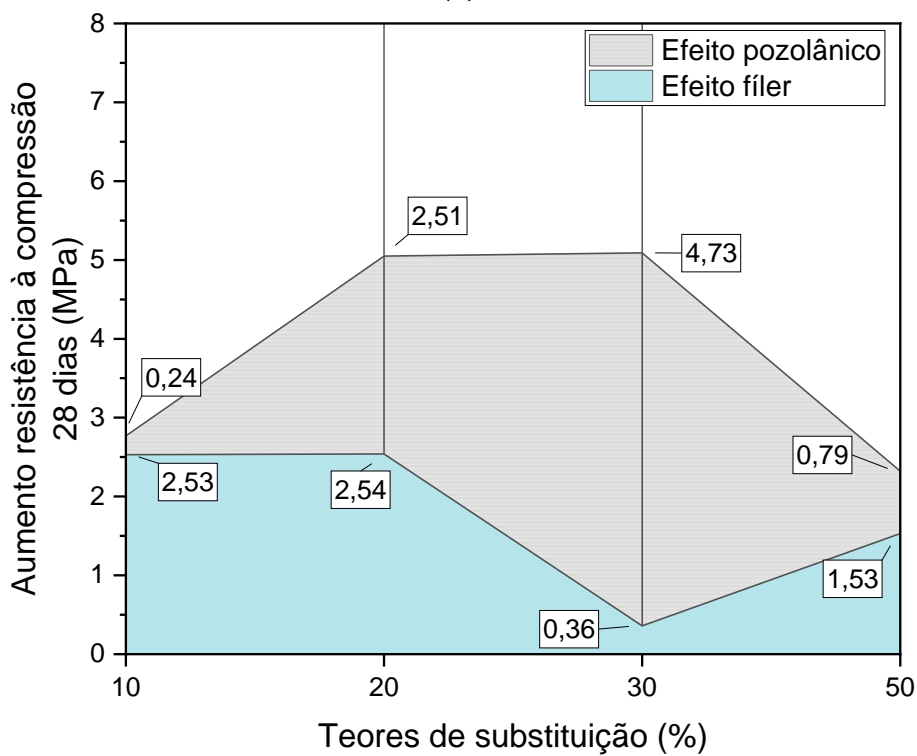


Fonte: Autor

Figura 4.12 - a) Valores experimentais e teóricos para resistência à compressão axial média com VD e FC aos 28 dias. b) Acréscimos de resistência por EP e EF do pó de vidro aos 28 dias.



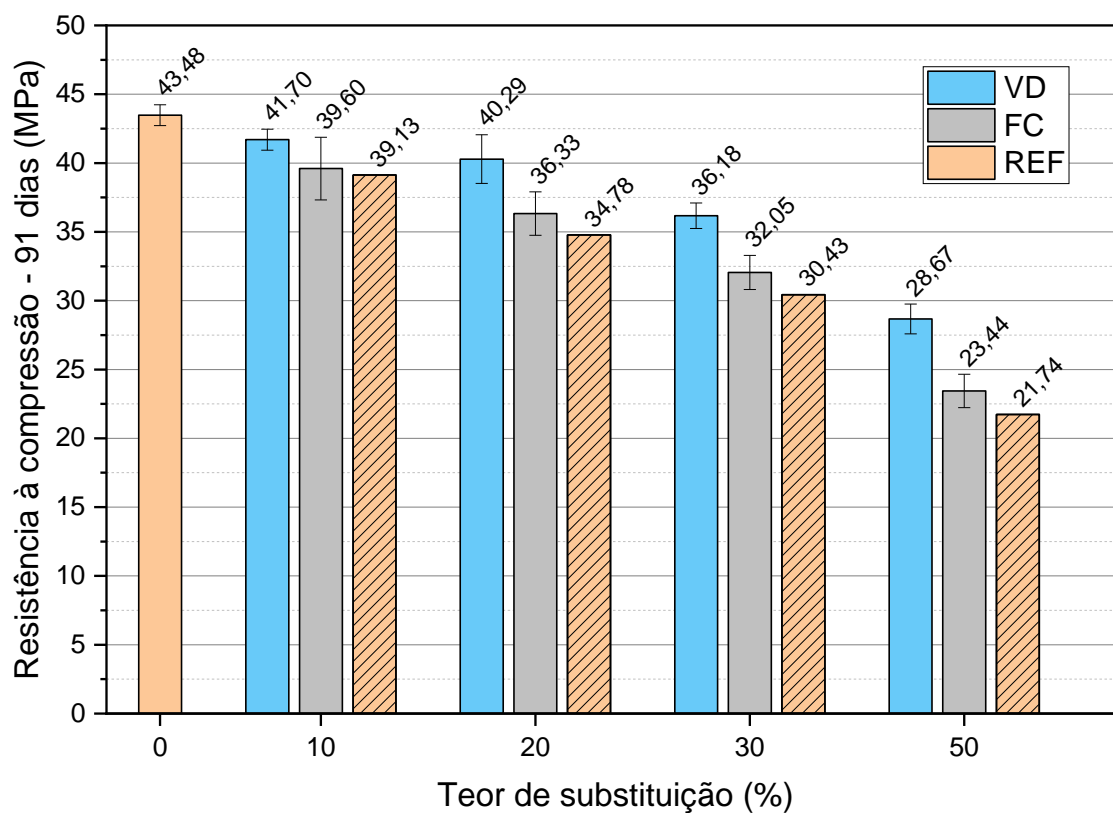
(a)



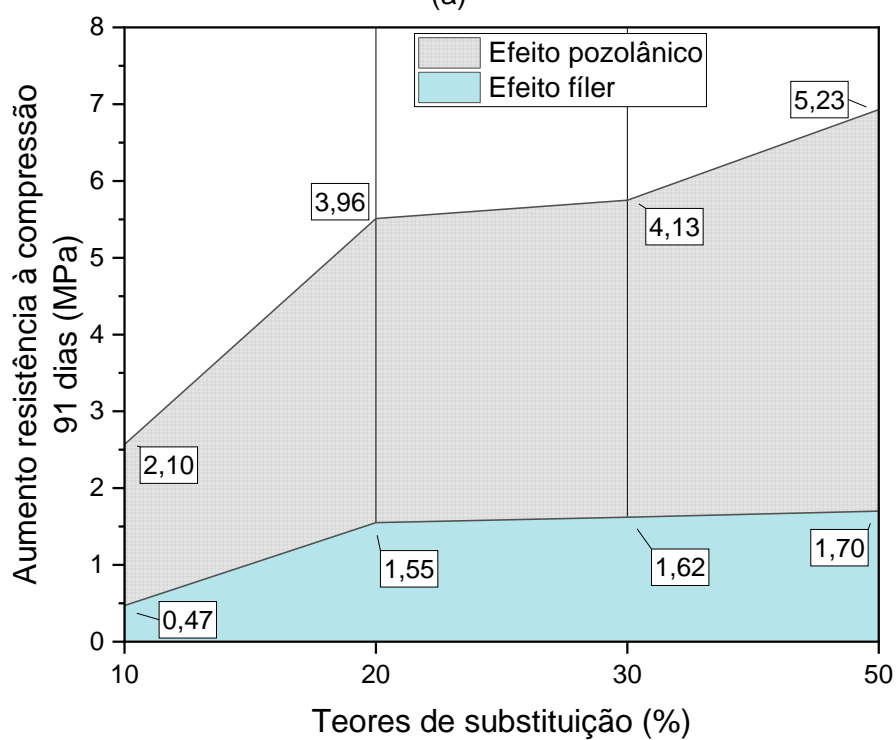
(b)

Fonte: Autor

Figura 4.13 - a) Valores experimentais e teóricos para resistência à compressão axial média com VD e FC aos 91 dias. b) Acréscimos de resistência por EP e EF do pó de vidro aos 91 dias.



(a)



(b)

Fonte: Autor

Os efeitos pozolânico e fíler do pó de vidro nas argamassas foram quantificados para fazer o estudo comparativo entre ambos na avaliação da resistência à compressão axial das argamassas. A resistência das argamassas nas três idades avaliadas mostrou ser influenciada por EP e EF, em que os acréscimos de resistência à compressão observados nos traços com fíler calcário refere-se apenas ao EF do pó de vidro, como observado também na pesquisa de Noaman, Karim e Islam (2019).

Assim, o ganho de resistência pela ação pozolânica do pó de vidro é calculado a partir da diferença entre os valores obtidos em VD e FC para cada teor em cada idade. Por exemplo, aos 91 dias a resistência de VD10 é 41,70 MPa, e de FC10 é 39,60 MPa, portanto, o incremento da resistência devido à reação pozolânica do pó de vidro é de 2,10 MPa (41,70 – 39,60). Todos esses valores de EP são apresentados nas Figuras referentes a cada idade de cura.

É possível observar que na idade de 91 dias há um aumento do EP à medida que se aumenta o teor de substituição, enquanto que nas outras idades não é possível ver essa regularidade. Uma interpretação possível para tal resultado pode ser a atividade química relativamente mais lenta do pó de vidro como uma pozolana, também verificada em outros trabalhos (DU; TAN, 2017). Os autores colocam que com uma idade de cura mais longa, os benefícios da reação pozolânica do pó de vidro começam a aparecer. Ocorre também, na idade de 91 dias, o maior incremento por EP (5,23 MPa) em VD50.

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. No estudo de Du e Tan (2017), os concretos com pó de vidro apresentaram resistência reduzida nas primeiras idades, porém aos 365 dias misturas com 15% e 30% de pó de vidro exibiram a maior resistência à compressão, cerca de 27% maior do que a mistura de referência. Segundo os autores, com um tempo de cura mais longo, a sílica amorfa no pó de vidro se dissolve lentamente sob o ambiente alcalino e reage com Ca^{2+} para formar C-S-H.

Soares (2021) realizou estudos em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com substituição de cimento por pó de vidro nos mesmos teores deste trabalho, e analisou até a idade de 1 ano. No estudo da autora, todos os traços

apresentaram uma resistência à compressão axial de 150 MPa aos 365 dias, com exceção do teor de 50%. No teor de 20% o incremento de resistência na idade de 365 dias em relação à idade de 91 dias foi de 10,44%.

Patel *et al.* (2019), utilizando pó de vidro em duas classes de granulometria ($\leq 75 \mu\text{m}$ e $\leq 63 \mu\text{m}$), estudaram argamassas com teores de substituição entre 0% e 20%. Os autores observaram melhor desempenho na resistência à compressão axial pelas misturas com vidro de menores tamanhos de partícula em comparação com o material passante pela malha de $75 \mu\text{m}$, e atribuem esse resultado ao efeito fíler do pó de vidro em tamanhos menores de grão. Também colocam que em idades avançadas, misturas com a menor granulometria apresentaram resistência praticamente igual à argamassa de referência. Assim, segundo os autores, a reação pozolânica poderia ocorrer em estágios posteriores, ou seja, com o passar do tempo, em que seu real comportamento pozolânico tornaria mais densa a microestrutura da argamassa.

Para Nwaubani e Poutos (2013), que analisaram misturas de argamassas incorporando resíduos de vidro (finura de até $300 \mu\text{m}$) com substituição parcial do cimento Portland por pó de vidro nos teores de 5%, 20% e 30% e em três idades (3, 7 e 28 dias), houve evidências que com a incorporação de maior quantidade de pó de vidro a resistência à compressão tem tendência a diminuir. Segundo os autores, as reações pozolânicas compensaram esta tendência apenas na idade de 28 dias e com o teor de 5%, pois nesse cenário a mistura com vidro apresentou resistência à compressão 20% maior que a mistura de referência.

Já Matos e Sousa-Coutinho (2012) também não observaram valores superiores à referência aos 28 dias, o que atribuíram ao desenvolvimento lento das hidratações pozolânicas. Os resultados para resistência à compressão de misturas com pó de vidro aos 91 dias foram menores que os obtidos nas misturas de referência, ainda que tenha utilizado pó de vidro com tamanho de partícula em d_{50} de $9 \mu\text{m}$, menor que a maioria observada em outros trabalhos.

Já em relação à comparação entre os efeitos pozolânico e fíler do pó de vidro (Figuras 4.11 b, 4.12 b e 4.13 b), é possível observar que em 7 e 28 dias não há uma relação comparável entre os dois efeitos. Porém, aos 91 dias os comportamentos são comparáveis, pois à medida que se elava os teores de substituição, ambos os efeitos tendem a aumentar também. Avaliando a diferenciação entre EP e EF da cinza da casca de arroz, Noaman, Karim e Islam

(2019) evidenciaram um avanço similar nos dois efeitos (enquanto um efeito aumenta ou diminui, o outro acompanha), porém obtiveram um teor ótimo de 15% de substituição do cimento pela cinza da casca de arroz. Nos teores acima desse (20% e 25%) houve redução em ambos efeitos na avaliação da resistência à compressão axial.

Na análise da resistência à compressão axial do presente trabalho aos 7 dias é possível observar que o maior incremento de resistência por efeito fíler foi de 0,88 MPa em relação à referência (no teor de 20%), já para efeito pozolânico observa-se um maior incremento no teor de 10%, e foi equivalente à 1,55 MPa. Em 28 dias, é possível observar um maior incremento em relação à referência de EF em 20% (2,54 MPa) e EP no teor de 30% (4,73 MPa). Já para 91 dias ambos os efeitos tiveram maior incremento no teor de 50% (1,70 MPa para EF e 5,23 MPa para EP).

Cordeiro *et al.* (2008) avaliaram o incremento de resistência à compressão axial por efeito pozolânico da cinza do bagaço da cana de açúcar em 7, 14 e 28 dias de cura. Os autores evidenciaram EP nos compósitos apenas a partir da idade de 14 dias. Realizaram esta avaliação por meio do estudo comparativo entre misturas contendo a cinza como material pozolânico e quartzo triturado na mesma densidade de empacotamento como fíler não reativo. Após 28 dias de cura, a resistência à compressão axial da argamassa com cinza foi 31% superior à resistência da mistura com quartzo.

Quanto à análise estatística para 7 dias, não houve diferenças significativas entre mesmos teores de substituição de pó de vidro e fíler calcário. E em relação ao traço de referência, apenas o traço VD10 não apresentou diferença significativa. Para 28 dias, em relação à referência, apenas os teores de 10% (tanto de VD, como de FC) não apresentaram diferença significativa. Já na idade de 91 dias, apenas os traços VD10 e VD20 são estatisticamente equivalentes ao traço de referência.

4.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade das argamassas estudadas podem ser observados na Tabela 4.11. Os valores individuais e as análises estatísticas estão apresentadas no Apêndice D deste trabalho.

Tabela 4.11 - Resistência à tração por compressão diametral das argamassas com 28 dias de idade.

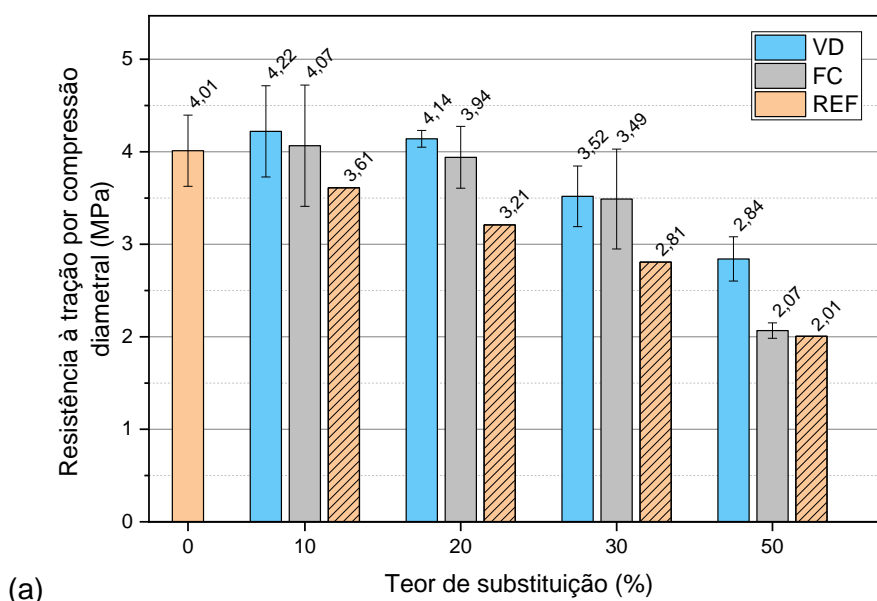
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)				
Traço	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	4,01	0,38	9,58	
VD10	4,22	0,49	11,69	NÃO
VD20	4,14	0,09	2,20	NÃO
VD30	3,52	0,33	9,33	NÃO
VD50	2,84	0,24	8,42	SIM
FC10	4,07	0,66	16,13	NÃO
FC20	3,94	0,33	8,48	NÃO
FC30	3,49	0,54	15,48	NÃO
FC50	2,07	0,08	4,06	SIM

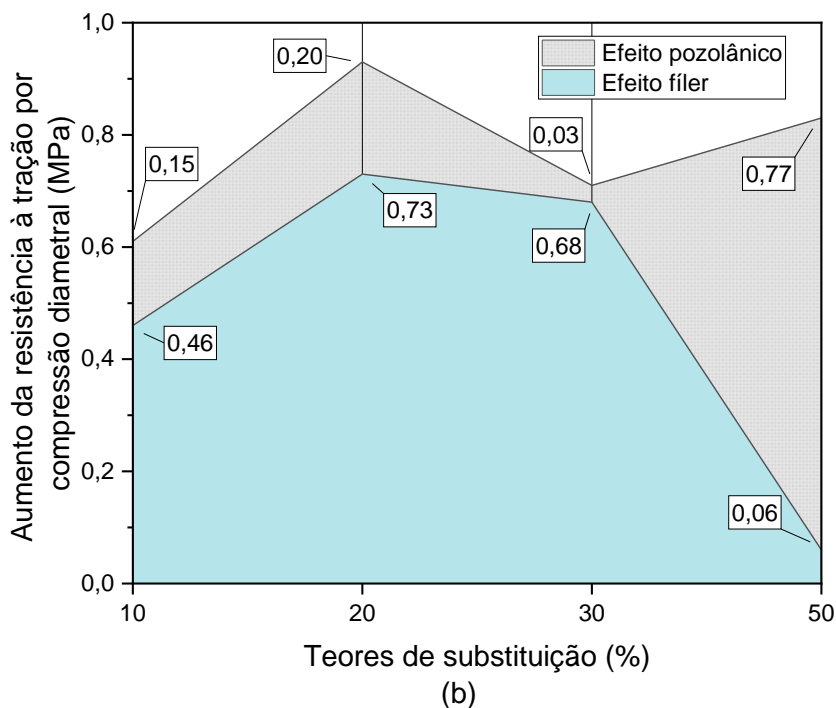
Fonte: Autor

Já na Figura 4.14 é possível comparar os resultados para todos os traços estudados, e também é representada a diferenciação entre os efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro para os diferentes teores frente à tração por compressão diametral.

Assim como na avaliação da resistência à compressão axial, para esta propriedade são apresentadas as resistências das argamassas de referência, com a incorporação de diferentes teores de pó de vidro e fíler calcário. É apresentado também um valor teórico para cada teor sem nenhuma substituição em relação ao cimento, representado pelas barras com a coloração de REF com hachuras, conforme Figura 4.14 (a).

Figura 4.14 - a) Valores experimentais e teóricos para resistência à tração por compressão diametral com VD e FC aos 28 dias. b) Acréscimos de resistência por EP e EF do pó de vidro aos 28 dias.





Fonte: Autor

Para resistência à tração por compressão diametral é possível observar que as maiores resistências entre os traços se referem aos teores de 10% e 20% de substituição com pó de vidro (VD10 e VD20) com 4,22 e 4,14 MPa, respectivamente, sendo tais valores superiores ao encontrado com o traço de referência REF (4,01 MPa), porém por meio da análise estatística é possível observar que os traços VD10, VD20, VD30, FC10, FC20 e FC30 são estatisticamente equivalentes ao traço de referência.

Apenas o maior teor de substituição (50%), tanto para pó de vidro como para fíler calcário, apresentou diferença significativa em relação ao traço de referência. Para VD50 a diferença em relação à REF foi uma diminuição na resistência à tração por compressão diametral de 29,17%, e para FC50 a diminuição em relação à REF foi de 48,38%.

Sharifi *et al.* (2016) também estudaram a resistência à tração por compressão diametral de concretos com teores de substituição (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30%) de cimento por pó de vidro (tamanhos de grão menores que 100 μm). Os autores encontraram na idade de 28 dias, que o teor de 10% apresentou um maior valor de resistência à tração por compressão diametral em relação a todos os outros traços analisados, exibindo um aumento de resistência de 6,62% em relação ao traço de

referência (0%). Nos teores de substituição maiores que 15%, as resistências aferidas pelos autores foram menores que a registrada no traço de referência.

Os autores atribuem essa queda de resistência a partir do teor de 15% ao fato de que a quantidade de micropartículas de pó de vidro existente na mistura passa a ser superior ao teor necessário para combinar com a cal liberada durante o processo de hidratação do cimento. Portanto, isso leva a uma deficiência de resistência, pois substitui parte do material cimentício, mas não contribui para a resistência (SHARIFI *et al.*, 2016).

É possível observar pela análise da Figura 4.14 (b) que os acréscimos de resistência à tração por compressão diametral em relação ao valor teórico ocorrem principalmente por efeito fíler nos traços. A diferença ocorre no teor com 50% de substituição em que é apresentado o efeito pozolânico mais significativo e a influência do EF se mostra bem abaixo que o encontrado pelos outros teores. Enquanto o maior incremento de resistência à tração por compressão diametral por EP foi de 0,77 MPa com 50% de substituição em relação ao cimento, o maior acréscimo de resistência por EF ocorre no teor de 20% com 0,73 MPa.

Outra análise interessante de pontuar é que até o teor de 30% os comportamentos de EP e EF são relativamente similares (maiores e menores aumentos de resistência ocorrem em conjunto entre os dois efeitos, mostrando retas no gráfico que acompanham uma à outra). Porém, no teor de 50% essa concordância não ocorre, mostrando um comportamento distinto em relação ao restante do gráfico.

4.3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Os resultados de módulo de elasticidade estático aos 28 dias de idade das argamassas podem ser observados na Tabela 4.12. Os valores individuais e as análises estatísticas estão apresentadas no Apêndice E deste trabalho.

Tabela 4.12 - Módulo de elasticidade estático aos 28 dias de idade.

Módulo de elasticidade estático				
Traço	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	33,42	0,52	1,56	
VD10	31,99	0,66	2,06	NÃO
VD20	31,41	1,13	3,59	NÃO
VD30	28,27	0,92	3,26	SIM

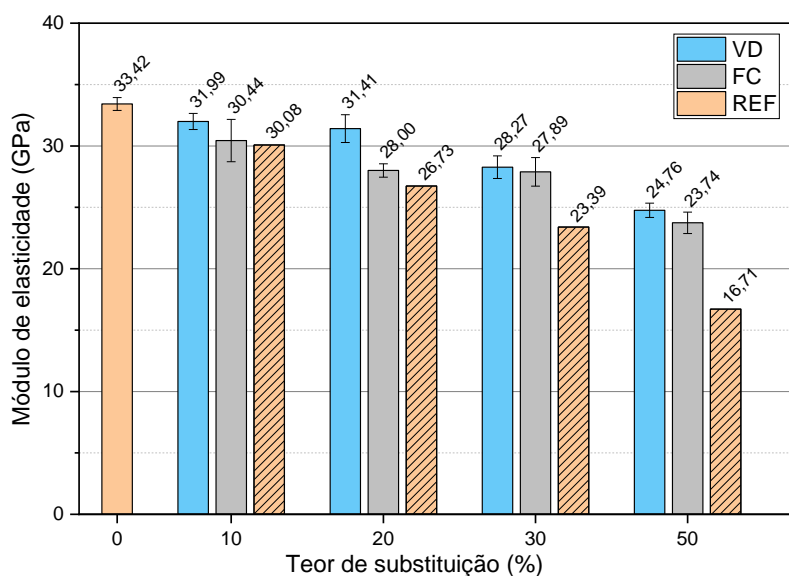
Tabela 4.12 - Módulo de elasticidade estático aos 28 dias de idade (continuação).

Traço	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
VD50	24,76	0,58	2,33	SIM
FC10	30,44	1,72	5,66	SIM
FC20	28,00	0,54	1,93	SIM
FC30	27,89	1,17	4,18	SIM
FC50	23,74	0,87	3,68	SIM

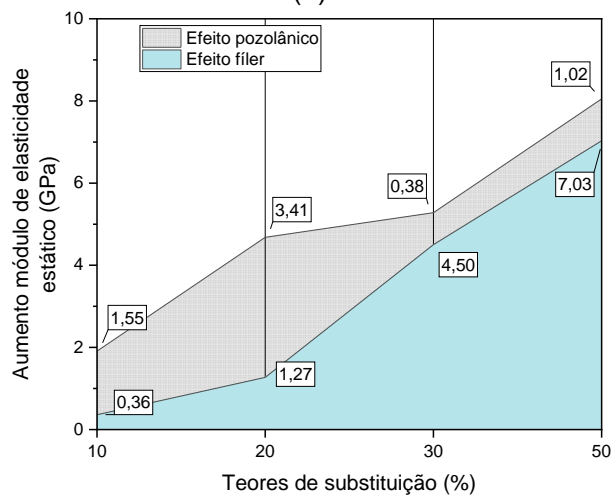
Fonte: Autor

Na Figura 4.15 é possível comparar os resultados para todos os traços estudados, e também é representada a diferenciação entre os efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro para os diferentes teores no estudo para módulo de elasticidade estático.

Figura 4.15 - a) Valores experimentais e teóricos para módulo de elasticidade estático com VD e FC aos 28 dias. b) Acréscimos no módulo de elasticidade por EP e EF do pó de vidro aos 28 dias.



(a)



(b)

Fonte: Autor

Pela análise do gráfico apresentado na Figura 4.15 (a) observa-se um decréscimo do módulo de elasticidade à medida que se aumenta o teor de substituição do cimento. Assim, o maior valor de módulo é encontrado no traço de referência com 33,42 GPa. Porém, por meio da análise estatística, é possível constatar que em relação ao traço de referência não há diferença significativa para os traços VD10 e VD20.

Já para VD30 e VD50, houve diferença significativa em relação ao traço de referência. O módulo de elasticidade estático foi 15,41% menor para VD30 em relação à REF, e no traço VD50 a diminuição foi de 25,91%. Já para os traços com fíler calcário, todos foram estatisticamente diferentes em relação ao REF.

É possível observar pela análise da Figura 4.15 (b) que nos menores teores de substituição (10% e 20%) o aumento do módulo, em relação ao valor teórico, ocorre principalmente devido ao EP do pó de vidro, porém, nos teores de 30% e 50% o efeito fíler se apresenta mais significativo. É interessante observar que enquanto no teor de 10% o EF apresenta um aumento no módulo de 0,36 GPa, em 50% se apresenta com 7,03 GPa, um aumento considerável entre os teores.

He *et al.* (2019) também analisaram o módulo de elasticidade de compósitos cimentícios com diferentes teores de substituição do cimento por pó de vidro (0, 10, 20 e 30%) nas idades de 7, 28 e 91 dias. Até a idade de 28 dias os autores também constataram que a mistura de referência apresentava o maior valor para módulo de elasticidade dentre todos os traços, porém em 91 dias os traços com teores de 10% e 20% de pó de vidro apresentaram módulo equivalentes à mistura de referência. Os autores atribuem esse resultado à menor reação pozolânica do pó de vidro nas primeiras idades, mostrando resultado efetivo apenas depois de um maior tempo de cura.

4.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados obtidos de absorção de água por capilaridade para 28 dias, bem como sua altura de ascensão ao final das 72 horas de ensaio podem ser observados na Tabela 4.13. Os valores individuais e as análises estatísticas estão apresentadas no Apêndice F deste trabalho.

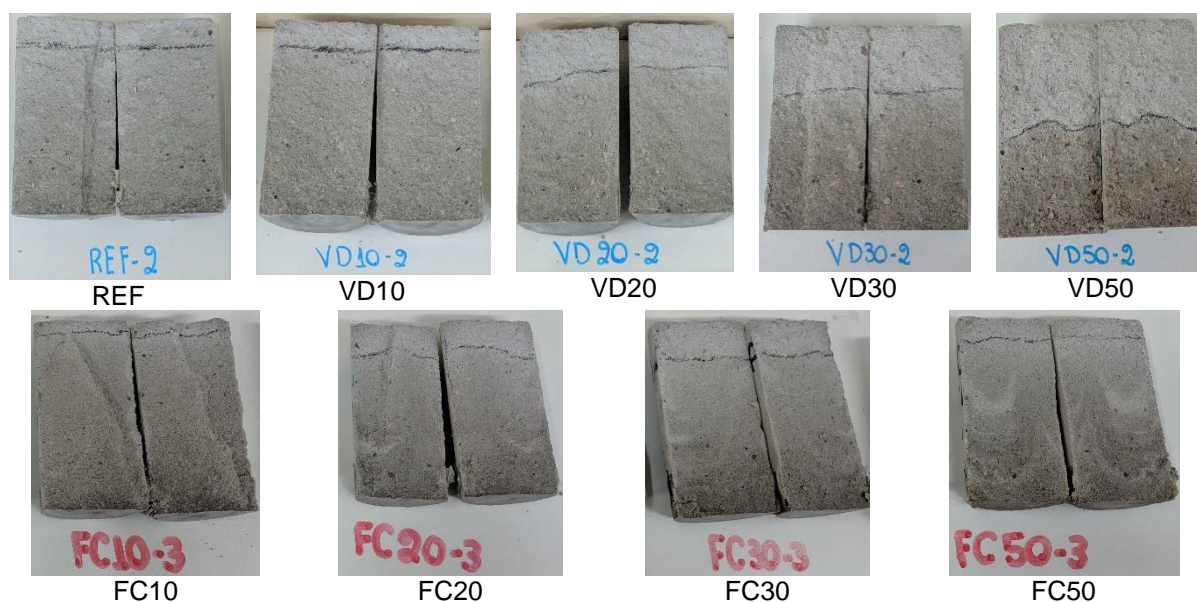
Para aferição da altura de ascensão de água, cada corpo de prova foi submetido a três medições, e os resultados que estão expressos na Tabela 4.13 se referem à média dos CPs em cada traço. O comportamento da ascensão capilar da água em cada traço pode ser observado na Figura 4.16.

Tabela 4.13 - Absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas aos 28 dias e ao final das 72 horas de ensaio.

Absorção de água por capilaridade ao final do ensaio em 72 horas (g/cm ²)					
Traço	Média (g/cm ²)	Desvio Padrão (g/cm ²)	CV (%)	Altura de ascensão (mm)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	1,35	0,08	6,23	85,21	
VD10	1,34	0,12	9,02	83,63	NÃO
VD20	1,30	0,08	6,04	78,48	NÃO
VD30	1,12	0,04	3,39	65,53	NÃO
VD50	0,90	0,07	7,51	46,45	SIM
FC10	1,31	0,14	11,05	92,90	NÃO
FC20	1,12	0,17	15,41	78,52	NÃO
FC30	1,05	0,12	11,12	67,14	SIM
FC50	0,90	0,05	5,03	86,85	SIM

Fonte: Autor

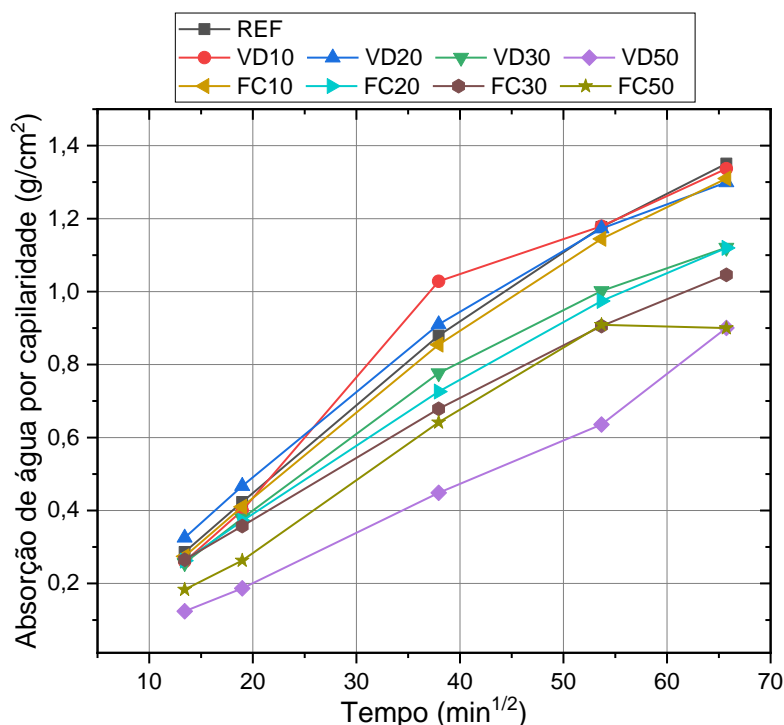
Figura 4.16 - Alturas de ascensão de água das argamassas analisadas.



Fonte: Autor

Na Figura 4.17 é apresentado o gráfico comparando o comportamento dos diferentes traços de argamassas estudadas ao longo do ensaio na idade de 28 dias.

Figura 4.17 - Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias.



Fonte: Autor

Observando a Figura 4.17, fica evidente que em todo o processo os teores com 50% de substituição apresentaram os menores valores de absorção de água. Acima da curva do traço de referência aparecem em alguns pontos apenas os traços VD10 e VD20.

Pela análise estatística, ao final das 72 horas de ensaio, apenas os traços com 50% de substituição (VD50 e FC50), e FC30 apresentaram diferença significativa em relação ao traço de referência. Em VD50 e FC50 as absorções de água foram 33,33% menores que a referência. E a argamassa FC30 apresentou uma absorção de água 28,57% menor que a referência.

Partículas de vidro muito finas preenchem fisicamente os poros capilares, reduzindo a absorção capilar (MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012). Esse comportamento relatado pelas autoras foi observado nesta avaliação de absorção de água por capilaridade nas argamassas, pois à medida se aumentava o teor de substituição de cimento por finos, seja pelo pó de vidro ou fíler calcário, a absorção de água diminuía. É possível observar a redução comparando o traço de referência (0% de substituição) que apresentou uma absorção de 1,35 g/cm² com os maiores teores de substituição, VD50 e FC50, em que ambos apresentaram absorção de água capilar de 0,90 g/cm² (diminuição de 33,33%).

Este comportamento também foi observado por Patel *et al.* (2019) que, como no presente trabalho, avaliaram a absorção de água na idade de 28 dias, porém utilizando pó de vidro em duas classes de granulometria ($\leq 75 \mu\text{m}$ e $\leq 63 \mu\text{m}$). Os autores moldaram argamassas com seis teores de substituição (0, 5, 10, 15, 20 e 25%) de cimento por pó de vidro. O resultado apresentado pelos autores mostra diminuição do valor da porcentagem de absorção de água das amostras de argamassa à medida que se aumenta os teores de pó de vidro em todas as misturas. Além disso, a diminuição foi mais significativa nos traços em que o cimento foi substituído pelo pó de vidro com menores tamanhos de grãos ($\leq 63 \mu\text{m}$).

Sharifi *et al.* (2016) também investigaram a absorção de água em misturas de concretos com teores de substituição de cimento por pó de vidro. Os resultados mostraram que até o teor de 20% do pó de vidro, a absorção de água é menor ou pode ser comparada com a mistura de referência. Os autores colocam que para previsão de vida útil, e comportamento de longo prazo do concreto, o teste de absorção de água deve ser investigado profundamente. Além disso, os autores acreditam que o fenômeno de absorção de água pode ser um dos fatores mais importantes para prever a deterioração do concreto submetido a ciclos de gelo e degelo e à carbonatação.

Um questionamento interessante de se colocar acerca dos resultados do presente trabalho de absorção de água em comparação aos resultados expressos na resistência à compressão axial é que à medida que se aumentou os teores de vidro nos traços, as resistências à compressão diminuíram e a absorção de água também.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), no concreto, a permeação (termo utilizado para descrever o transporte de massa de líquidos induzidos pelas forças capilares) é influenciada pelo volume e pela conectividade dos poros capilares na matriz da pasta de cimento. Assim, nas argamassas do presente trabalho, a incorporação de finos pode ter levado a alterações nos tamanhos, conectividade e tortuosidade dos poros que trouxeram este resultado.

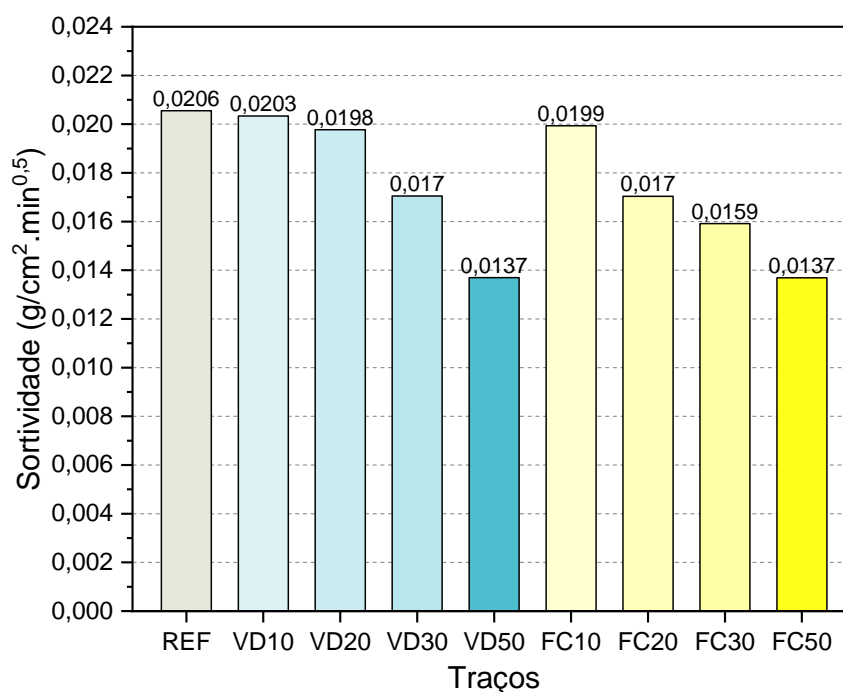
Na literatura, estudos com pó de vidro em que houve investigação da absorção de água e resistência à compressão axial, também apresentam resultados similares para ambas propriedades. Matos e Sousa-Coutinho (2012) observaram ligeira diminuição na sortividade (1,26%) da argamassa com substituição de 10% de pó de vidro em relação à argamassa de referência, enquanto que no mesmo teor de

substituição houve diminuição da resistência à compressão axial em todas as idades analisadas pelas autoras.

Patel *et al.* (2019), mesmo encontrando a diminuição da absorção de água com maiores teores de pó de vidro, por meio da análise da absorção de água por imersão, também encontrou diminuição na resistência à compressão das argamassas à medida que eram acrescidos os teores.

Ainda sobre a absorção de água foi possível obter a sortividade de cada traço na idade de 28 dias, que corresponde ao coeficiente angular da reta. Na Figura 4.18 é apresentado o resultado para sortividade.

Figura 4.18 - Sortividade para os traços na idade de 28 dias.



Fonte: Autor

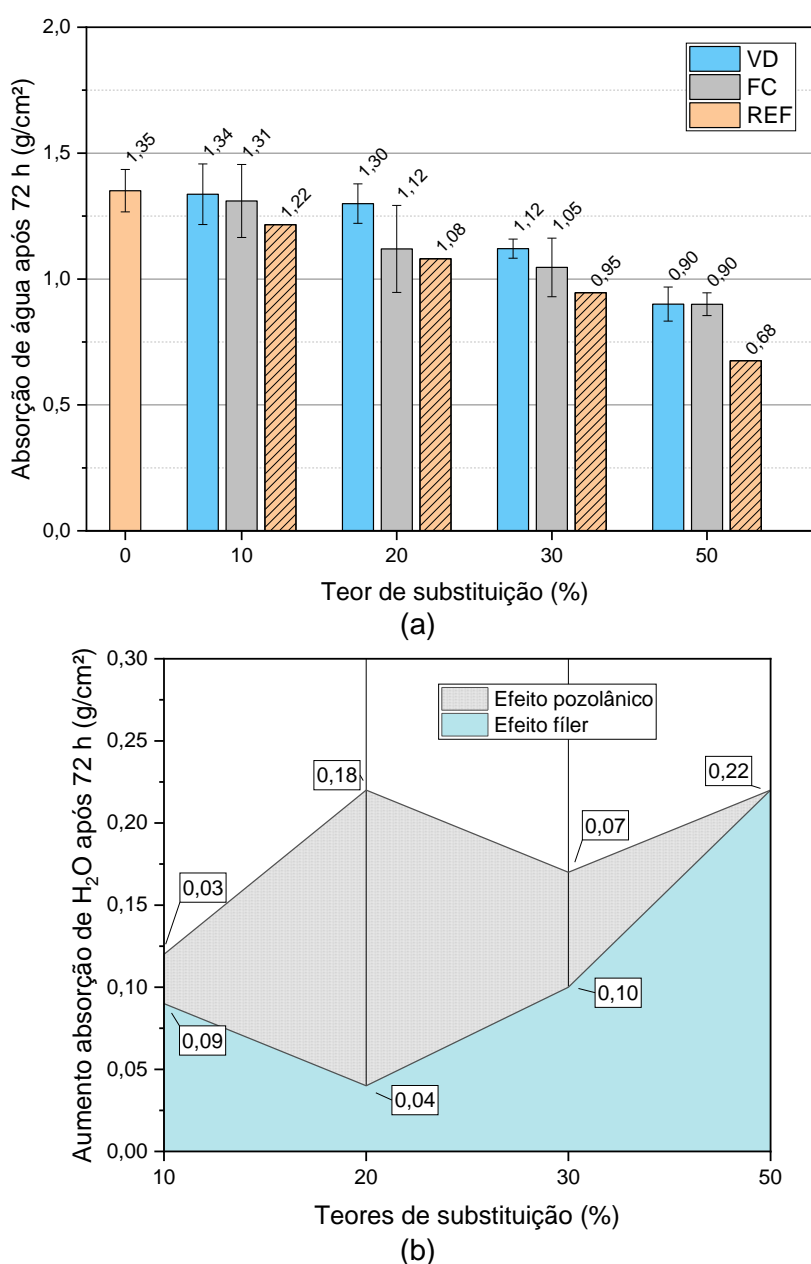
Pela análise da Figura 4.18 é possível observar que todos os traços com teores de substituição apresentaram coeficiente de sortividade inferiores à referência, sendo que as maiores diminuições ocorreram nos traços com 50% de substituição (VD50 E FC50).

Du e Tan (2017) também analisaram a sortividade de concretos com teores de pó de vidro (15, 30, 45 e 60%) em substituição ao cimento. Os autores relatam diminuição significativa entre os traços de referência e com teores de pó de vidro. Enquanto que para o traço de referência a sortividade foi de $4,27 \times 10^{-4} \text{ mm/s}^{0,5}$, no teor de 15% a sortividade diminuiu para 9% deste valor. E esta tendência também é

mantida nos outros teores. Os autores atribuem a diminuição da sortividade com o aumento dos teores de vidro ao acréscimo de finos na mistura, conectividade dos poros na matriz e pela zona de transição interfacial.

A Figura 4.19 apresenta os resultados para todos os traços estudados ao final das 72 h de ensaio, e também é representada a diferenciação entre os efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro para os diferentes teores no estudo da absorção de água por capilaridade.

Figura 4.19 - a) Valores experimentais e teóricos para absorção de água com VD e FC aos 28 dias após 72 h de ensaio. b) Acréscimos na absorção de água por EP e EF do pó de vidro aos 28 dias após 72 h de ensaio.



Fonte: Autor

É possível observar pelo gráfico apresentado na Figura 4.19 (b) que não foi constatada uma similaridade nos comportamentos entre efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro na absorção de água. Enquanto um efeito possui acréscimo de aumento, o outro apresenta decréscimo, e vice-versa. O maior aumento por EP ocorreu no teor de 20% (0,18 g/cm²), e por EF em 50% de substituição (0,22 g/cm²), e nesse último não há alteração de comportamento por reação pozolânica, apenas por efeito fíler.

4.4 ENSAIO REALIZADO EM PASTA: DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Na Figura 4.20 são apresentados os difratogramas das pastas de cimento dos traços REF, VD20, VD50, FC20 e FC50 na idade de 28 dias. A análise dos dados obtidos no ensaio de difração de raios X foi feita com o auxílio do software X'PERT HIGHSCORE 2.1 desenvolvido pela PANalytical B.V.

Figura 4.20 - Difratogramas das pastas de cimento dos traços REF, VD20, VD50, FC20 e FC50 aos 28 dias: P – portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); C – calcita (CaCO_3); B – belita (Ca_2SiO_4); A – alita ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$).

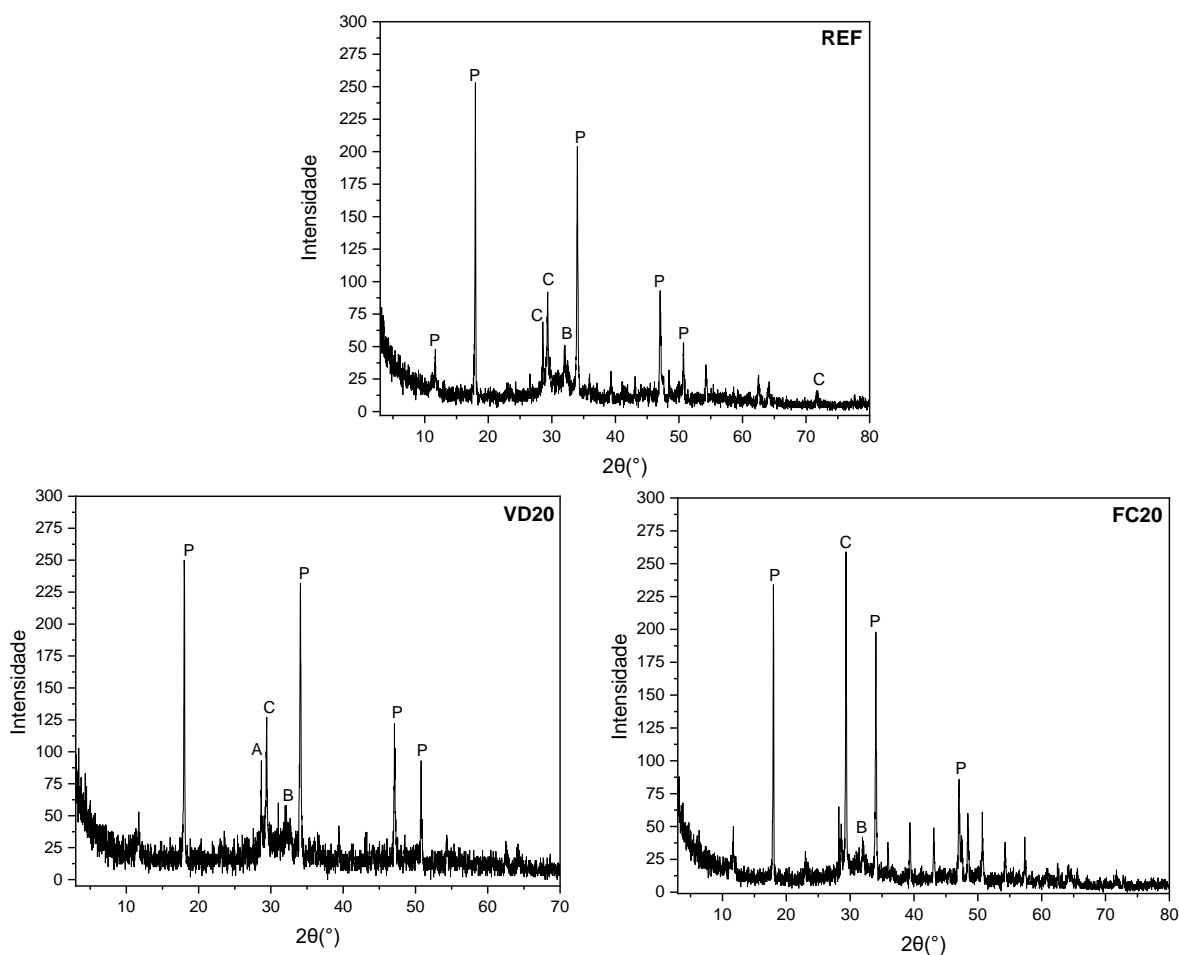
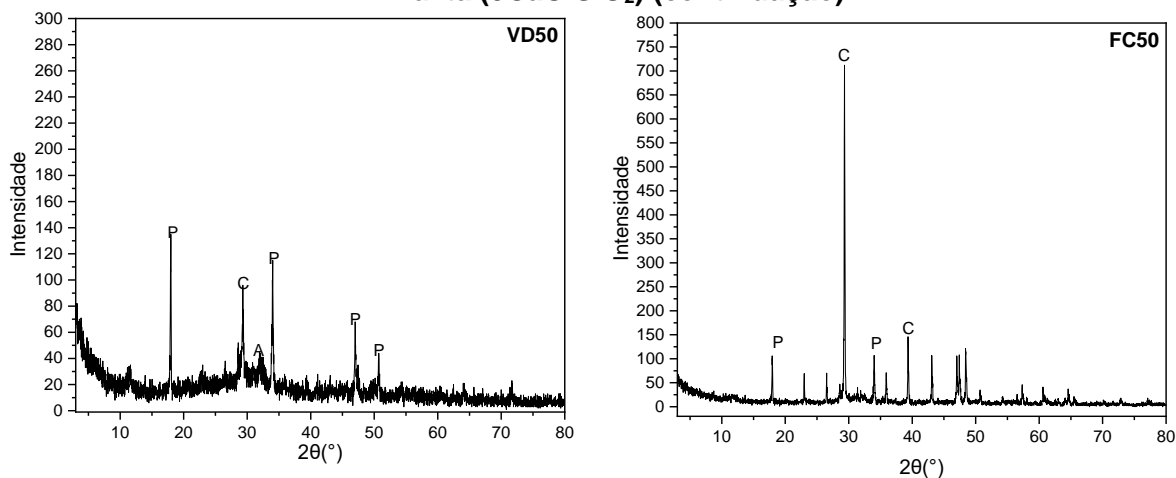


Figura 4.20 - Difratogramas das pastas de cimento dos traços REF, VD20, VD50, FC20 e FC50 aos 28 dias: P – portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); C – calcita (CaCO_3); B – belita (Ca_2SiO_4); A – alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) (continuação).



Fonte: Autor

Pela análise dos difratogramas apresentados na Figura 4.20 é possível observar que na idade de 28 dias há elevados picos cristalinos de portlandita e calcita nas amostras de referência e com substituição de 20% e 50% de cimento por pó de vidro e fíler calcário. Nas amostras das pastas com substituição de cimento por pó de vidro destaca-se a presença de picos de alita e belita, indicando pontos em que não houve hidratação.

É possível observar que os traços de referência e com substituição por vidro finamente moído apresentam maiores picos de portlandita, enquanto que os traços com substituição de cimento por calcário apresentam picos maiores de calcita.

Para os picos de portlandita entre os ângulos de 15° a 20° e 30° a 35° nos traços de REF e VD20 é possível observar uma semelhança nas intensidades. Os picos entre os mesmos ângulos também está presente em VD50, porém com uma intensidade inferior. Já o pico de calcita próximo ao ângulo de 30° é marcante nos traços com fíler calcário, porém é mais intenso no maior teor de substituição (FC50), como era esperado.

Além da análise mineralógica apresentada nos difratogramas, com o auxílio do software foi realizado um mapeamento complementar dos principais picos nas amostras de cada traço e sobre esses picos foram levantados os seguintes dados: posição (2θ), intensidade, FWHM (2θ), distância interplanar (Å) e intensidade relativa (%). Esses dados, referente à cada traço, estão apresentados nas Tabelas 4.14 a 4.18.

Tabela 4.14 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta REF

Posição dos picos ($^{\circ}2\theta$)	Intensidade	FWHM ($^{\circ}2\theta$)	Distância interplanar (Å)	Intensidade Relativa (%)	Identificação*
11,54	13,22	0,63	7,67	5,46	P
17,98	241,89	0,10	4,93	100,00	P
28,62	43,66	0,12	3,12	18,05	C
29,35	75,87	0,14	3,04	31,37	C
32,10	23,34	0,63	2,79	9,65	B
34,02	191,03	0,10	2,64	78,97	P
39,34	10,11	0,47	2,29	4,18	-
47,00	66,43	0,20	1,93	27,46	P
50,70	38,25	0,16	1,80	15,81	P
62,55	13,52	0,31	1,49	5,59	-
64,17	10,24	0,47	1,45	4,23	-
71,74	5,55	0,58	1,31	2,30	C

*Para picos em que houve identificação confiável pelo banco de dados do software

Fonte: Autor

Tabela 4.15 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta VD20

Posição dos picos ($^{\circ}2\theta$)	Intensidade	FWHM ($^{\circ}2\theta$)	Distância interplanar (Å)	Intensidade Relativa (%)	Identificação*
11,62	17,80	0,63	7,62	7,71	-
18,03	230,91	0,12	4,92	100,00	P
28,65	50,38	0,12	3,12	21,82	A
29,42	108,72	0,10	3,04	47,08	C
32,07	34,16	0,24	2,79	14,80	B
34,07	210,29	0,12	2,63	91,07	P
39,41	21,76	0,16	2,29	9,42	-
43,12	13,37	0,24	2,10	5,79	-
44,12	10,40	0,24	2,05	4,50	-
47,09	79,94	0,20	1,93	34,62	P
50,78	82,09	0,07	1,80	35,55	P
62,55	14,31	0,39	1,48	6,20	-
64,14	14,20	0,29	1,45	6,15	-

*Para picos em que houve identificação confiável pelo banco de dados do software

Fonte: Autor

Tabela 4.16 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta VD50

Posição dos picos ($^{\circ}2\theta$)	Intensidade	FWHM ($^{\circ}2\theta$)	Distância interplanar (Å)	Intensidade Relativa (%)	Identificação*
11,60	6,99	0,94	7,63	5,82	-
17,99	120,28	0,12	4,93	100,00	P
29,34	60,37	0,16	3,04	50,19	C
34,02	89,50	0,12	2,64	74,41	A
47,01	50,81	0,16	1,93	42,25	P
50,73	17,81	0,24	1,80	14,80	P
64,14	7,67	0,58	1,45	6,38	-

*Para picos em que houve identificação confiável pelo banco de dados do software

Fonte: Autor

Tabela 4.17 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta FC20

Posição dos picos ($^{\circ}2\theta$)	Intensidade	FWHM ($^{\circ}2\theta$)	Distância interplanar (Å)	Intensidade Relativa (%)	Identificação*
11,68	21,72	0,24	7,58	9,17	-
17,99	216,30	0,10	4,93	91,34	P
23,00	12,70	0,47	3,87	5,36	-
28,22	52,69	0,08	3,16	22,25	-
28,58	35,92	0,16	3,12	15,17	-
29,34	236,81	0,10	3,04	100,00	C
32,03	21,53	0,24	2,79	9,09	B
34,02	190,32	0,10	2,64	80,37	P
35,93	25,11	0,12	2,50	10,60	-
39,32	36,01	0,14	2,29	15,21	-
43,08	34,10	0,24	2,10	14,40	-
47,07	74,07	0,14	1,93	31,28	P
48,42	35,56	0,20	1,88	15,01	-
50,71	42,77	0,16	1,80	18,06	-
54,29	18,45	0,24	1,69	7,79	-
57,33	24,30	0,12	1,61	10,26	-
62,57	8,83	0,24	1,48	3,73	-
71,78	5,76	0,58	1,31	2,43	-

*Para picos em que houve identificação confiável pelo banco de dados do software

Fonte: Autor

Tabela 4.18 - Análise dos principais picos para o difratograma da pasta FC50

Posição dos picos ($^{\circ}2\theta$)	Intensidade	FWHM ($^{\circ}2\theta$)	Distância interplanar (Å)	Intensidade Relativa (%)	Identificação*
11,95	6,38	0,94	7,41	1,01	-
17,97	90,52	0,12	4,94	14,38	P
22,97	47,49	0,08	3,87	7,54	-
26,51	53,00	0,06	3,36	8,42	-
29,33	629,59	0,12	3,05	100,00	C
33,98	72,92	0,08	2,64	11,58	P
35,91	62,05	0,10	2,50	9,86	-
39,35	140,31	0,08	2,29	22,29	C
43,10	86,90	0,08	2,10	13,80	-
47,03	98,70	0,08	1,93	15,68	-
47,43	96,53	0,08	1,92	15,33	-
48,41	115,71	0,08	1,88	18,38	-
50,74	19,15	0,24	1,80	3,04	-
57,38	21,15	0,24	1,61	3,36	-
60,64	19,05	0,24	1,53	3,03	-
64,65	13,90	0,24	1,44	2,21	-
72,79	8,12	0,48	1,30	1,29	-

*Para picos em que houve identificação confiável pelo banco de dados do software

Fonte: Autor

Pela análise dos difratogramas e das tabelas acerca dos principais picos nos traços de pastas analisados, foi possível concluir que aos 28 dias o pó de vidro não desenvolveu a atividade pozolânica, já que nessa análise não foi possível identificar consumo de hidróxido de cálcio (portlandita). Porém faz-se necessário a realização do DRX em idades avançadas (posteriores aos 91 dias), já que é esperado uma atividade pozolânica do pó de vidro em estágios posteriores, conforme observado pela evolução da resistência à compressão das argamassas.

Khmiri, Chaabouni e Samet (2013) realizaram a análise mineralógica pela difração de raios X em pastas contendo 25% de cal (Ca(OH)_2) e 75% de pó de vidro com partículas menores que 20 μm , nas idades de 7, 28, e 91 dias. Os autores verificaram que a intensidade das fases Ca(OH)_2 e CaCO_3 diminuíram com o aumento da idade de cura, já as fases de silicatos de cálcio hidratados e aluminossilicatos hidratados, principais produtos de hidratação, apresentaram-se abundantes aos 91 dias.

Oliveira Júnior (2020) também identificou em seu traço de pasta, com substituição de 50% de cimento por pó de vidro na idade de 28 dias, picos cristalinos de produtos não hidratados do cimento (alita e belita) entre os ângulos de 30° a 35° .

5. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos e análises realizadas no desenvolvimento desse estudo, pode-se concluir que:

- Na avaliação de atividade pozolânica do pó de vidro em três tamanhos máximos de grão, o IAP com cal indicou pozolanicidade apenas para o pó de vidro passante pela malha #325 (45 μm). Já o desempenho com cimento, se comparado com a norma brasileira, não aponta atividade pozolânica para nenhuma granulometria.
- Quanto à composição química, o vidro sodocálcico utilizado neste estudo possui os requisitos para materiais pozolânicos, já que a soma de óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 é superior a 70%. A análise de DRX indicou predominância amorfa do material demonstrando potencial reativo.
- Os resultados obtidos na avaliação da atividade pozolânica indicaram que maiores superfícies de contato garantiram melhores taxas de reação, já que à medida que era diminuída a granulometria do pó de vidro, a atividade pozolânica se tornava mais evidente. A menor granulometria estudada (partículas menores que 45 μm) apresentou atividade pozolânica em todos os métodos realizados, sendo que para o índice de desempenho com cimento Portland, a pozolanicidade foi constatada em conformidade com a norma americana ASTM C 618-05.
- As análises obtidas para argamassas com 20% de substituição de cimento Portland por pó de vidro apresentaram resultados estatisticamente equivalentes às argamassas de referência em todas as propriedades avaliadas, podendo ser considerado, a partir dos resultados deste estudo, como o teor ideal de substituição, já que mantém as características de resistência mecânica e absorção de água, além de proporcionar uma diminuição do consumo de cimento Portland.

- A resistência à compressão axial das argamassas com substituição de teores de cimento por pó de vidro nas três idades avaliadas mostrou ser influenciada pelos efeitos pozolânico e fíler do vidro finamente moído. Na idade de 91 dias houve um aumento do EP e EF à medida que se aumentou o teor de substituição, sendo mais evidente o EP. Assim, no teor de 50% o aumento de resistência à compressão em relação à referência foi de 7,82% para EF e 24,06% para EP, indicando atividade química relativamente mais lenta do pó de vidro como uma pozolana.
- Na resistência à tração por compressão diametral, o maior ganho de resistência em relação ao valor de referência por efeito fíler (aumento de 22,74%) ocorreu no teor de 20%, já para efeito pozolânico foi no teor de 50% com um ganho de resistência à tração por compressão diametral de 38,30%, sendo predominante o EP.
- No módulo de elasticidade, o efeito fíler aumentou com a incorporação de maiores teores de pó de vidro à mistura, apresentando no teor de substituição de 50% um aumento de 42% apenas em relação ao EF. Já por efeito pozolânico, neste mesmo teor, o ganho de módulo de elasticidade em relação ao valor de referência foi de 6,13%. O efeito pozolânico nesta propriedade se destacou no teor de 20% com um ganho em módulo de elasticidade de 13,05% em relação ao valor de referência. Assim, ao contrário do EF, o EP para esta propriedade não aumentou com o aumento do teor de pó de vidro incorporado à argamassa.
- O teor de 50% não apresentou alteração nos valores de absorção de água por capilaridade por efeito pozolânico, apenas por efeito fíler (aumento de 32,35% em relação ao valor de referência), sendo esta propriedade avaliada aos 28 dias.
- Pelo DRX, aos 28 dias, o pó de vidro não desenvolveu a atividade pozolânica, já que pelos difratogramas não foi possível identificar consumo de hidróxido de cálcio nas argamassas com pó de vidro.

Recomenda-se a realização do ensaio em idades mais avançadas (após 91 dias).

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do estudo realizado foram levantadas algumas questões, e com elas algumas sugestões para dar continuidade aos estudos:

- Investigar a atividade pozolânica do pó de vidro pelos testes propostos pela metodologia R3 (testes de reatividade química rápidos, robustos e relevantes), que foram estabelecidos no contexto RILEM TC 267-TRM, enfatizando o teste de calorimetria.
- Aliado aos testes de reatividade pozolânica, é interessante realizar testes que possam avaliar o consumo de hidróxido de cálcio e formação de produtos hidratados (como FTIR, TGA, MEV etc.) em pastas / argamassas de hidróxido de cálcio ou cimento Portland.
- Como foi possível observar uma atividade pozolânica interessante para o vidro finamente moído passante pela malha #325, sugere-se a realização de estudos físicos e mecânicos em compósitos cimentícios com teores do material passante por esta peneira.
- Análise da viabilidade econômica e sustentável da utilização do pó de vidro como material cimentício suplementar: realização de estudos integrados de Avaliação de Ciclo de Vida e Avaliação de Custo de Ciclo de vida como ferramenta de tomada de decisão para reinserção de resíduos como estratégia circular, tendo como estudo de caso o pó de vidro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, R. T. O.; LIMA, N. L. A. Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. **Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida**. s/v. p. 57 – 68, 2014.

AMAR, M. *et al.* Study of the pozzolanic activity of a dredged sediment from Dunkirk harbour. **Powder Technology**, v. 320, p. 748–764, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 618-05**: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Philadelphia, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método Blaine). Rio de Janeiro. 2015.

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

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

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

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

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

_____. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

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

_____. **NBR 7681-2:** Calda de cimento para injeção - Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. 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 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, 2009.

_____. **NM 53: Agregado Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

BARROS, L. M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado.** 2016. 202 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.

BASTOS, G. *et al.* Admixtures in Cement-Matrix Composites for Mechanical Reinforcement, Sustainability, and Smart Features. **Materials**, v. 9, n. 972, p. 1–27, 2016.

BREKAILO, F. *et al.* Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. **Cerâmica**, v. 65, n. 375, p. 351–358, 2019.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18–32, 2009.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (São Paulo).

Vidros. Ficha Técnica Disponível em:

<<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/fichatecnica/id/6/vidro>>. Acesso em: 19 out. 2019.

CORDEIRO, G. C. *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 410–418, 2008.

CORDEIRO, G. C.; SALES, C. P. Pozzolanic activity of elephant grass ash and its influence on the mechanical properties of concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 55, p. 331–336, 2015.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 719–730, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345–379.

DRISCOLL, W. C. Robustness of the ANOVA and Tukey-Kramer statistical tests. **Computers and Industrial Engineering**, v. 31, n. 1–2, p. 265–268, 1996.

DU, H.; TAN, K. H. Properties of high volume glass powder concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 75, p. 22–29, 2017.

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.

FERNANDES, L. F. R. *et al.* **Avaliação da atividade pozolânica por meio da condutividade elétrica**. 1º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos -TECSIC. **Anais...**Campinas: 2017

FERREIRA, G. C. S. *et al.* **Substituição parcial do cimento portland por resíduo de porcelana de isoladores elétricos em matrizes cimentícias**. 3º Encontro Nacional Sobre Reaproveitamento de Resíduos na Construção Civil. **Anais...**São Leopoldo: 2013

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: Uma abordagem epistêmica**. 2010. 105 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

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

GOLDMAN, A.; BENTUR, A. The influence of microfilers on enhancement of concrete strength. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 2, p. 962–972, 1993.

HALL, C. Water sorptivity of mortars and concretes: A review. **Magazine of Concrete Research**, v. 41, n. 147, p. 51–61, 1989.

HE, Z. HAI *et al.* Creep behavior of concrete containing glass powder. **Composites Part B: Engineering**, v. 166, n. July 2018, p. 13–20, 2019.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 298 f. Tese (doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

HOPPE FILHO, J. *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-x (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, 2017.

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.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 19–30, 2004.

JAMIL, M. *et al.* Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 185–198, 2016.

JATURAPITAKKUL, C. *et al.* Filler effect of fine particle sand on the compressive strength of mortar. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 18, n. 2, p. 240–246, 2011.

KHAN, M. N. N. *et al.* Filler Effect of Pozzolanic Materials on the Strength and Microstructure Development of Mortar. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, p. 274–284, 2017.

KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET, B. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 74–80, 2013.

KRSTIC, M.; DAVALOS, J. F. Field Application of Recycled Glass Pozzolan for Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 4, p. 123–132, 2019.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 12, p. 1939–1947, 2003.

LI, X. *et al.* Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 6, 2018.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cem. Concr. Res.**, v. 19, p. 63–68, 1989.

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, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MILLER, R. E. Analysis of Variance. **Chemical Engineering (New York)**, v. 92, n. 6, p. 173–178, 1985.

MORETTI, J. P. **Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias**. 2018. 159 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2018.

NASCIMENTO, L. V. M.; COSTA, E. M. DE L.; DAMAS, L. F. Q. **Estudo da viabilização da reciclagem do vidro em Manaus**. VII Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade. **Anais...**São Paulo: 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NOAMAN, M. A.; KARIM, M. R.; ISLAM, M. N. Comparative study of pozzolanic and filler effect of rice husk ash on the mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete. **Heliyon**, v. 5, n. 6, p. e01926, 2019.

NWAUBANI, S. O.; POUTOS, IK. I. The Influence of Waste Glass Powder Fineness on the Properties of Cement Mortars. **International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAEM)**, v. 2, n. 2, p. 110–116, 2013.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. **Propriedades residuais de compósitos cimentícios de alto desempenho com pó de vidro submetidos a altas temperaturas**. 2020. 168 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2020.

OLIVEIRA, R.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporação de agregados finos de vidro em argamassas Incorporation of fine glass aggregates in renderings. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 21, p. 25–39, 2013.

OLIVEIRA, V. C. H. C. *et al.* Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 167–181, 2014.

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

POURKHORSHIDI, A. R. Tests to evaluate pozzolanic activity in eco-efficient concrete. In: PACHECO-TORGAL, F. *et al.* (Eds.). **Eco-Efficient Concrete**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. v. 1p. 123–137.

RAASK, E.; BHASKAR, M. C. Pozzolanic activity of pulverized fuel ash. **Cement and Concrete Research**, v. 5, n. 4, p. 363–375, 1975.

RAKI, L. *et al.* Cement and concrete nanoscience and nanotechnology. **Materials**, v. 3, n. 2, p. 918–942, 2010.

RAVERDY, M. *et al.* **Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components**. 7th International Congress on the Chemistry of Cement, vol. 3. **Anais...**Paris, France: 1980

SCRIVENER, K. *et al.* Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. November 2017, p. 49–56, 2018.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

SHARIFI, Y. *et al.* Utilization of Waste Glass Micro-particles in Producing Self-Consolidating Concrete Mixtures. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 337–353, 2016.

SHAYAN, A.; XU, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 3, p. 457–468, 2006.

SIAD, H. *et al.* Mechanical, Physical, and Self-Healing Behaviors of Engineered Cementitious Composites with Glass Powder. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 04017016, 2017.

SILVA, M. G. Cimento Portland com adições minerais. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 791–823.

SNELLINGS, R. *et al.* Rapid, Robust, and Relevant (R3) reactivity test for supplementary cementitious materials. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 4, p. 155–162, 2019.

SNIC. **Relatório Anual - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Brasil, 2019.

SOARES, S. M. **Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos**. 2021. 256 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2021.

SOARES, S. M.; FERRERIRA, 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**. 60º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...**Foz do Iguaçu: 2018

VIEITEZ, E. R. *et al.* End-of-Waste Criteria for Glass Cullet: Technical Proposals. Sevilla: The European Commission's science and knowledge service. **EUR - Scientific and Technical Research Reports**; Dez. 2011. No.: JRC68281. ISSN 1831-9424.

ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. C. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 471, n. May, p. 490–495, 2017.

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.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 7 DIAS

Na Tabela A.1 são apresentados os valores de resistência à compressão axial das argamassas estudadas com a idade de 7 dias.

Tabela A.1 – Resistência à compressão das argamassas com 7 dias de idade.

ITEM	CP	Dimensões (mm)		Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
		Diâmetro	Comprimento				
1	REF-1	49,87	98,43	32,78	33,54	0,73	2,19
2	REF-2	50,41	95,74	34,35			
3	REF-3	50,46	98,74	33,07			
4	REF-4	50,22	98,81	33,94			
5	VD10-1	50,19	98,79	31,80	32,01	0,32	0,99
6	VD10-2	50,24	98,80	32,30			
7	VD10-3	50,15	98,68	32,25			
8	VD10-4	50,20	98,64	31,67			
9	VD20-1	50,24	98,64	27,42	28,64	1,59	5,55
10	VD20-2	50,36	98,54	30,71			
11	VD20-3	50,13	98,72	27,37			
12	VD20-4	50,36	98,84	29,07			
13	VD30-1	50,20	98,57	25,78	25,02	1,26	5,02
14	VD30-2	50,28	99,23	25,64			
15	VD30-3	49,93	98,62	25,51			
16	VD30-4	50,25	98,64	23,14			
17	VD50-1	50,28	98,59	17,59	17,18	0,98	5,71
18	VD50-2	50,13	98,51	17,76			
19	VD50-3	50,06	98,44	15,71			
20	VD50-4	50,31	98,68	17,65			
21	FC10-1	50,28	99,27	31,00	30,46	0,95	3,13
22	FC10-2	50,40	99,66	30,64			
23	FC10-3	50,07	99,05	29,06			
24	FC10-4	50,06	99,15	31,13			
25	FC20-1	50,13	99,16	26,52	27,71	0,86	3,09
26	FC20-2	50,20	99,65	28,24			
27	FC20-3	50,03	99,21	28,42			
28	FC20-4	50,26	99,16	27,66			
29	FC30-1	50,28	99,42	23,26	23,77	0,36	1,52
30	FC30-2	50,07	99,00	23,92			
31	FC30-3	50,31	99,13	24,10			
32	FC30-4	50,31	99,19	23,80			
33	FC50-1	50,06	99,32	17,16	17,00	0,14	0,82
34	FC50-2	50,33	99,02	16,89			
35	FC50-3	50,50	99,18	16,87			
36	FC50-4	50,33	99,34	17,06			

Fonte: Autor

Na Tabela A.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial das argamassas na idade de 7 dias.

Tabela A.2 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial das argamassas com 7 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	4	134,14	33,54	0,54
VD10	4	128,02	32,01	0,10
VD20	4	114,57	28,64	2,52
VD30	4	100,07	25,02	1,58
VD50	4	68,71	17,18	0,96
FC10	4	121,83	30,46	0,91
FC20	4	110,84	27,71	0,73
FC30	4	95,08	23,77	0,13
FC50	4	67,98	17,00	0,02

Fonte: Autor

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial das argamassas com 7 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela A.3.

Tabela A.3 - ANOVA para as argamassas com 7 dias de idade

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1149,15	8	143,64	172,40	0,00	2,31
Dentro dos grupos	22,50	27	0,83			
Total	1171,64	35				

Fonte: Autor

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 A.4.

Tabela A.4 - Teste de Tukey para as argamassas com 7 dias de idade.

Traço	REF	VD10	VD20	VD30	VD50	FC10	FC20	FC30	FC50
REF		Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
VD10			Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
VD20				Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
VD30					Sim	Sim	Sim	Não	Sim
VD50						Sim	Sim	Sim	Não
FC10							Sim	Sim	Sim
FC20								Sim	Sim
FC30									Sim

Onde, **Não** = não há diferença significativa; **Sim** = há diferença significativa.

Fonte: Autor

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS

Na Tabela B.1 são apresentados os valores de resistência à compressão axial das argamassas estudadas com a idade de 28 dias.

Tabela B.1 - Resistência à compressão das argamassas com 28 dias de idade

ITEM	CP	Dimensões (mm)		Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
		Diâmetro	Comprimento				
1	REF-1	50,37	98,51	41,07	39,78	1,11	2,79
2	REF-2	50,16	98,32	39,17			
3	REF-3	50,19	98,39	40,28			
4	REF-4	50,37	98,35	38,59			
5	VD10-1	50,33	98,36	35,53	38,57	2,33	6,05
6	VD10-2	50,26	98,37	38,82			
7	VD10-3	50,20	98,37	38,69			
8	VD10-4	50,30	98,57	41,22			
9	VD20-1	50,15	98,35	36,79	36,87	0,79	2,15
10	VD20-2	50,28	98,35	37,88			
11	VD20-3	50,43	98,42	36,88			
12	VD20-4	50,30	98,63	35,94			
13	VD30-1	50,41	98,69	33,54	32,93	0,49	1,50
14	VD30-2	50,21	98,28	32,43			
15	VD30-3	50,30	98,35	33,10			
16	VD30-4	50,28	98,28	32,65			
17	VD50-1	50,10	98,20	22,30	22,21	1,63	7,34
18	VD50-2	50,11	98,24	19,89			
19	VD50-3	50,09	98,76	23,55			
20	VD50-4	50,19	98,38	23,10			
21	FC10-1	50,24	99,16	38,03	38,33	0,28	0,72
22	FC10-2	50,30	99,27	38,44			
23	FC10-3	50,12	99,51	38,65			
24	FC10-4	50,21	99,29	38,18			
25	FC20-1	50,12	99,32	32,91	34,36	1,02	2,97
26	FC20-2	50,30	99,30	34,72			
27	FC20-3	50,29	99,29	34,52			
28	FC20-4	50,31	99,29	35,29			
29	FC30-1	50,18	99,35	27,95	28,20	0,22	0,78
30	FC30-2	50,20	99,38	28,44			
31	FC30-3	50,18	99,31	28,09			
32	FC30-4	50,32	99,29	28,31			
33	FC50-1	50,24	99,17	21,54	21,42	0,51	2,40
34	FC50-2	50,39	99,15	20,70			
35	FC50-3	50,34	99,36	21,92			
36	FC50-4	50,14	99,19	21,52			

Fonte: Autor

Na Tabela B.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial das argamassas na idade de 28 dias.

Tabela B.2 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial das argamassas com 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	4	159,11	39,78	1,23
VD10	4	154,26	38,57	5,45
VD20	4	147,49	36,87	0,63
VD30	4	131,72	32,93	0,24
VD50	4	88,84	22,21	2,66
FC10	4	153,30	38,33	0,08
FC20	4	137,44	34,36	1,04
FC30	4	112,79	28,20	0,05
FC50	4	85,68	21,42	0,26

Fonte: Autor

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial das argamassas com 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela B.3.

Tabela B.3 - ANOVA para as argamassas com 28 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1574,40	8	196,80	152,13	0,00	2,31
Dentro dos grupos	34,93	27	1,29			
Total	1609,33	35				

Fonte: Autor

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 as argamassas com 28 dias de idade.

Traço	REF	VD10	VD20	VD30	VD50	FC10	FC20	FC30	FC50
REF		Não	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
VD10			Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
VD20				Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
VD30					Sim	Sim	Não	Sim	Sim
VD50						Sim	Sim	Sim	Não
FC10							Sim	Sim	Sim
FC20								Sim	Sim
FC30									Sim

Onde, **Não** = não há diferença significativa; **Sim** = há diferença significativa.

Fonte: Autor

APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 91 DIAS

Na Tabela C.1 são apresentados os valores de resistência à compressão axial das argamassas estudadas com a idade de 91 dias.

Tabela C.1 - Resistência à compressão das argamassas com 91 dias de idade.

ITEM	CP	Dimensões (mm)		Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
		Diâmetro	Comprimento				
1	REF-1	50,12	98,99	42,63	43,48	0,75	1,73
2	REF-2	50,13	99,05	43,24			
3	REF-3	50,19	99,15	43,61			
4	REF-4	50,20	99,00	44,43			
5	VD10-1	50,17	99,04	41,10	41,70	0,76	1,83
6	VD10-2	50,24	99,12	42,68			
7	VD10-3	50,10	99,00	41,93			
8	VD10-4	50,18	99,19	41,09			
9	VD20-1	50,36	98,99	40,54	40,29	1,76	4,38
10	VD20-2	50,18	98,97	37,78			
11	VD20-3	50,11	99,02	41,88			
12	VD20-4	50,28	99,14	40,95			
13	VD30-1	50,26	99,12	37,36	36,18	0,93	2,56
14	VD30-2	50,19	99,01	35,27			
15	VD30-3	50,03	99,18	36,43			
16	VD30-4	50,20	98,91	35,64			
17	VD50-1	50,11	99,06	28,34	28,67	1,09	3,80
18	VD50-2	50,34	98,91	30,29			
19	VD50-3	50,22	98,99	28,02			
20	VD50-4	50,24	98,81	28,04			
21	FC10-1	50,27	99,07	41,92	39,60	2,28	5,76
22	FC10-2	50,18	98,90	40,71			
23	FC10-3	50,22	99,23	36,64			
24	FC10-4	50,26	99,01	39,12			
25	FC20-1	50,33	99,05	37,51	36,33	1,57	4,33
26	FC20-2	50,18	98,99	37,50			
27	FC20-3	50,16	98,98	36,11			
28	FC20-4	50,23	99,14	34,19			
29	FC30-1	50,21	99,45	31,05	32,05	1,23	3,85
30	FC30-2	50,28	99,17	33,85			
31	FC30-3	50,21	99,08	31,68			
32	FC30-4	50,17	99,06	31,62			
33	FC50-1	50,12	99,12	24,52	23,44	1,22	5,19
34	FC50-2	50,36	98,87	23,24			
35	FC50-3	50,11	99,09	24,18			
36	FC50-4	50,31	98,97	21,81			

Fonte: Autor

Na Tabela C.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial das argamassas na idade de 28 dias.

Tabela C.2 - Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial das argamassas com 91 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	4	173,91	43,48	0,57
VD10	4	166,80	41,70	0,58
VD20	4	161,15	40,29	3,11
VD30	4	144,70	36,18	0,86
VD50	4	114,69	28,67	1,18
FC10	4	158,39	39,60	5,20
FC20	4	145,32	36,33	2,47
FC30	4	128,21	32,05	1,53
FC50	4	93,75	23,44	1,48

Fonte: Autor

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial das argamassas com 91 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela C.3.

Tabela C.3 - ANOVA para as argamassas com 91 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1385,54	8	173,19	91,81	0,00	2,31
Dentro dos grupos	50,93	27	1,89			
Total	1436,47	35				

Fonte: Autor

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 as argamassas com 91 dias de idade.

Traço	REF	VD10	VD20	VD30	VD50	FC10	FC20	FC30	FC50
REF		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
VD10			Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
VD20				Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
VD30					Sim	Sim	Não	Sim	Sim
VD50						Sim	Sim	Sim	Sim
FC10							Sim	Sim	Sim
FC20								Sim	Sim
FC30									Sim

Onde, **Não** = não há diferença significativa; **Sim** = há diferença significativa.

Fonte: Autor

APÊNDICE D – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS

Na Tabela D.1 são apresentados os valores de resistência à tração por compressão diametral das argamassas estudadas com a idade de 28 dias.

Tabela D.1 - Resistência à tração por compressão diametral das argamassas com 28 dias de idade.

ITEM	CP	Dimensões (mm)		Tração por compressão diametral (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
		Diâmetro	Comprimento				
1	REF-1	50,12	100,97	4,21	4,01	0,38	9,58
2	REF-2	50,26	101,76	3,57			
3	REF-3	50,29	100,97	4,25			
4	VD10-1	50,06	100,45	4,78	4,22	0,49	11,69
5	VD10-2	50,27	100,50	3,86			
6	VD10-3	50,19	100,12	4,01			
7	VD20-1	50,11	101,18	4,22	4,14	0,09	2,20
8	VD20-2	50,21	100,51	4,16			
9	VD20-3	50,31	100,78	4,04			
10	VD30-1	50,01	101,27	3,41	3,52	0,33	9,33
11	VD30-2	50,08	101,29	3,89			
12	VD30-3	50,01	103,57	3,26			
13	VD50-1	50,43	101,25	2,93	2,84	0,24	8,42
14	VD50-2	50,78	101,23	2,57			
15	VD50-3	50,15	101,27	3,02			
16	FC10-1	50,13	101,17	3,47	4,07	0,66	16,13
17	FC10-2	49,94	101,37	3,97			
18	FC10-3	50,08	101,43	4,77			
19	FC20-1	50,13	101,32	4,24	3,94	0,33	8,48
20	FC20-2	50,33	101,52	4,00			
21	FC20-3	50,10	101,33	3,58			
22	FC30-1	50,21	101,61	3,85	3,49	0,54	15,48
23	FC30-2	50,17	101,09	2,87			
24	FC30-3	49,98	101,84	3,74			
25	FC50-1	50,06	101,21	2,03	2,07	0,08	4,06
26	FC50-2	50,37	100,85	2,00			
27	FC50-3	50,21	101,84	2,16			

Fonte: Autor

Na Tabela D.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral das argamassas na idade de 28 dias.

Tabela D.2 - Valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral das argamassas com 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
REF	3	12,03	4,01	0,15
VD10	3	12,66	4,22	0,24
VD20	3	12,42	4,14	0,01

Tabela D.2 - Valores estatísticos descritivos da resistência à tração por compressão diametral das argamassas com 28 dias de idade (continuação).

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa) ²
VD30	3	10,56	3,52	0,11
VD50	3	8,52	2,84	0,06
FC10	3	12,20	4,07	0,43
FC20	3	11,82	3,94	0,11
FC30	3	10,47	3,49	0,29
FC50	3	6,20	2,07	0,01

Fonte: Autor

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

Tabela D.3 – ANOVA da tração por compressão diametral para as argamassas com 28 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	12,36	8	1,55	9,91	0,00	2,51
Dentro dos grupos	2,81	18	0,16			
Total	15,17	26				

Fonte: Autor

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 de tração por compressão diametral para as argamassas com 28 dias de idade.

Traço	REF	VD10	VD20	VD30	VD50	FC10	FC20	FC30	FC50
REF		Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
VD10			Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
VD20				Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
VD30					Não	Não	Não	Não	Sim
VD50						Sim	Não	Não	Não
FC10							Não	Não	Sim
FC20								Não	Sim
FC30									Sim

Onde, **Não** = não há diferença significativa; **Sim** = há diferença significativa.

Fonte: Autor

APÊNDICE E – MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO AOS 28 DIAS

Na Tabela E.1 são apresentados os valores de módulo de elasticidade estático das argamassas estudadas com a idade de 28 dias.

Tabela E.1 – Módulo de elasticidade estático das argamassas com 28 dias de idade.

ITEM	CP	Dimensões (mm)		Tensão em 30% da Ruptura (MPa)	Deslocamento em 30% da Ruptura	Deslocamento em 0,5 Mpa	Módulo de Elasticidade (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)
		Diâmetro	Comprimento							
1	REF-1	50,18	98,83	13,45	0,02	0,00064	33,57	33,42	0,52	1,56
2	REF-2	50,18	98,49	13,45	0,02	0,00021	32,84			
3	REF-3	50,25	98,49	13,42	0,02	0,00082	33,85			
4	VD10-1	50,11	98,62	11,65	0,02	0,00064	32,18	31,99	0,66	2,06
5	VD10-2	50,07	99,07	11,67	0,02	0,00011	31,26			
6	VD10-3	50,21	98,60	11,60	0,02	0,00087	32,54			
7	VD20-1	50,17	98,54	11,11	0,02	0,00173	32,72	31,41	1,13	3,59
8	VD20-2	50,19	98,53	11,11	0,02	0,00071	30,80			
9	VD20-3	50,24	98,56	11,08	0,02	0,00070	30,72			
10	VD30-1	50,10	98,50	9,96	0,02	0,00064	28,97	28,27	0,92	3,26
11	VD30-2	50,18	98,64	9,93	0,02	0,00712	27,23			
12	VD30-3	50,50	98,68	9,80	0,02	0,00159	28,62			
13	VD50-1	50,22	98,49	6,64	0,01	0,00021	24,11	24,76	0,58	2,33
14	VD50-2	50,29	98,50	6,62	0,01	0,00079	25,21			
15	VD50-3	50,17	98,76	6,65	0,01	0,00064	24,96			
16	FC10-1	50,21	98,55	11,50	0,02	0,00203	30,74	30,44	1,72	5,66
17	FC10-2	50,13	98,79	11,54	0,02	0,00070	31,99			
18	FC10-3	50,37	98,78	11,43	0,02	0,00074	28,58			
19	FC20-1	50,31	98,98	10,29	0,02	0,00042	28,02	28,00	0,54	1,93
20	FC20-2	50,31	98,59	10,29	0,02	0,00074	28,54			
21	FC20-3	50,38	98,80	10,26	0,02	0,00009	27,45			
22	FC30-1	50,26	98,48	8,37	0,02	0,00011	26,56	27,89	1,17	4,18
23	FC30-2	50,28	98,62	8,36	0,02	0,00226	28,76			
24	FC30-3	50,15	98,62	8,41	0,02	0,00100	28,33			
25	FC50-1	50,25	98,52	4,96	0,01	0,00021	22,89	23,74	0,87	3,68
26	FC50-2	50,27	98,50	4,95	0,01	0,00092	24,64			
27	FC50-3	50,20	98,51	4,97	0,01	0,00053	23,70			

Fonte: Autor

Na Tabela E.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos de módulo de elasticidade estático das argamassas na idade de 28 dias.

Tabela E.2 - Valores estatísticos descritivos do módulo de elasticidade estático das argamassas com 28 dias de idade.

Grupo	Contagem	Soma (GPa)	Média (GPa)	Variância (GPa) ²
REF	3	100,25	33,42	0,27
VD10	3	95,98	31,99	0,43
VD20	3	94,24	31,41	1,28
VD30	3	84,82	28,27	0,85
VD50	3	74,28	24,76	0,33
FC10	3	91,31	30,44	2,97
FC20	3	84,01	28,00	0,29
FC30	3	83,66	27,89	1,36
FC50	3	71,22	23,74	0,76

Fonte: Autor

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de módulo de elasticidade estático das argamassas com 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela E.3.

Tabela E.3 – ANOVA do módulo de elasticidade estático para as argamassas com 28 dias de idade.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	253,90	8	31,74	33,43	0,00	2,51
Dentro dos grupos	17,09	18	0,95			
Total	270,99	26				

Fonte: Autor

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 de módulo de elasticidade estático para as argamassas com 28 dias de idade.

Traço	REF	VD10	VD20	VD30	VD50	FC10	FC20	FC30	FC50
REF		Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
VD10			Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
VD20				Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
VD30					Sim	Não	Não	Não	Sim
VD50						Sim	Sim	Sim	Não
FC10							Não	Não	Sim
FC20								Não	Sim
FC30									Sim

Onde, **Não** = não há diferença significativa; **Sim** = há diferença significativa.

Fonte: Autor

APÊNDICE F – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE AOS 28 DIAS

Na Tabela F.1 são apresentados os valores de absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas com a idade de 28 dias

Tabela F.1 – Absorção de água por capilaridade das argamassas com 28 dias de idade.

ITEM	CP	Dimensões (mm)		Área (cm ²)	M. seca (Ms) (g)	13/11/2020			13/11/2020			14/11/2020			15/11/2020			16/11/2020		
		Altura	Diâmetro			3h - 13:24	Absorção	Méd	6h - 16:24	Absorção	Méd	24h - 10:24	Absorção	Méd	48h - 10:24	Absorção	Méd	72h - 10:24	Absorção	Méd
						Msat (g)	(g/cm ²)		Msat (g)	(g/cm ²)		Msat (g)	(g/cm ²)		Msat (g)	(g/cm ²)		Msat (g)	(g/cm ²)	
1	REF-1	100,50	50,12	19,73	404,36	410,01	0,29	0,29	412,79	0,43	0,42	422,22	0,91	0,88	428,24	1,21	1,18	431,63	1,38	1,35
2	REF-2	100,94	50,08	19,70	404,69	411,11	0,33		413,94	0,47		423,18	0,94		429,14	1,24		432,56	1,41	
3	REF-3	100,84	50,23	19,82	406,59	411,48	0,25		413,98	0,37		422,32	0,79		427,99	1,08		431,47	1,26	
4	VD10-1	100,45	50,27	19,85	408,77	412,41	0,18	0,26	414,75	0,30	0,40	423,68	0,75	1,03	429,49	1,04	1,18	432,63	1,20	1,34
5	VD10-2	100,23	50,24	19,82	405,62	411,30	0,29		414,24	0,43		432,73	1,37		429,76	1,22		432,84	1,37	
6	VD10-3	100,37	50,22	19,81	405,77	411,91	0,31		414,95	0,46		424,91	0,97		431,04	1,28		434,19	1,43	
7	VD20-1	101,31	50,19	19,78	403,80	410,38	0,33	0,33	413,20	0,48	0,47	421,70	0,90	0,91	426,64	1,15	1,17	428,89	1,27	1,30
8	VD20-2	100,36	50,20	19,79	401,43	407,56	0,31		410,26	0,45		418,60	0,87		423,59	1,12		426,00	1,24	
9	VD20-3	100,77	50,22	19,81	403,21	409,83	0,33		412,72	0,48		422,18	0,96		427,85	1,24		430,72	1,39	
10	VD30-1	101,17	50,15	19,75	401,54	406,29	0,24	0,26	408,62	0,36	0,38	416,09	0,74	0,78	420,59	0,96	1,00	422,81	1,08	1,12
11	VD30-2	101,38	50,18	19,78	403,95	409,39	0,28		411,86	0,40		419,88	0,81		424,26	1,03		426,61	1,15	
12	VD30-3	100,92	50,13	19,74	403,27	408,26	0,25		410,72	0,38		418,80	0,79		423,28	1,01		425,75	1,14	
13	VD50-1	100,56	50,20	19,79	396,84	398,87	0,10	0,12	399,90	0,15	0,19	404,57	0,39	0,45	408,20	0,57	0,64	413,56	0,84	0,90
14	VD50-2	100,75	50,03	19,66	394,14	396,93	0,14		398,30	0,21		403,73	0,49		407,69	0,69		413,32	0,98	
15	VD50-3	100,65	50,26	19,84	395,97	398,50	0,13		399,82	0,19		405,24	0,47		408,75	0,64		413,44	0,88	
16	FC10-1	101,72	50,24	19,82	411,24	417,89	0,34	0,27	420,84	0,48	0,41	430,44	0,97	0,85	436,65	1,28	1,14	439,88	1,44	1,31
17	FC10-2	101,03	50,17	19,77	410,15	414,69	0,23		417,16	0,35		424,84	0,74		429,90	1,00		433,02	1,16	
18	FC10-3	101,05	50,12	19,73	410,64	415,74	0,26		418,36	0,39		427,44	0,85		433,38	1,15		436,85	1,33	
19	FC20-1	101,01	50,09	19,71	404,85	408,06	0,16	0,26	409,45	0,23	0,37	415,16	0,52	0,73	419,86	0,76	0,97	423,04	0,92	1,12
20	FC20-2	101,35	50,08	19,70	407,65	413,99	0,32		416,49	0,45		424,10	0,84		429,29	1,10		432,20	1,25	
21	FC20-3	101,73	50,18	19,78	408,98	414,97	0,30		417,53	0,43		425,18	0,82		429,98	1,06		432,50	1,19	
22	FC30-1	101,13	50,11	19,72	405,52	410,08	0,23	0,26	411,77	0,32	0,36	418,09	0,64	0,68	422,73	0,87	0,91	425,67	1,02	1,05
23	FC30-2	101,07	50,09	19,71	404,63	408,82	0,21		410,43	0,29		416,15	0,58		420,45	0,80		423,23	0,94	
24	FC30-3	101,61	50,18	19,78	408,89	415,83	0,35		418,01	0,46		424,99	0,81		429,48	1,04		432,08	1,17	
25	FC50-1	100,55	49,99	19,63	402,14	405,30	0,16	0,18	406,29	0,21	0,26	414,11	0,61	0,64	418,65	0,84	0,82	420,05	0,91	0,90
26	FC50-2	100,96	50,07	19,69	405,06	409,00	0,20		410,85	0,29		417,95	0,65		420,34	0,78		421,79	0,85	
27	FC50-3	100,90	50,15	19,75	402,62	406,36	0,19		408,21	0,28		415,67	0,66		419,51	0,86		421,14	0,94	

Fonte: Autor

Na Tabela F.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos de absorção de água por capilaridade das argamassas na idade de 28 dias, avaliando a absorção ao final do ensaio em 72 horas.

Tabela F.2- Valores estatísticos descritivos da absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias de idade, após 72 horas de ensaio.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância (g/cm ²) ²	Desv Pad (g/cm ²)	CV (%)
REF	3	4,05	1,35	0,01	0,08	6,23
VD10	3	4,01	1,34	0,01	0,12	9,02
VD20	3	3,90	1,30	0,01	0,08	6,04
VD30	3	3,36	1,12	0,00	0,04	3,39
VD50	3	2,70	0,90	0,00	0,07	7,51
FC10	3	3,93	1,31	0,02	0,14	11,05
FC20	3	3,36	1,12	0,03	0,17	15,41
FC30	3	3,14	1,05	0,01	0,12	11,12
FC50	3	2,70	0,90	0,00	0,05	5,03

Fonte: Autor

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade, decorridas as 72 horas, das argamassas com 28 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela F.3.

Tabela F.3 - ANOVA da absorção de água por capilaridade para as argamassas com 28 dias de idade após 72 horas de ensaio.

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,78	8	0,10	8,78	0,00	2,51
Dentro dos grupos	0,20	18	0,01			
Total	0,98	26				

Fonte: Autor

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 de absorção de água por capilaridade para as argamassas com 28 dias de idade, após 72 horas de ensaio.

Traço	REF	VD10	VD20	VD30	VD50	FC10	FC20	FC30	FC50
REF		Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim	Sim
VD10			Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
VD20				Não	Sim	Não	Não	Não	Sim
VD30					Não	Não	Não	Não	Não
VD50						Sim	Não	Não	Não
FC10							Não	Não	Sim
FC20								Não	Não
FC30									Não

Onde, **Não** = não há diferença significativa; **Sim** = há diferença significativa.

Fonte: Autor