

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

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**  
**REFORÇADOS COM FIBRAS METÁLICAS E INCORPORAÇÃO DE**  
**PÓ DE VIDRO**

**GABRIELA SILVA DIAS**

São Carlos

2022

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

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**  
**REFORÇADOS COM FIBRAS METÁLICAS E INCORPORAÇÃO DE**  
**PÓ DE VIDRO**

**GABRIELA SILVA DIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil

**Área de Concentração:** Construção Civil

**Orientadora:** Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

**Coorientador:** Prof. Dr. Almir Sales

São Carlos

2022



**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 da candidata Gabriela Silva Dias, realizada em 31/08/2022.

**Comissão Julgadora:**

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

Prof. Dr. Carlos Eduardo Marmorato Gomes (UNICAMP)

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

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

A Deus, pelo nascer do dia;  
aos meus avós, que partiram e deixaram saudades;  
à minha mãe, pelo amor;  
à minha irmã Vicência, pelo companheirismo;  
aos amigos Arthur e Maria Danielle, pelo apoio;  
a São Carlos, pelos Ipês;  
ao poder da educação pública.  
E sigo dizendo, mantenha vivo o seu sonho mais bonito.

# Agradecimentos

---

*Que darei eu ao Senhor, por todos os benefícios que me tem feito? (Salmos 116:12)*

Agradeço a Deus, por sua graça e misericórdia. Aos meus amados avós, Cícera e Luiz, que partiram e deixaram saudades. À minha mãe, meu alicerce. À minha irmã, pelo afago e companheirismo. Ao meu padrasto, pelo cuidado. Aos amigos Arthur e Maria Danielle, pelo apoio.

À Profa. Dra. Fernanda Giannotti, pela orientação; pelo ensinamento; por doçura e empatia; por sua calma, que foi a minha calma; pelo seu exemplo de docência, que é o meu exemplo. Ao Prof. Dr. Almir, por sua forma de ensinar, por sua espiritualidade, pela empatia, por sua alegria, que foi a minha alegria.

Aos amigos José Roberto e Arthur Vasconcelos, que foram o meu braço direito, pois sem os dois eu não teria conseguido; então agradeço, sobretudo, pela amizade. A todos os integrantes do Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana (Gesec).

Agradeço ao Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian e ao Ricardo Luiz, que disponibilizaram o Laboratório de Sistemas Estruturais para que realizássemos os ensaios mecânicos. Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), ao Laboratório da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cenem/Lapoc) e ao Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP).

Aos queridos professores Itamar Lorenzo, José Paliari e Sheyla Serra, que nos recepcionaram e acolheram.

Agradeço à Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro, à Profa. Dra. Aline Ramos Barboza e ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Marmorato, membros da banca de qualificação e defesa, pelas valiosas contribuições.

Aos fornecedores GCP *Applied Technologies*, e Elkem e Holcim, pela doação dos aditivos, sílica ativa e cimento, respectivamente.

Aos queridos amigos são carlenses, Carlinhos e Sílvia, pelo auxílio diário.

Aos amigos maceioenses, Arthur Melo, Arthur Brasil, Kamyla Barros, Maria Danielle Leão e Lorena Jucá, por dividirem as descobertas do mestrado durante os momentos de enfrentamento da pandemia.

Aos amigos do grupo #fibertime, da Universidade Federal de Alagoas.

Por fim, ao poder de transformação da educação e saúde públicas.

## Resumo

---

DIAS, Gabriela Silva. **Compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho reforçados com fibras metálicas e incorporação de pó de vidro**. 2022. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

Os compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho reforçados com fibras de aço (CUADRF) vêm sendo difundidos na construção civil em razão de suas propriedades reológicas, mecânicas e de sua durabilidade aprimorada. Porém, o material possui elevado consumo de cimento, que por sua vez emite elevada quantidade de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) em sua cadeia produtiva. Sendo assim, o vidro, que é basicamente composto por sílica amorfa e apresenta beneficiamento relativamente simples para a obtenção do seu pó, exibe potencial de utilização como material pozolânico substituto ao cimento. Portanto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de vidro moído e fibras metálicas nas propriedades mecânicas de CUADRF. Logo, foram desenvolvidos compósitos cimentícios com cimento Portland V ARI, sílica ativa, aditivo superplastificante, areia natural quartzosa com dimensão máxima de 1,2 mm, água (relação água/cimento igual a 0,18), e incorporado pó de vidro com dimensão de 75  $\mu$ m nos teores de 20% e 50% em substituição volumétrica ao cimento, além de fibras de aço com teores de 2% e 3% (em volume). Foram realizados ensaios para a caracterização dos materiais componentes, da resistência à compressão axial, do módulo de elasticidade estático e da resistência à tração mediante ensaio de duplo puncionamento (EDP). Em relação ao estado fresco, os resultados apresentaram que a adição de vidro moído e fibras metálicas não interferiu na trabalhabilidade da mistura, além de ter reduzido o teor de ar incorporado. Quanto à resistência à compressão, aos 28 dias, os compósitos cimentícios atingiram 83,0% da resistência da amostra de referência (REF). Aos 56 e 91 dias, os traços foram estatisticamente equivalentes quando comparados ao REF. Os valores de módulos de elasticidade das amostras atingiram o patamar de 45,0 GPa. Em relação à resistência à tração por EDP, a carga máxima de fissuração aos 28 e 56 dias foi estatisticamente similar ao REF, ou seja, a carga máxima não se mostrou sensível à adição de fibras metálicas. O comportamento *hardening* foi exibido em todos os traços com 3% de incorporação de fibras de aço. Observou-se um acréscimo da tenacidade dos traços com 3% de adição de fibra metálica e 20% de incorporação de pó de vidro aos 56 e 91 dias de idade. Logo, foi possível constatar que 20% e 50% de incorporação de pó de vidro são teores ótimos de substituição ao cimento, e a adição de 2% e 3% de fibras de aço exibiu resultados mecânicos satisfatórios. Por fim, recomenda-se a utilização do teor de 50% de incorporação de pó de vidro em substituição parcial ao cimento por apresentar melhoras nas propriedades mecânicas, bem como pelo alto teor de adição do resíduo, que agrega valor no âmbito da sustentabilidade do compósito.

**Palavras-chave:** Compósito cimentício. Ultra-alto desempenho. Pó de vidro. Fibras metálicas. Propriedades mecânicas.

# Abstract

---

DIAS, Gabriela Silva. **Ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites and incorporation of glass powder**. 2022. 140p. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Federal University of São Carlos, São Carlos, 2022.

Ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composites (UHPFRCC) have been widespread in civil construction due to their rheological, mechanical properties and their improved durability. However, the material has high consumption of cement, which in turn emits a high amount of carbon dioxide ( $CO_2$ ) in its production chain. Thus, the glass, which is basically composed of amorphous silica and has relatively simple processing to obtain its powder, exhibits potential for use as a substitute pozzolanic material to cement. For that reason, this research aimed to evaluate the effect of the incorporation of ground waste glass and steel fibers on the mechanical properties of UHPFRCC. Therefore, cementitious composites were developed with Portland V ARI cement, silica fume, superplasticizer, quartz sand with a maximum dimension of 1.2 mm, water (water/cement ratio equal to 0.18), and incorporated glass powder with a dimension of 75  $\mu\text{m}$  at the contents of 20% and 50% in volumetric replacement to cement, in addition to steel fibers with contents of 2% and 3% (in volume). Tests were performed for the characterization of the component materials, axial compressive strength, static modulus of elasticity and tensile strength by double puncture test (EDP). Regarding the fresh state properties of the concrete, the results showed that the addition of ground waste glass and steel fibers did not interfere in the workability of the mixture, besides having reduced the incorporated air content. As for compressive strength, at 28 days, cementitious composites reached 83.0% of the reference sample strength (REF). At 56 and 91 days, the mix design were statistically equivalent when compared to REF. The modulus of elasticity value of the samples reached the level of 45.0 GPa. Regarding tensile strength by EDP, the maximum cracking load at 28 and 56 days was statistically similar to REF, i.e., the maximum capacity was not sensitive to the addition of steel fibers. There was an increase in the tenacity of the mix design with 3% of addition of steel fiber and 20% of incorporation of glass powder at 56 and 91 days of age. Therefore, it was possible to observe that 20% and 50% of incorporation of glass powder are optimal contents of cement substitution, and the addition of 2% and 3% of steel fibers exhibited satisfactory mechanical results. Finally, it is recommended to use the 50% content of incorporation of glass powder in partial replacement to cement because it presents improvements in mechanical properties, as well as by the high content of addition of the residue, which adds value in the scope of the sustainability of the composite.

**Keywords:** Cementitious composite. Ultra-high performance. Glass powder. Metal fibers. Mechanical properties.

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Objetivos para transformar o mundo.....	2
Figura 2.1 – Tamanho médio das partículas dos componentes do CUADRF.....	5
Figura 2.2 – Influência de fibras de aço nas características e propriedades mecânicas de CCUAD.....	7
Figura 2.3 – Concentração de tensões para CCUAD (esquerda) e CUADRF (direita).....	8
Figura 2.4 – Parâmetros gerais que influenciam a aderência fibra-matriz.....	9
Figura 2.5 – Representação do modelo Hillerborg de fissura fictícia, no qual $\sigma_w(w)$ representa a tensão de fechamento da fissura fictícia; e $f_{t\ comp}$ , a resistência à tração do compósito.....	9
Figuras 2.6 – Comportamento típico de CRF para condições: (a) <i>softening</i> ; (b) <i>hardening</i> .....	10
Figuras 2.7 – EBS: (a) Esquema do EDP; (b) Tensões de tração desenvolvidas com a dupla punção.....	11
Figura 2.8 – Mission Bridge (Canadá): foi realizado um encamisamento de 225 mm de espessura com CUADRF para a adequação da ponte aos requisitos sísmicos.....	15
Figura 2.9 – Kanderviadukt (Suíça): foi aplicada uma camada de 30 mm de CUADRF para proteger a estrutura contra infiltração de água e demais agentes agressivos.....	15
Figuras 2.10 – Elementos arquitetônicos produzidos com CUADRF no Brasil: (a) painel de cobogó da casa Japão (esquerda); (b) painel da fachada do edifício do ERESP (direita).....	16
Figuras 2.11 – Projeto para utilização de CUADRF em casas pré-fabricadas: (a) aplicação do CUADRF para produção das placas (esquerda); (b) unidade habitacional confeccionada pela empresa (direita).....	16
Figura 2.12 – Um cristal (sólido), um sólido amorfo e um vidro na escala de tempo humano e seus destinos finais em uma escala de tempo infinita.....	17
Figura 2.13 – Representação esquemática simplificada do efeito <i>filler</i> .....	19
Figura 2.14 – Efeito da dosagem de pó de vidro no resultado de TGA.....	20
Figuras 2.15 – (a) Passarela. Elemento finalizado no laboratório, antes do envio para o canteiro de obras (esquerda); (b) instalação com a utilização de um guindaste (direita).....	27
Figura 3.1 – Etapas gerais do programa experimental.....	28
Figura 3.2 – Etapas do beneficiamento do vidro.....	29
Figuras 3.3 – (a) Garrafas limpas e dispostas em ambiente seco e arejado. Primeira moagem do material; (b) antes da moagem (esquerda); (c) vidro após a moagem (direita).....	30
Figura 3.4 – Moinho utilizado e o pó de vidro após a segunda moagem.....	30
Figuras 3.5 – (a) Peneirador mecânico (esquerda); (b) pó de vidro passado na #200 (75 $\mu\text{m}$ ) (direita).....	31
Figura 3.6 – Ensaio de caracterização dos materiais.....	31
Figura 3.7 – Procedimento de mistura dos compósitos.....	35
Figuras 3.8 – (a) Argamassadeira utilizada no procedimento de mistura dos materiais; (b), (c) e (d) moldagem dos corpos de prova cilíndricos (50 mmx100 mm).....	35
Figura 3.9 – Moldagem dos exemplares cilíndricos (100x200 mm).....	36
Figura 3.10 – Moldagem dos espécimes prismáticos (40x40x160 mm).....	36
Figuras 3.11 – Armazenamento das amostras (a) após a moldagem (esquerda); (b) durante a cura térmica (direita).....	37
Figura 3.12 – Ensaio de densidade de massa e de teor de ar incorporado.....	38
Figuras 3.13 – Ensaio de resistência à compressão axial: a) retífica dos corpos de prova; b) corpo de prova após ruptura do ensaio de resistência à compressão.....	38
Figura 3.14 – Aparato e corpo de prova durante ensaio de determinação de módulo de elasticidade.....	39
Figura 3.15 – Aparato e corpo de prova durante ensaio de determinação de resistência à tração na flexão.....	39
Figura 3.16 – Discos de aço carbono e placas de madeira;.....	40



Figuras 3.17 – EDP: (a) e (b) – aparato utilizado durante ensaio de duplo puncionamento .....	40
Figura 3.18 – Níveis de deslocamento adotados para a verificação das resistências residuais.....	42
Figura 4.1 – Fibras metálicas – <i>Dramix</i> ® OL 13/20.....	44
Figura 4.2 – Consistência dos compósitos cimentícios.....	45
Figura 4.3 – Consistência dos compósitos cimentícios.....	46
Figura 4.4 – Gráfico com os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.....	48
Figura 4.5 – Comparação dos valores dos resultados de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios entre as idades de 28, 56 e 91 dias.....	50
Figura 4.6 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 28 dias.....	51
Figura 4.7 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 56 dias.....	53
Figura 4.8 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias.....	54
Figura 4.9 – Modo de ruptura do REF aos 56 dias.....	55
Figura 4.10 – Modo de ruptura do PV50-F2 aos 56 dias.....	55
Figura 4.11 – Modo de ruptura do PV50-F3 aos 56 dias.....	55
Figura 4.12 – Padrão de fissuração nos corpos de prova do ensaio de duplo puncionamento.....	59
Figura 4.13 – Comparação dos valores dos resultados de resistência à tração mediante EDP das amostras entre as idades de 28, 56 e 91 dias.....	60
Figura 4.14 – Curvas de carga <i>versus</i> deslocamento vertical do traço PV20-F2 das idades analisadas.....	62
Figura 4.15 – Curvas de carga <i>versus</i> deslocamento vertical do traço PV20-F3 das idades analisadas.....	63
Figura 4.16 – Corpo de prova do traço PV20-F3 aos 91 dias.....	64
Figura 4.17 – Curvas de carga <i>versus</i> deslocamento vertical do traço PV50-F2 das idades analisadas.....	65
Figura 4.18 – Curvas de carga <i>versus</i> deslocamento vertical do traço PV50-F3 das idades analisadas.....	66
Figura 4.19 – Resistências residuais dos traços para as idades analisadas.....	67
Figuras 4.20 – Curvas de energia <i>versus</i> deslocamento vertical do traço (a) PV20-F2 e (b) PV20-F3 para as três idades avaliadas.....	69
Figuras 4.21 – Curvas de energia <i>versus</i> deslocamento vertical do traço (a) PV50-F2 e (b) PV50-F3 das três idades analisadas.....	71
Figura 4.22 – Tenacidade das amostras para as três idades analisadas.....	72

## Lista de Tabelas

---

Tabela 2.1 – Evolução do CUADRF. ....	6
Tabela 2.2 – Compilação de trabalhos recentes utilizando CADRF ou CUADRF. ....	12
Tabela 2.3 – Ensaio TGA – Redução devido ao efeito pozolânico ..... 20	20
Tabela 2.4 – Pesquisas recentes desenvolvidas com a utilização de pó de vidro em compósitos cimentícios de alto desempenho. ....	21
Tabela 2.5 – Compilação de trabalhos com pó de vidro incorporados em compósitos cimentícios. ....	24
Tabela 3.1 – Nomenclatura adotada para os traços estudados. ....	34
Tabela 3.2 – Consumo de cada material constituinte dos compósitos cimentícios estudados em kg/m <sup>3</sup> . ....	34
Tabela 3.3 – Ensaio realizado para caracterização dos compósitos cimentícios. ....	37
Tabela 4.1 – Propriedades do aditivo superplastificante. ....	43
Tabela 4.2 – Propriedades do aditivo redutor de retração. ....	43
Tabela 4.3 – Propriedades da fibra de aço. ....	44
Tabela 4.4 – Traço unitário e índice de consistência dos compósitos cimentícios. ....	45
Tabela 4.5 – Densidade de massa e teor de ar incorporado dos traços. ....	48
Tabela 4.6 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias. ....	49
Tabela 4.7 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial aos 56 dias. ....	49
Tabela 4.8 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial aos 91 dias. ....	50
Tabela 4.9 – Eficiência energética dos compósitos cimentícios aos 28, 56 e 91 dias. ....	56
Tabela 4.10 – Módulos de elasticidade aos 28 dias de idade. ....	57
Tabela 4.11 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias. ....	58
Tabela 4.12 – Resultados do ensaio de duplo puncionamento aos 28 dias - ( <i>Pf</i> ). ....	59
Tabela 4.13 – Resultados do ensaio de duplo puncionamento aos 56 dias - ( <i>Pf</i> ). ....	60
Tabela 4.14 – Resultados do ensaio de duplo puncionamento aos 91 dias - ( <i>Pf</i> ). ....	60
Tabela 4.15 – Resultados médios e coeficiente de variação do traço PV20-F2. ....	62
Tabela 4.16 – Resultados da análise estatística da amostra PV20-F2. ....	62
Tabela 4.17 – Resultados médios e coeficiente de variação do traço PV20-F3. ....	63
Tabela 4.18 – Resultados da análise estatística da amostra PV20-F3. ....	63
Tabela 4.19 – Resultados médios e coeficiente de variação do traço PV50-F2. ....	65
Tabela 4.20 – Resultados da análise estatística da amostra PV50-F2. ....	65
Tabela 4.21 – Resultados médios e coeficiente de variação do traço PV50-F3. ....	66
Tabela 4.22 – Resultados da análise estatística da amostra PV50-F3. ....	66
Tabela 4.23 – Resultados médios de tenacidade e análise estatística dos traços PV20-F2 e PV20-F3. ....	69
Tabela 4.24 – Resultado da análise estatística entre os traços PV20-F2 e PV20-F3. ....	69
Tabela 4.25 – Resultados médios de tenacidade e análise estatística dos traços PV50-F2 e PV50-F3. ....	70
Tabela 4.26 – Resultado da análise estatística entre os traços PV50-F2 e PV50-F3. ....	70
Tabela 4.27 – Resultado da análise estatística entre os traços com o mesmo teor de adição de fibra de aço. ....	71

## Lista de Abreviações e Símbolos

---

#	Malha de peneiras
a/agl	Relação água/aglomerantes
a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	AMERICAN CONCRETE INSTITUTE
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
Anvisa	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCUAD	Compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho
CH	Portlandita, hidróxido de cálcio
CP	Cimento Portland convencional
CP V ARI	Cimento Portland Classe V – Alta resistência inicial
CP-SA	Cimento Portland Classe V + 8% de sílica ativa
CP-SA-VD	Cimento Portland Classe V + 8% de sílica ativa + 50% de pó de vidro
CP-VD	Cimento Portland Classe V + 50% de pó de vidro
CRF	Concreto reforçado com fibras
CUAD	Concreto de ultra alto desempenho
CUADRF	Compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho reforçados com fibras de aço
CV	Coefficiente de variação
d	Diâmetro
d50	Tamanho abaixo do qual se encontram 50% do volume de material
DAfStb	<i>Deutscher Ausschuss für Stahlbeton</i>
DECiv	Departamento de Engenharia Civil
df	Diâmetro da fibra
DRX	Difratometria de raios X
EDP	Ensaio de duplo puncionamento
EDS	Energia dispersiva de raios X
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo
EMIC	Máquina Universal de Ensaio
fck	Resistência característica do concreto à compressão
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios X
Gesec	Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana
H	Altura
IAP	Índice de atividade pozolânica
IFSC/USP	Instituto de Física de São Carlos/Universidade de São Paulo
IFSP	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
lf	Comprimento da fibra
lf/df	Relação comprimento/diâmetro da fibra de aço
LMC	Laboratório de Materiais e Componentes

LMC	Laboratório de Materiais e Componentes
LSR	Líquidos super-resfriados
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma brasileira
NI-QEDS	<i>NanoIndentation and Quantitative Energy-Dispersive Spectroscopy</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial hidrogeniônico
PV20-F2	Traço com 8% de sílica ativa (em massa), 20% de substituição do cimento por vidro moído (em volume) + adição de 2% de fibras de aço (em volume)
PV20-F3	Traço com 8% de sílica ativa (em massa), 20% de substituição do cimento por vidro moído (em volume) + adição de 3% de fibras de aço (em volume)
PV50-F2	Traço com 8% de sílica ativa (em massa), 50% de substituição do cimento por vidro moído (em volume) + adição de 2% de fibras de aço (em volume)
PV50-F3	Traço com 8% de sílica ativa (em massa), 50% de substituição do cimento por vidro moído (em volume) + adição de 3% de fibras de aço (em volume)
RAC	Reação álcali-carbonato
RAS	Reação álcali-sílica
REF	Traço referência com 8% de sílica ativa (em massa), 0% de pó de vidro e adição de 0% de fibras de aço
RR	Redutor de retração
SP	Superplastificante
TG	Termogravimetria
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UHPC	Ultra high performance concrete
UHPCC	Ultra high performance cementitious composite
UNFCCC	Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
$CO_2$	Dióxido de carbono
$C - S - H$	Silicato de cálcio hidratado
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
$CaO$	Óxido de cálcio
$I_{cimento}$	Índice de desempenho com o cimento Portland
$MF$	Módulo de finura
$Na_2O$	Óxido de sódio
$P_f$	Carga de fissuração máxima
$SiO_2$	Dióxido de silício
$f_t$	Resistência à tração por duplo puncionamento
$f_R, \delta p$	Resistência residual

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3 JUSTIFICATIVA	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO (CUADRF)	5
2.1.1 <i>Caracterização do comportamento mecânico do CUADRF</i>	9
2.1.2 <i>Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento</i>	10
2.1.3 <i>Aplicação do CUADRF</i>	14
2.2 A INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	16
2.2.1 <i>Vidros</i>	16
2.2.2 <i>Pó de vidro como material pozolânico</i>	18
2.3 APLICAÇÃO DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM PÓ DE VIDRO	26
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>28</b>
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	29
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	31
3.2.1 <i>Aditivos</i>	32
3.2.2 <i>Fibras de aço</i>	32
3.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	32
3.3.1 <i>Estudos em pasta</i>	32
3.3.2 <i>Definição dos traços</i>	32
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	37
3.4.1 <i>Densidade de massa e teor de ar incorporado</i>	38
3.4.2 <i>Resistência à compressão axial</i>	38
3.4.3 <i>Módulo de elasticidade estático</i>	39
3.4.4 <i>Resistência à tração na flexão</i>	39
3.4.5 <i>Resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento</i>	39
3.4.6 <i>Análise estatística dos resultados</i>	42
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>43</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	43
4.1.1 <i>Cimento, sílica ativa, pó de vidro, agregado miúdo</i>	43
4.1.2 <i>Aditivos</i>	43
4.1.3 <i>Fibras metálicas</i>	44
4.2 ESTUDOS EM PASTA	44
4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS	45

4.4	ESTUDO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.....	48
4.4.1	<i>Densidade de massa e teor de ar incorporado</i> .....	48
4.4.2	<i>Resistência à compressão axial</i> .....	49
4.4.3	<i>Módulo de elasticidade estático</i> .....	57
4.4.4	<i>Resistência à tração na flexão</i> .....	58
4.4.5	<i>Resistência à tração por duplo puncionamento</i> .....	59
5.	<b>CONCLUSÃO</b> .....	73
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	76
	<b>APÊNDICE A</b> .....	85
	<b>APÊNDICE B</b> .....	88
	<b>APÊNDICE C</b> .....	102
	<b>APÊNDICE D</b> .....	107
	<b>APÊNDICE E</b> .....	108
	<b>APÊNDICE F</b> .....	109

# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho (CCUAD) reforçados com fibras de aço (CUADRF) apresentam excelentes propriedades reológicas e mecânicas, bem como durabilidade aprimorada diante de ambientes agressivos. A matriz densa do compósito, quando reforçada com fibras metálicas, passa a exibir um comportamento pseudodúctil, alta resistência à tração e à flexão (ABBAS; SOLIMAN; NEHDI, 2015; LE HOANG; FEHLING, 2017; ZHANG *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2020).

Devido ao seu desempenho, o CCUAD tem sido difundido e empregado com sucesso em diversas aplicações: elementos pré-moldados, obras de infraestrutura urbana, *retrofit* e, sobretudo, em obras de reabilitação e recuperação. O material possibilita o dimensionamento de estruturas mais esbeltas e, conseqüentemente, mais leves, além de propiciar baixo custo de manutenção e maior vida útil (AZMEE; SHAFIQ, 2018).

Contudo, o alto custo dessa tecnologia, em razão do valor da fibra metálica, do superplastificante e da cura térmica, além do elevado consumo de cimento Portland em sua composição, inviabiliza a aplicação do material econômica e ambientalmente. Portanto, o emprego de aglomerantes alternativos ao cimento é de grande relevância a fim de mitigar o impacto ambiental e o custo final do compósito (TAGNIT-HAMOU *et al.*, 2015; TAGNIT-HAMOU; SOLIMAN; OMRAN, 2016, LEE *et al.*, 2018; JIANG *et al.*, 2019)

No contexto da construção civil, o interesse por materiais alternativos é uma demanda prioritária no âmbito da sustentabilidade, tendo em vista a necessidade de mitigação do uso de recursos naturais, a redução na emissão de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e a economia de energia elétrica e térmica, em virtude dos impactos ambientais desencadeados pela cadeia produtiva do setor, que consome massivamente compósitos à base de cimento (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Nesse cenário, o pó de vidro desponta como um material alternativo ao uso do cimento, uma vez que o vidro é um material formado basicamente por sílica amorfa e, quando finamente moído, apresenta propriedades de materiais pozolânicos, que, em presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades ligantes (TAGNIT-HAMOU *et al.*, 2015; TAGNIT-HAMOU; SOLIMAN; OMRAN, 2016; LEE *et al.*, 2018; JIANG *et al.*, 2019).

O CUADRF, com adição de pó de vidro, é um novo tipo de concreto e constitui uma inovação em sustentabilidade. As novas tecnologias inovadoras ganham impulso quando alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), adotados em 2015.

Os ODS têm o propósito de melhorar a sustentabilidade mundial com meta de implementação até 2030. Ademais, pode-se citar o Acordo de Paris – deliberado em 2015, na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), e ratificado pelo Brasil em 2016 –, cujo objetivo é limitar o aumento das temperaturas neste século a menos de 2°C.

Portanto, o aperfeiçoamento da tecnologia do CUADRF com adição de pó de vidro, mediante a mitigação do consumo dos materiais, a potencialização da durabilidade e, conseqüentemente, sua aplicação em obras para diversos fins, são iniciativas que estão alinhadas com o compromisso estipulado no Acordo de Paris e com três ODS. São elas: indústria, inovação e infraestrutura; consumo e produção responsáveis; e ação contra a mudança global do clima. Os ODS contemplados nesta pesquisa estão apresentados na Figura 1.1.

**Figura 1.1 – Objetivos para transformar o mundo.**



Fonte: Nações Unidas (2022)

Todavia, ainda que a utilização de pó de vidro em compósitos cimentícios apresente potenciais benefícios ambientais, é necessário avaliar seu comportamento em matrizes cimentícias tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Sendo assim, a presente pesquisa busca investigar as características mineralógicas e microestruturais, bem como as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias de ultra-alto desempenho com adição de fibras metálicas e pó de vidro em substituição parcial ao cimento.



## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento mecânico de compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho (CCUAD) com a incorporação de fibras metálicas e de pó de vidro (em substituição parcial ao cimento).

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar o teor ideal de fibra metálica e pó de vidro a ser utilizado nos CCUAD.
- Analisar o efeito da incorporação de fibras e pó de vidro nas propriedades dos compósitos no estado fresco.
- Avaliar as propriedades mecânicas: resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por duplo punção dos CCUAD com a inclusão de fibras metálicas e pó de vidro.
- Analisar as propriedades mecânicas de compósitos com e sem a incorporação de pó de vidro.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Em 2016, o Brasil foi o sexto maior produtor e o oitavo maior consumidor de cimento no mundo (ROADMAP, 2019). Em 2020, um ano atípico devido à pandemia de Covid-19, o setor da indústria cimenteira no Brasil atingiu o patamar de 60,8 milhões de toneladas do produto vendidas, um aumento de 10,9% em relação a 2019 (ABCP, 2021).

Em 2021, o setor vendeu 64,7 milhões de toneladas do insumo, alcançando um crescimento de 6,5% em relação ao ano anterior. Para o primeiro semestre de 2022, as vendas de cimento seguem em tendência de retração, visto o contexto geopolítico local e externo. Entre janeiro e maio, a redução foi de 3,5%; em termos nominais, foram comercializados 5,5 milhões de toneladas de cimento (SNIC, 2022).

Portanto, apesar de ser uma atividade de forte impacto na economia do país, o processo produtivo do cimento é intensivo na emissão de gases de efeito estufa. A indústria cimenteira responde, globalmente, por cerca de 7,0% de todo o gás carbônico de origem antrópica (ROADMAP, 2019). Em 2017, o Brasil emitiu 22,4 milhões de toneladas de  $CO_2$  na produção de cimento cinza e branco (GCCA, 2019).

Em relação ao vidro, a Portaria nº 27/96, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), estipula que todo caco de embalagem de vidro para alimentos pode ser reciclado para a fabricação de novas embalagens sem nenhuma restrição. A utilização de cacos para

a produção de novos vidros acarreta melhoria na produção, além da redução de emissão de  $CO_2$ , visto que a cada 6,0 toneladas de vidros reciclados deixa-se de emitir 1,0 tonelada de  $CO_2$ , o que corresponde a um crédito de carbono acumulado pelo conceito de Crédito de Carbono do Protocolo de Quioto. Entretanto, o Brasil produz 1,3 milhão de toneladas de embalagens de vidro por ano, e apenas 40-45% da matéria-prima advêm da reciclagem na forma de cacos (ABRABE, 2020; CEMPRE, 2020; ABIVIDRO, 2022).

Logo, a indústria não consegue absorver toda a demanda de reciclagem do resíduo que ela produz e a coleta seletiva alcança apenas 38,7% dos municípios brasileiros (SNIS, 2019). Portanto, apesar da produção de cimento ser, significativamente, maior que a de vidro, torna-se relevante a implementação de alternativas para a reciclagem do vidro pós-consumo, sobretudo como material suplementar ao cimento.

Como medida de mitigação do uso do cimento, conjuntamente com a reciclagem do vidro pós-consumo, muitas pesquisas foram e estão sendo realizadas com a incorporação de pó de vidro em matrizes cimentícias em diferentes partes do mundo (KOU; XING, 2012; KAMALI; GHAREMANINEZHAD, 2015; BARROS, 2016; TAGNIT-HAMOU; SOLIMAN; OMRAN, 2016; FREITAS, 2019; WILSON *et al.*, 2019; MEHTA; ASHISH, 2020; MOSTOFINEJAD *et al.*, 2020; OLIVEIRA FILHO, 2020; SOARES, 2021).

Porém, poucos estudos abordam o pó de vidro em conjunto com a incorporação de fibras metálicas em CCUAD. Dessa forma, é necessário o aperfeiçoamento do conhecimento acerca das características no estado fresco e endurecido do material a fim de propiciar sua utilização em estruturas de concreto armado. Diante dessa lacuna, justifica-se o desenvolvimento do estudo desta pesquisa.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, dispostos conforme a descrição a seguir. No primeiro capítulo, é apresentada a introdução, que aborda o panorama geral da utilização e desafios do CCUAD, bem como os objetivos e justificativas para o desenvolvimento da pesquisa. No segundo, encontra-se a revisão bibliográfica, que discute sobre o CUADRF e o emprego do pó de vidro como material cimentício suplementar. No terceiro, apresenta-se detalhadamente o programa experimental, sendo descritos os materiais, os métodos de ensaios e as normativas adotadas. No quarto, os resultados obtidos são retratados, bem como a discussão pertinente. Por fim, o quinto capítulo, discorre-se sobre a conclusão e as propostas para trabalhos futuros relacionados ao tema. Por fim, apresenta-se toda a bibliografia utilizada neste trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos e aspectos relevantes sobre os compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho (CCUAD) com a incorporação de fibras metálicas (CUADRF) e pó de vidro. Inicialmente, são comentadas as características fundamentais dos CUADRF, o desempenho das fibras e as principais aplicações do material. Em seguida, descrevem-se as particularidades acerca da adição do pó de vidro. Por fim, são descritos e analisados alguns trabalhos experimentais relativos ao tema proposto.

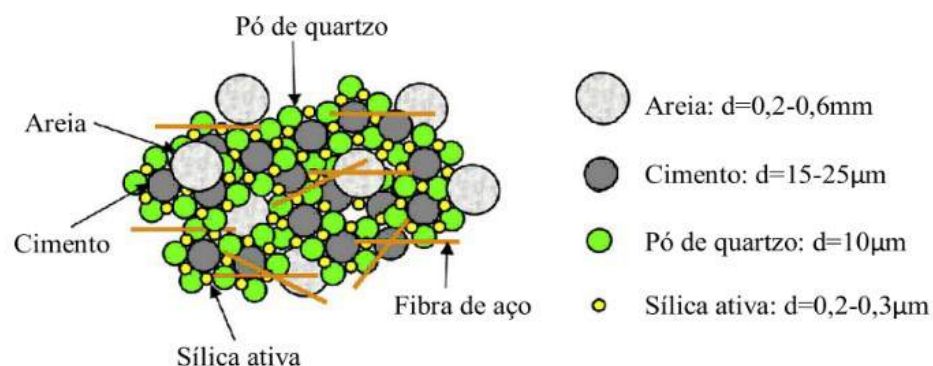
### 2.1 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO (CUADRF)

O CUADRF é caracterizado como um compósito com propriedades aprimoradas, ou seja, alta ductibilidade, baixa permeabilidade, resistência à compressão e tenacidade elevadas. A composição do material é tipicamente caracterizada pelo alto consumo de cimento, acima de  $600 \text{ kg/m}^3$ ; pela baixa relação água/cimento ( $a/c$ ), agregado com diâmetro máximo de  $0,6 \text{ mm}$ , além da incorporação de adições minerais – sílica ativa, cinza volante, pó de quartzo e escória de alto-forno; e pela utilização de aditivos químicos (DE LARRARD; SEDRAN, 2002; ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011; AL-OSTA, 2018).

Além dos materiais citados, a inclusão de fibras distribuídas randomicamente na matriz pode melhorar significativamente a resistência à tração e a tenacidade do compósito (ABBAS; SOLIMAN; NEHDI, 2015; WU *et al.*, 2016; BUTTIGNOL; SOUSA; BITTENCOURT, 2017).

A Figura 2.1 ilustra os materiais e tamanhos médios dos componentes da matriz.

Figura 2.1 – Tamanho médio das partículas dos componentes do CUADRF.



Fonte: Adaptado e traduzido de YOO *et al.* (2015)

O CUADRF alcança resistência à compressão, à tração e à flexão da ordem de  $150 \text{ MPa}$ ,  $8 \text{ MPa}$  e  $30 \text{ MPa}$ , respectivamente. Além da melhoria nas propriedades mecânicas,

a introdução de fibras auxilia na redução do volume de vazios, promovendo uma matriz densa que, aliada ao aumento da capacidade de mitigação do processo de formação de fissuras, torna-se benéfica contra a penetração de agentes agressivos (ABBAS; SOLIMAN; NEHDI, 2015; AL-OSTA, 2018; ZHU *et al.*, 2020). A Tabela 2.1 exibe o progresso do compósito nas últimas décadas.

**Tabela 2.1 – Evolução do CUADRF.**

<b>Ano</b>	<b>Considerações sobre o compósito</b>	<b>Considerações sobre a fibra</b>
1970	Ampliação de entendimento sobre as reações de hidratação, retração, fissuração e porosidade	Fibras de aço (lisas)
	Utilização de aditivos químicos (plastificantes)	Fibras de vidro
	Desenvolvimento das técnicas de cura do compósito	Alguns tipos de fibras sintéticas
1980	Avanço na tecnologia dos aditivos de alto desempenho	Aço de resistência elevada
	Adição de pozolonas: cinza volante, sílica ativa, entre outras	Fibras de aço deformadas
	Redução da relação (a/c), aumento da fluidez	Fomento na utilização de fibra de vidro
	Estabelecimento da terminologia: concreto de alta resistência (CAR) para $f_{ck} > 60\text{MPa}$ , e, em caso de utilização de agregados especiais e cura, o $f_{ck} > 120\text{MPa}$  Concreto de ultra-alto desempenho: CAR apresentando durabilidade elevada	Utilização de fibras de alta performance: kevlar e carbono
1990	Evolução de aditivos químicos de alto desempenho (superplastificante, modificador de viscosidade)	Fabricação de novas geometrias para as fibras, de modo a dificultar o arrancamento ( <i>pull-out</i> )
	Caracterização do CUAD: densidade elevada, partículas finas, baixa porosidade e relação a/c	Fibras de PVA e análise da performance de fibras sintéticas
2000	Evolução e aperfeiçoamento das propriedades físicas e mecânicas dos CUADRF	Fibras de ultra-alta resistência: lisas ou corrugadas
	Avanço na aplicação e entendimento da alta densidade da matriz por meio dos conceitos da nanotecnologia	Nanotubos de carbono e nanofibras de carbono
2010	Utilização da nanoescala para ampliação do entendimento da matriz cimentícia	Nanofibras de carbono, grafeno

Fonte: Adaptado e traduzido de Naaman; Wille (2012)

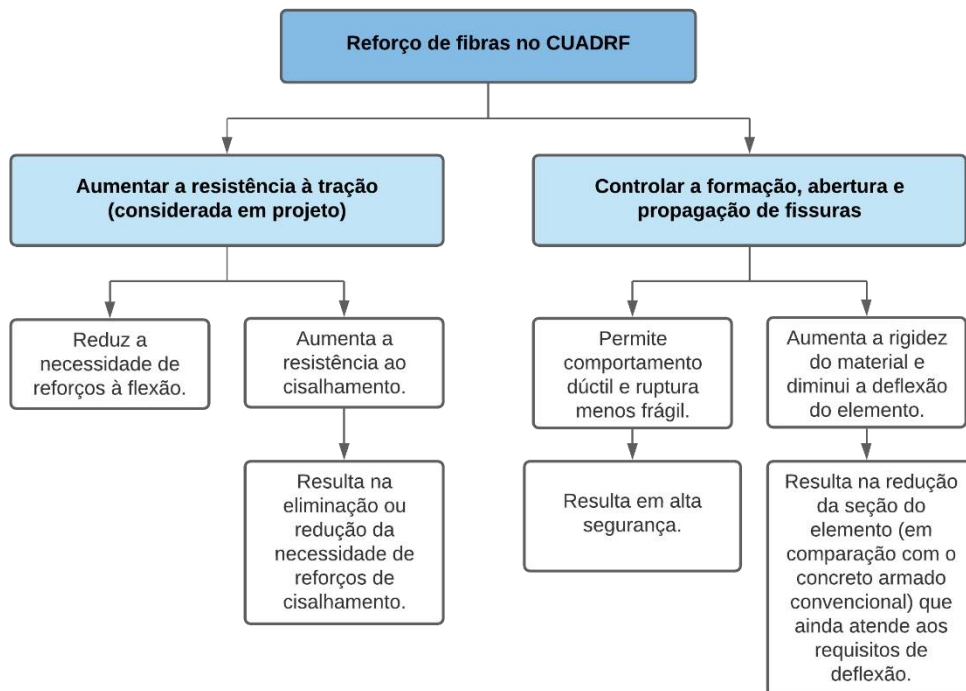
As fibras são elementos descontínuos que apresentam comprimento expressivamente maior que a maior dimensão da seção transversal, e podem ser divididas segundo seu material de origem: metais, cerâmicos e poliméricos sintéticos ou naturais (FIGUEIREDO, 2011).

No Brasil, as fibras de aço destinadas ao reforço de matrizes cimentícias são normatizadas pela NBR 15530 (ABNT, 2019). A norma especifica símbolos; classificações e códigos; dimensões, massas e variações permitidas; métodos de inspeção; embalagem; entrega e estocagem de fibras de aço para concreto.

As fibras de aço possuem alta resistência à tração, coeficiente de dilatação térmica igual ao do concreto e módulo de elasticidade, no mínimo, cinco vezes maior que o do concreto, de acordo com a NBR 15530 (ABNT, 2019). Logo, as fibras metálicas são adequadas para o reforço de compósitos cimentícios, e diversos estudos apontam grande vantagem na aplicação de fibras de aço reduzindo ou substituindo as barras do reforço estrutural convencional (BAQERSAD *et al.*, 2017; ALBERTI; ENFEDAQUE; GÁLVEZ, 2018; ZHANG; SHAO; ZHU, 2020; ZHU *et al.*, 2020).

Mediante a análise de 95 vigas e lajes, Zhu *et al.* (2020) apresentaram que o CUADRF poderia ser utilizado para aumentar a resistência à flexão em vigas ou lajes de concreto armado, visto que as evidências experimentais demonstraram que o aumento da resistência à flexão variou entre 0% e 400%. Ressalta-se que a aplicabilidade mais significativa do compósito foi alcançada por vigas reforçadas com o material na região de maior solicitação de tração. A Figura 2.2 apresenta de forma sistemática a influência do reforço com fibras metálicas nas propriedades e características mecânicas do CUADRF.

**Figura 2.2 – Influência de fibras de aço nas características e propriedades mecânicas de CCUAD.**



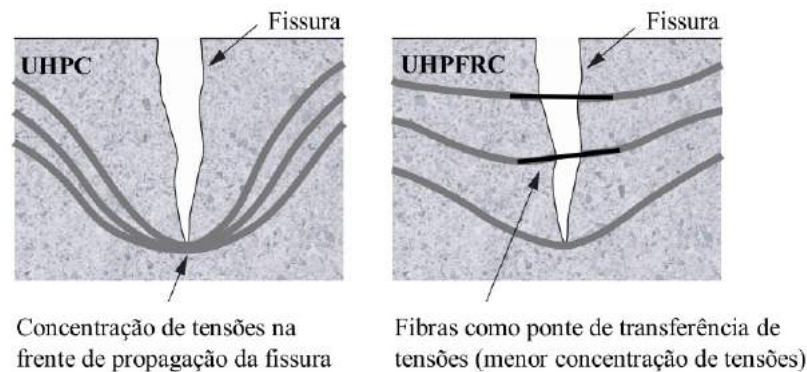
Fonte: Adaptado e traduzido de BAQERSAD *et al.* (2017)

A incorporação de fibras de aço proporciona melhoria na resistência à tração e tenacidade, tornando o comportamento pseudodúctil ou não frágil (FIGUEIREDO, 2011; LE HOANG; FEHLING, 2017). Logo, a atuação primordial das fibras acontece no estágio de pós-fissuração do concreto, uma vez que, até a primeira fissura, a matriz suporta as tensões de

tração, e o comportamento é caracterizado como elástico linear. Após a primeira fissura, as fibras são ativadas e atuam como pontes de transferência de tensões entre as fissuras, redistribuindo os esforços na matriz (BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011).

Essa reorganização diminui a concentração de esforços nas extremidades das fissuras, reduzindo, assim, a sua velocidade de propagação. Logo, mesmo após a fissuração, a estrutura porta uma capacidade resistiva, impedindo a ruptura brusca do espécime e, conseqüentemente, proporciona o aumento na tenacidade do compósito (BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011; ZHANG; SHAO; ZHU, 2020). O fenômeno da transferência de tensões por entre as fissuras realizado pelas fibras adicionadas como reforço da matriz é mostrado na Figura 2.3.

**Figura 2.3 – Concentração de tensões para CCUAD (esquerda) e CUADRF (direita).**



Fonte: Nunes e Agopyan (1998) adaptado e traduzido por Oliveira (2019)

A resposta do CUADRF ao comportamento pós-fissuração e, conseqüentemente, a eficiência do reforço da fibra na matriz é influenciada por vários parâmetros, como o teor e a geometria das fibras, a resistência da matriz, a orientação e a interação da interface fibra-matriz (BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011; LE HOANG; FEHLING, 2017).

Abbas, Soliman e Nehdi (2015), Ferrari, Arquez e Hanai (2016), Wu *et al.* (2016), Hoang e Fehling (2017), Al-Osta (2018), Krahl (2018), Christ (2019) e Oliveira (2019) concluíram por meio de ensaios laboratoriais que houve um ganho nas propriedades mecânicas do compósito, concomitantemente ao aumento do teor de fibras.

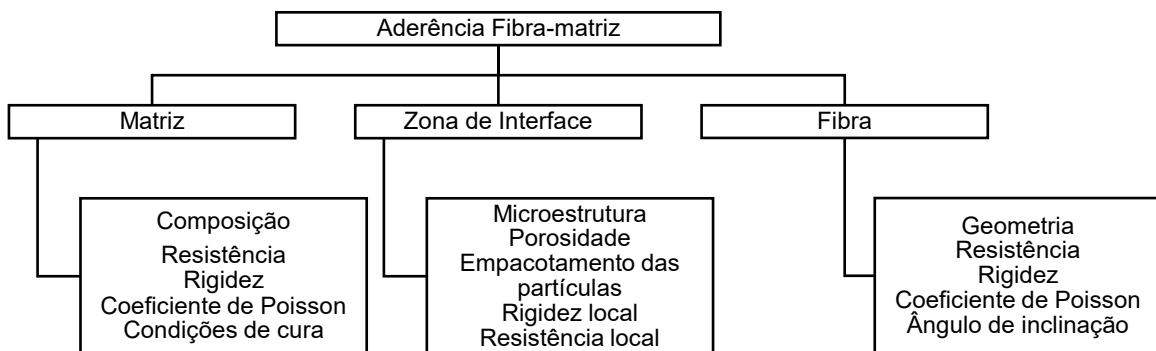
Além disso, segundo Fang *et al.* (2020), o aumento do volume de fibras resulta na mitigação da retração autógena da matriz. Tal fenômeno predominantemente ocorre em matrizes cimentícias de alto desempenho devido à baixa relação água/aglomerante.

Todavia, o aumento da fração do volume de fibras interfere na fluidez da matriz cimentícia, pois resulta na diminuição gradual do espalhamento e, conseqüentemente, na redução da trabalhabilidade do compósito. Um dos problemas que pode surgir é a aglomeração de fibras, denominadas de ouriços (FIGUEIREDO, 2011). Logo, é imprescindível

uma dosagem adequada, visto que a excelente trabalhabilidade facilita o uso do compósito em aplicações estruturais (WILLE; BOISVERT-COTULIO, 2015; HOANG; FEHLING, 2017).

Em relação à dosagem do CUADRF, as metodologias adotadas são, geralmente, baseadas em conceito do empacotamento de partículas. Um dos métodos mais utilizados é a equação de *Andreasen e Andersen* modificada (A&A) (FUNK; DINGER, 1980). A Figura 2.4 apresenta um panorama geral dos parâmetros que influenciam a relação fibra-matriz.

Figura 2.4 – Parâmetros gerais que influenciam a aderência fibra-matriz.



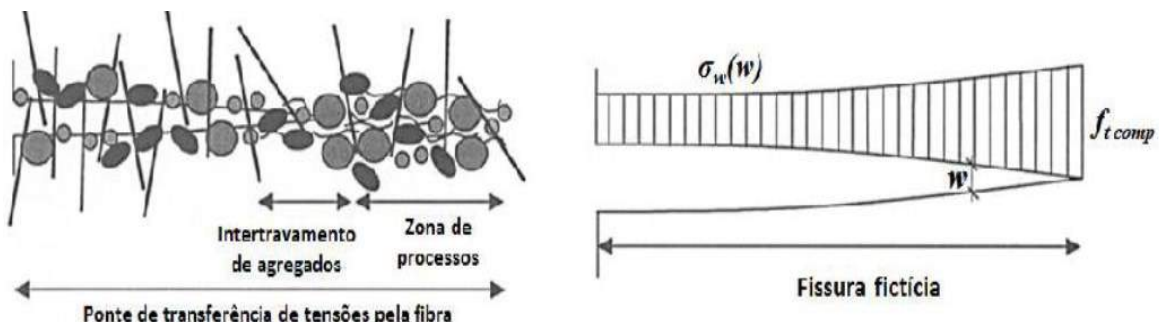
Fonte: Kim *et al.* adaptado (2012)

### 2.1.1 Caracterização do comportamento mecânico do CUADRF

As propriedades primordiais que caracterizam o comportamento de pós-fissuração do concreto reforçado com fibras são a tenacidade e a resistência residual, sendo utilizadas como parâmetros de entrada nas equações constitutivas para métodos de dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras (CRF) (ACI 318, 2010; FIB, 2013).

A tenacidade é a capacidade de absorção de energia de um corpo de prova, expressa como a área sob a curva carga *versus* deslocamento, ou seja, representa o trabalho dissipado pelo espécime. Sua magnitude está diretamente relacionada à geometria da amostra e ao tipo de carregamento (ACI 318, 2010). Na Figura 2.5 está esquematizada a capacidade portante pós-fissuração proporcionada pelas fibras mediante a ponte de transferência de tensões.

Figura 2.5 – Representação do modelo Hillerborg de fissura fictícia, no qual  $\sigma_w(w)$  representa a tensão de fechamento da fissura fictícia; e  $f_{t\ comp}$ , a resistência à tração do compósito.

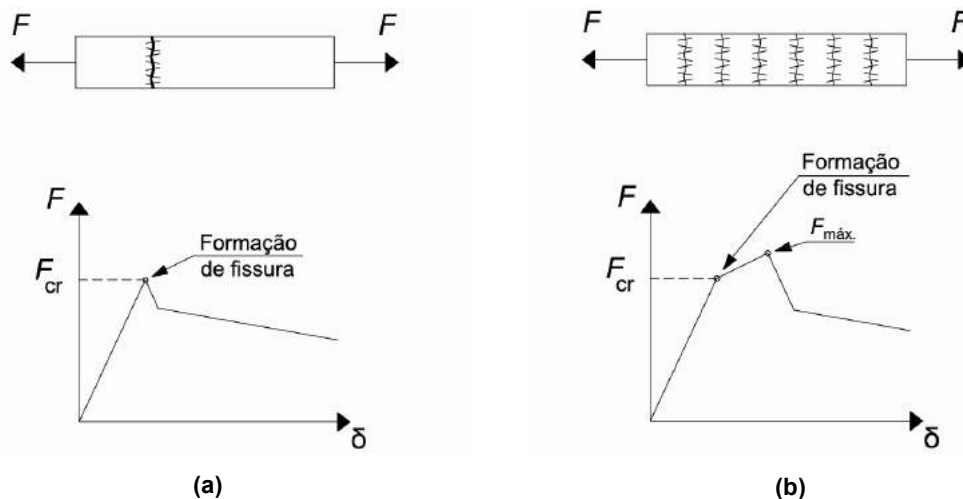


Fonte: Casagrande (2017), adaptado de RILEM – TC162 TDF

A ação das fibras propicia dois tipos de comportamentos distintos à matriz cimentícia. Após atingir a carga de pico, o concreto apresenta um comportamento de *softening*, ou seja, perda gradual da rigidez da matriz. As fibras dissipam o acúmulo de tensões e a ruptura deixa de ser frágil, no entanto há um decréscimo na capacidade portante do compósito.

Além do *softening*, pode haver o comportamento de *hardening*. Ao se utilizar altos teores de fibra (acima do teor crítico) ou ao garantir uma orientação preferencial das fibras transversal aos esforços de maior sollicitação da amostra, as fibras não somente agem dispersando as tensões, como também atuam resistindo a aumentos de sollicitações pós-pico, garantindo um enrijecimento da matriz. As Figuras 2.6 (a) e (b) detalham o comportamento típico de *softening* e *hardening* para carregamentos uniaxiais, respectivamente.

Figuras 2.6 – Comportamento típico de CRF para condições: (a) *softening*; (b) *hardening*.



Fonte: NBR 16935 (ABNT, 2021)

### 2.1.2 Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento

O ensaio de duplo puncionamento (EDP) foi proposto por Chen (1970) *apud* Monte (2015) com o objetivo de medir, de forma indireta, a resistência à tração de concretos convencionais. No entanto, os seus princípios foram, posteriormente, utilizados para o desenvolvimento de uma metodologia para caracterização da tenacidade e da resistência residual à tração de corpos de prova de concreto reforçado com fibras (PAJUDAS, 2013; BLANCO, 2013; AIRE *et al.*, 2013; MONTE, 2015).

Esse método foi, inicialmente, denominado de Ensaio Barcelona e, posteriormente, normatizado na Espanha pela AENOR UNE 83515 (2013), tendo sido, em 2021, incorporado pela normativa brasileira NBR 16939 (ABNT, 2021).

O EDP utiliza dois discos de carga cilíndricos de aço colocados de forma concêntrica nas duas faces do corpo de prova para aplicação da carga. O arranjo do ensaio produz, por

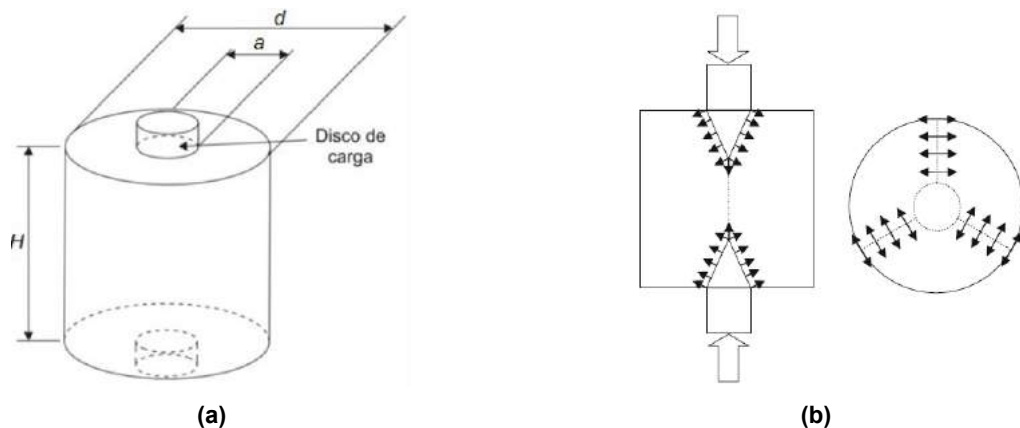


meio da compressão dos discos, tensões de tração axiais no corpo de prova ensaiado, atingindo a ruptura da matriz quando a sua resistência à tração é alcançada, conforme a NBR 16939 (ABNT, 2021).

A NBR 16939 (ABNT, 2021) padroniza que os corpos de prova moldados devem possuir diâmetro de 150 mm, ou, no mínimo, de 100 mm, em que a extração e a conservação dos testemunhos devem ser realizadas de acordo com a NBR 7680-1 (ABNT, 2015). A relação entre diâmetro ( $d$ ) e altura ( $H$ ) da amostra deve ser unitária. Já o diâmetro e a altura do disco devem ser iguais a 25% e 20% da altura ou do diâmetro do corpo de prova, respectivamente.

As Figuras 2.7 (a) e (b) ilustram o aparato do ensaio proposto e a atuação das tensões nos corpos de prova ensaiados, respectivamente.

**Figuras 2.7 – EBS: (a) Esquema do EDP; (b) Tensões de tração desenvolvidas com a dupla punção.**



Fonte: (a) NBR 16939 (ABNT, 2021); (b) Carmona *et al.* (2012)

Quanto à execução do ensaio, a velocidade de descida do pistão da prensa deve ser de 0,5 mm por minuto, garantindo a aplicação de carga uniforme na superfície. O ensaio deve registrar continuamente a carga aplicada e o deslocamento vertical do pistão.

De acordo com a NBR 16938 (ABNT, 2021), o EDP pode ser utilizado para o controle tecnológico do CRF, desde que, na etapa de qualificação do compósito, seja estabelecida a correspondência com as resistências determinadas no ensaio de tração na flexão, conforme a NBR 16940 (ABNT, 2021). O EDP é considerado um método de fácil execução, visto que utiliza corpos de prova com dimensões menores e não exige aparato laboratorial complexo (MONTE; TOALDO; FIGUEIREDO, 2014; MONTE, 2015)

Com o intuito de evidenciar alguns dos trabalhos já realizados sobre o CUADRF, a Tabela 2.2 apresenta compilações dos resultados de pesquisas relevantes em que os autores realizaram ensaios de resistência à compressão e à flexão, respectivamente, em amostras de CUADRF, identificando as características e os resultados alcançados. É possível verificar que há interesse da comunidade científica em fomentar o conhecimento acerca do material.

Tabela 2.2 – Compilação de trabalhos recentes utilizando CADRF ou CUADRF.

Referência	Material	Traço	Adição mineral	$l_f$	Teor de fibras	Resistência à compressão	Resistência à flexão	Conclusão
				mm	%	MPa	MPa	
Liu <i>et al.</i> (2020)	CADRF*	1:0,94:0,18	Sílica ativa	$\frac{13}{0,20}$	3,0	149,3	37,4	As fibras de aço diminuíram a fluidez, mas melhoraram significativamente a resistência à compressão e à flexão do CADRF.
Shi <i>et al.</i> (2020)	CADRF*	1:4,4:2,8:0,43	Cinza volante	$\frac{33}{0,55}$	0;0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0	52,4 (1,5%)	-	As amostras com teor de fibras de aço acima de 1,5% apresentaram perda da trabalhabilidade. A adição de fibras não alterou, significativamente, a resistência à compressão do CADRF. Os CPs reforçados com fibras lisas e sem ancoragem apresentaram maior resistência à tração. Já os espécimes contendo fibras com ancoragem nas bordas exibiram melhor desempenho em termos de ductilidade, resistência residual e tenacidade.
				$\frac{13}{0,20}$		52,2 (0,5%)	-	
Christ (2019)	CADRF*	1:2,44:0,23	Sílica ativa Cinza volante Carbonato de cálcio	$\frac{13}{0,20}$	1,0; 2,0 e 2,9	119,5 (2,9%)	26,1 (2,9%)	Constatou-se com 95% de confiança (ANOVA) que não houve variação significativa na trabalhabilidade em função das variações (aumento) dos teores de fibras empregados. Independentemente da idade de cura, houve uma tendência de quanto maior o percentual de fibras na matriz, maior resistência à compressão, à tração máxima e à primeira fissura.
Oliveira (2019)	CADRF*	1:1,1:0,21	Sílica ativa Pó de quartzo	$\frac{13}{0,20}$	0; 1,0 e 2,0	145,7 (2,0%)	15,6 (2,0%)	Foi observado que a incorporação de fibras de aço teve pouca influência sobre a resistência à compressão e ao módulo de elasticidade, mas possibilitou o aumento das resistências à tração e à flexão, bem como a melhoria da ductilidade e da energia de fratura, devido à atuação das fibras como ponte de transferência de tensões pelas fissuras.
Krahl (2018)	CUADRF	1:1,1:0,25	Sílica ativa Pó de quartzo	$\frac{13}{0,20}$	0; 1,0 e 2,0	150,5 (2,0%)	8,2 (2,0%)	A ponte de transferência de tensões, bem como a relação fibra/matriz, foram responsáveis pelo aumento significativo no comportamento pós-fissuração do CUADRF em comparação com o CADRF.

\* CADRF – Concreto de alto desempenho reforçado com fibras.

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Tabela 2.2 – Compilação de trabalhos recentes utilizando CADRF ou CUADRF (continuação).

Referência	Material	Traço	Adição mineral	If	Teor de fibras	Resistência à compressão	Resistência à flexão	Conclusão
				mm	%	MPa	MPa	
Le-Hoang e Fehling (2017)	CUADRF	1:1,22:0,24	Sílica ativa Pó de quartzo	-	0	216,6	-	Não houve mudança perceptível na resistência à compressão e no módulo de elasticidade do CUADRF em comparação ao CUAD. No entanto, a capacidade resistiva da matriz no estágio de pós-fissuração foi substancialmente influenciada pelo aumento do teor de fibras
				$\frac{9}{0,15}$	1,5 e 3,0	-		
				$\frac{13}{0,16}$		211,6 (1,5%)		
				$\frac{20}{0,25}$		207,6 (3,0%)		
WU <i>et al.</i> (2016)	CUADRF	1:1,33:0,18	Sílica ativa	$\frac{13}{0,20}$	1,0; 2,0 e 3,0	169,8 (3,0%)	34,4 (2,0%)	As resistências à compressão e à flexão aumentaram tanto com o aumento do teor de fibra quanto com a idade de cura.
Abbas, Soliman e Nehdi (2015)	CUADRF	1:1,2:0,23	Sílica ativa Pó de quartzo	-	0	151,0	20,4	As fibras de fator de forma (FF) igual a 40 apresentaram melhor desempenho em relação à resistência à flexão quando comparadas às fibras de FF=60 e 80. Observou-se o aumento da resistência à tração e à flexão do CUADRF, com maior dosagem da fibra de aço.
				$\frac{8}{0,20}$	1,0; 3,0 e 6,0	171,0 (6,0%)	88,2 (6,0%)	
				$\frac{12}{0,20}$		173,0 (6,0%)	77,5 (6,0%)	
				$\frac{16}{0,20}$		170,0 (6,0%)	66,1 (6,0%)	
Hassan, Jones e Mahmud (2012)	CUADRF	1:1,6:0,23	Sílica ativa Escória granulada de alto forno	$\frac{13}{0,20}$	2,0	150,5	-	A incorporação de fibras melhorou a ductibilidade do material consideravelmente. Porém, sua influência na resistência à compressão e ao módulo de elasticidade foi relativamente pequena.

\* CADRF – Concreto de alto desempenho reforçado com fibras.

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Mediante análise da Tabela 2.2, observa-se que as adições minerais comumente utilizadas são a sílica ativa, a cinza volante e o pó de quartzo. Conclui-se que diversos tipos de fibras podem ser incorporados na composição do CUADRF, contudo, as fibras mais utilizadas são as metálicas lisas e curtas, com comprimento de 13 mm e diâmetro de 0,2 mm, revestidas de cobre, apresentando resistência à tração e módulo de elasticidade de aproximadamente 2500 MPa e 200 GPa, respectivamente (KRAHL, 2018; CHRIST, 2019; OLIVEIRA, 2019).

Os teores de fibras adotados pelos autores variam entre 0,5% e 3,0% em relação ao volume. Apenas o estudo realizado por Abbas, Soliman e Nehdi (2015) analisou o CUADRF com teor de fibras máximo de 6,0% em relação ao volume da mistura. Contudo, conforme esperado, a fluidez do compósito diminuiu com o aumento do comprimento e com a dosagem da fibra, ocorrendo uma redução de aproximadamente 13,0% na fluidez para matrizes que incorporaram fibras com 16 mm de comprimento e 6,0% de fibras em volume da mistura.

A resistência à compressão mínima obtida nos estudos foi de 52,3 MPa para o concreto de alto desempenho reforçado com fibras (CADRF). Já para o CUADRF, a resistência atingida foi igual a 150,5 MPa. A resistência à flexão máxima atingida foi de 37,4 MPa para o CADRF e de 88,2 MPa para o CUADRF.

Segundo Hassan, Jones e Mahmud (2012), Abbas, Soliman e Nehdi (2015), Le-Hoang e Fehling (2017), Oliveira (2019) e Shi *et al.* (2020), a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do CUADRF não sofreram alterações significativas com a incorporação das fibras quando comparados ao concreto sem fibras. No entanto, a capacidade portante da matriz no estágio de pós-fissuração foi substancialmente influenciada pelo aumento do teor de fibras.

### **2.1.3 Aplicação do CUADRF**

Em virtude de suas propriedades excepcionais, o CUADRF vem sendo explorado em todo o mundo. Todavia, a aplicação tecnológica e economicamente viável do material torna-se um desafio para o mercado da construção civil, pois o alto custo do compósito está relacionado com o valor elevado da fibra, do superplastificante e da cura térmica, além de com o consumo elevado de cimento (AGUERO *et al.*, 2019).

Wille e Boisvert-Cotulio (2015) e Yoo, Kang e Yoon (2016) concluíram que volumes de fibras entre 1,5% e 2,0% representam em torno de 33,0% a 55,0% do valor total do compósito. Contudo, considerando a durabilidade do CUADRF, o custo das estruturas reforçadas com o material, em toda a vida útil, será menor devido à redução das seções transversais dos elementos estruturais e à mitigação do custo com manutenção (ZHU *et al.*, 2020).

Em 2004, foi concluída a construção da passarela de *Seonyu* na Coreia do Sul, utilizando o CUADRF com um vão principal de 120 m. Sua construção exigiu apenas cerca da metade do material que seria utilizado na construção tradicional de concreto armado, além de oferecer propriedades superiores (AZMEE; SHAFIQ, 2018).

Entre as diversas aplicações do CUADRF, destaca-se a utilização em obras de infraestrutura, em elementos pré-moldados, em obras de *retrofit* e em recuperação de estruturas. As Figuras 2.8 e 2.9 são exemplos da aplicabilidade do compósito em obras de *retrofit* e em recuperação estrutural, respectivamente.

**Figura 2.8 – Mission Bridge (Canadá): foi realizado um encamisamento de 225 mm de espessura com CUADRF para a adequação da ponte aos requisitos sísmicos.**



Fonte: Ductal (2016)

**Figura 2.9 – Kanderviadukt (Suíça): foi aplicada uma camada de 30 mm de CUADRF para proteger a estrutura contra infiltração de água e demais agentes agressivos.**



Fonte: Ductal (2018)

A disseminação do emprego do CUADRF em diversas obras no mundo motivou diversos países no desenvolvimento de recomendações técnicas à aplicação do compósito. Como exemplo, cita-se: a recomendação japonesa (JSCE, 2008) e a alemã (DAfStb 561, 2008), além de duas normas francesas, NF P 18-470 (AFNOR, 2016) e NF P 18-710 (AFNOR, 2016), direcionadas à produção do material e ao projeto estrutural, respectivamente.

Além de aplicações em elementos estruturais, o CUADRF vem sendo empregado em elementos arquitetônicos, na ornamentação em painéis de fachada, em brises, cobogós, marquises e coberturas leves. No Brasil, existem duas construções que utilizaram o material para fins arquitetônicos, ilustradas nas Figuras 2.10 (a) e (b).

**Figuras 2.10 – Elementos arquitetônicos produzidos com CUADRF no Brasil: (a) painel de cobogó da casa Japão (esquerda); (b) painel da fachada do edifício do ERESP (direita).**



Fonte: Stone (2020)

Reforçando a aplicabilidade do CUADRF no mercado da construção civil brasileiro, o método de dosagem Unisinos, desenvolvido por Christ (2019), foi empregado na composição de um sistema construtivo de casas pré-fabricadas (CHRIST *et al.*, 2019). As Figuras 2.11 (a) e (b) apresentam o processo de montagem e a unidade habitacional, respectivamente.

**Figuras 2.11 – Projeto para utilização de CUADRF em casas pré-fabricadas: (a) aplicação do CUADRF para produção das placas (esquerda); (b) unidade habitacional confeccionada pela empresa (direita).**



Fonte: Christ *et al.* (2019)

## 2.2 A INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

### 2.2.1 Vidros

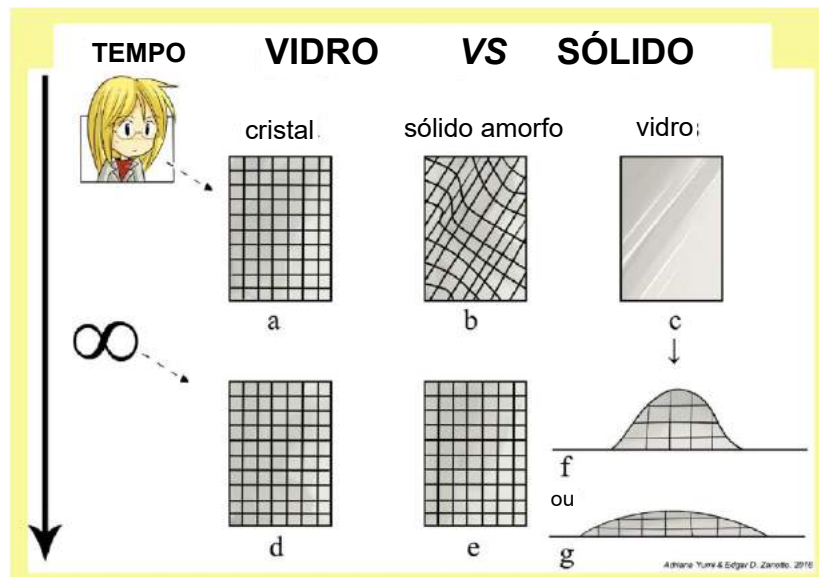
Zarzycki (1991) definiu vidro como um sólido não cristalino que apresenta o fenômeno de transição vítrea. Segundo Zanotto e Mauro (2017), o vidro é um estado fora do equilíbrio



termodinâmico (estado em que os equilíbrios térmico, químico e mecânico ocorrem simultaneamente), não cristalino da matéria condensada, que exibe uma transição vítrea. A estrutura do vidro é análoga à dos líquidos super-resfriados (LSR) e relaxa espontaneamente em direção ao estado de LSR, cujo destino final, para um tempo infinitamente longo, é cristalizar.

Os vidros podem ser definidos como *frozen liquids*, ou seja, um material com a estrutura de um líquido que foi congelado sem cristalizar ao ser resfriado abaixo de uma determinada temperatura, que é a vítrea (ZANOTTO; MAURO, 2017). A Figura 2.12 apresenta o comportamento do elemento em uma escala de tempo infinitamente longo.

**Figura 2.12 – Um cristal (sólido), um sólido amorfo e um vidro na escala de tempo humano e seus destinos finais em uma escala de tempo infinita.**



Fonte: Traduzido de Zanotto; Mauro (2017)

Portanto, as propriedades dos vidros dependem não apenas de sua composição, temperatura e pressão, mas também do histórico térmico e de pressão experimentado pelo material (ZANOTTO; MAURO, 2017).

A composição química dos vidros depende, principalmente, das matérias-primas utilizadas e difere sutilmente para cada tipo de vidro. Estima-se que existem 350 mil tipos de vidros no mundo (INTERGLAD, 2019). No entanto, mais de 95% do volume de material comercializado advêm de vidros compostos por óxidos (VARSHNEYA; MAURO, 2019). Em especial, o vidro soda-cal apresenta os seguintes componentes em sua estrutura: 70%  $SiO_2$ , 12-17%  $Na_2O$ , e 5-10% de  $CaO$  (WILSON *et al.*, 2019; MEHTA; ASHISH, 2020).

O vidro é um material versátil em razão de suas características, como inércia química, resistência mecânica, baixa permeabilidade, transparência, boa condução térmica,

estabilidade dimensional e durabilidade, além de ser 100% reciclável (VARSHNEYA; MAURO, 2019). A inovação e o desenvolvimento do vidro visam atender desafios dos setores das indústrias de geração de energia, farmacêutica, informação e comunicação, meio ambiente, arquitetura, construção civil, além do setor de transportes (MORSE; EVENSON, 2016; VARSHNEYA; MAURO, 2019). Em 2020, a indústria brasileira produziu em média 61,9 milhões em m<sup>2</sup> de vidros processados, alcançando um faturamento em torno de R\$ 5,2 bilhões (ABRAVIDRO, 2021).

Dessa forma, o setor do vidro produz uma quantidade relevante de material todos os anos. Conseqüentemente, existe uma expressiva geração de resíduos de vidro, e a correta destinação desse material, em especial das embalagens, é um grande desafio enfrentado pela sociedade brasileira. De acordo com Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em 2020, a incidência de vidros recuperados, mediante coleta seletiva, foi de 99,9 mil toneladas (12,6% de todo o resíduo coletado) entre os 1.377 municípios que fazem parte do banco de dados (SNIS, 2021).

### **2.2.2 Pó de vidro como material pozolânico**

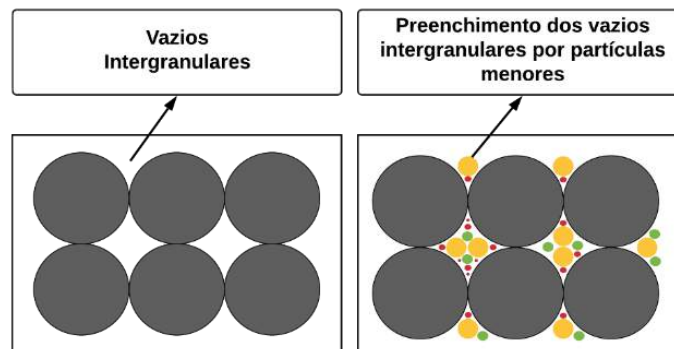
Visto o esforço e o interesse da comunidade técnica científica, diversas pesquisas desenvolvidas visam à adição ou à substituição parcial dos elementos componentes das matrizes cimentícias, sobretudo o cimento. Pode-se citar: resíduo do beneficiamento de mármore e granito (LAMEIRAS, 2004), cinza volante (FERDOSIAN *et al.*, 2017) e escória de alto-forno (ABDULKAREEM *et al.*, 2018), bem como a substituição do cimento por cinzas agroindustriais: bagaço da cana de açúcar (ALMEIDA *et al.*, 2015), casca de café (CASTRO, 2017), casca de aveia (BELLAVAR, 2019) e casca de arroz (HU *et al.*, 2020).

Entre os materiais cimentícios suplementares alternativos explorados recentemente, encontra-se o vidro moído. O pó de vidro, quando incorporado à matriz cimentícia, possui duas características principais: atua preenchendo os vazios, ou seja, apresenta efeito *filler* (VAITKEVIČIUS; ŠERELIS; HILBIG, 2014), e também exibe potencial de aplicação como material pozolânico desde que apresente granulometria adequada (KOU; XING, 2012; KAMALI; GHAREMANINEZHAD, 2015; SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016).

O efeito *filler* atua no aumento da densidade da matriz devido ao preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento, conforme representação simplificada ilustrada na Figura 2.13. O efeito promove refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação do cimento, uma vez que as minúsculas partículas das adições podem atuar como pontos de nucleação e, conseqüentemente, favorecem a maior reatividade do cimento, podendo também alterar a microestrutura da zona de transição (HOPPE FILHO, 2008; DAMINELLI, 2013).



Figura 2.13 – Representação esquemática simplificada do efeito *fíler*.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Em relação ao efeito *fíler*, Wilson *et al.* (2019) utilizaram um consumo inicial de cimento de  $556 \text{ kg/m}^3$  e o substituíram por 30% de pó de vidro em massa com granulometria de  $d_{50}$  de  $12 \mu\text{m}$ , produziram CCUAD e, posteriormente, analisaram os resultados por meio da técnica NI-QEDS (Sigla em inglês para *NanoIndentation and Quantitative Energy-Dispersive Spectroscopy*). Os espécimes obtiveram relações químicas e propriedades mecânicas semelhantes com a amostra de referência. Constatou-se que o vidro moído exerceu a função de material inerte e auxiliou no vínculo com a matriz circundante.

Vaitkevičius; Šerelis; Hilbig (2014) constaram que em idade iniciais (menor que sete dias) o pó de vidro atua como um material inerte na composição. No entanto, quando a solução intersticial dos poros da matriz cimentícia atingiu  $\text{pH}=13,0$ , a taxa de solubilização do vidro moído aumentou rapidamente, colaborando com a reação pozolânica. Segundo os autores, a dissolução do pó de vidro é um processo endotérmico. Logo, a cura térmica aumenta a taxa de dissolução do vidro moído e contribui com o aprimoramento das propriedades mecânicas.

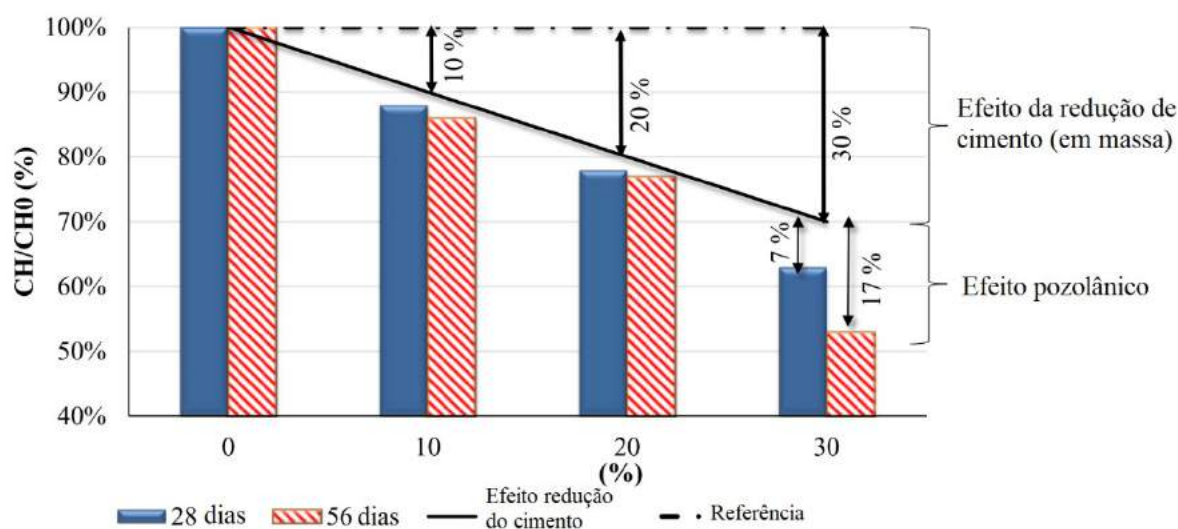
O efeito pozolânico é caracterizado pela reação química entre a pozolana e a portlandita formada a partir da hidratação do  $C_3S$  ( $C_3SiO_5$ ) e do  $C_2S$  ( $Ca_2SiO_4$ ). A reação produz silicato de cálcio hidratado secundário  $C - S - H$ , um componente mais estável e estruturado que a portlandita isolada, que aprimora as matrizes cimentícias, reduzindo a porosidade e aprimorando a interface pasta-agregado (MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012). A pozolana promove a redução da portlandita liberada pelo cimento, com  $C - S - H$  formado pela reação pozolânica apresentando baixa relação  $\frac{Ca}{Si}$  (LEE *et al.*, 2018).

Rashidian-Dezfouli e Rangaraju (2017) submeteram argamassas com teores de 0%, 10%, 20% e 30% (em massa) em substituição de cimento por vidro moído à análise termogravimétrica (TGA). As amostras foram aquecidas gradualmente até atingir a

temperatura máxima de 800°C; durante o ensaio, as variações de massa das amostras foram monitoradas.

Sabe-se que a decomposição de hidróxido de cálcio ( $CH$ ) ocorre na faixa de temperatura entre 440°C e 520°C, causando uma perda proeminente de massa no espécime. Logo, a perda de massa nesse intervalo de temperatura é utilizada para calcular a quantidade de  $CH$  da amostra. A Figura 2.14 apresenta o resultado obtido para as idades de 28 e 56 dias.

Figura 2.14 – Efeito da dosagem de pó de vidro no resultado de TGA.



Nota:  $CH$  é o hidróxido de cálcio das amostras e  $CH_0$  é o hidróxido de cálcio da amostra de referência (sem adição de pó de vidro).

Fonte: Adaptado e traduzido de Rashidian-Dezfouli e Rangaraju (2017)

Mediante análise da Figura 2.14, conclui-se que a concentração de ( $CH$ ) diminui significativamente com o aumento do teor de pó de vidro. Segundo os autores, tal comportamento é resultante da combinação da redução de cimento na matriz (menos ( $CH$ ) disponível) e da reação pozolânica que consome ( $CH$ ) para formar o gel ( $C - S - H$ ). A Tabela 2.3 apresenta os resultados da redução de ( $CH$ ) devido à reação pozolânica.

Tabela 2.3 – Ensaio TGA – Redução devido ao efeito pozolânico.

Teor de substituição (%)	Idade (dias)	Redução de $CH$ devido à reação pozolânica (%)
10	28	1
20		2
30		7
10	56	3
20		4
30		17

Fonte: Rashidian-Dezfouli; Rangaraju (2017) – Adaptado pela autora (2021)

Kou e Xing (2012) avaliaram CCUAD com vidro moído ( $d_{50} = 45 \mu\text{m}$ ) em substituição volumétrica parcial ao cimento (15% e 30%) e 2% em adição volumétrica de fibras de aço (fator de forma = 65), com as amostras submetidas a duas temperaturas no processo de cura (25°C e 90°C). As resistências à compressão dos traços com 15% e 30% de vidro moído e curados a 90°C foram 28,6% e 30,6% maiores que o mesmo traço e com cura padrão a 25°C. Portanto, o efeito pozolânico é influenciado pelo teor de substituição de pó de vidro por cimento, pela temperatura e tempo de cura.

Na Tabela 2.4 estão dispostos os objetivos de pesquisas desenvolvidas recentemente que abordaram a utilização de pó de vidro em compósitos cimentícios, com destaque para sua utilização em CCUAD.

**Tabela 2.4 – Pesquisas recentes desenvolvidas com a utilização de pó de vidro em compósitos cimentícios de alto desempenho.**

Referência	Objetivo	País
Barros (2016)	Realizar um estudo experimental visando ao desenvolvimento de concretos de alta resistência, com substituição de cimento por pó de vidro.	Brasil
Soliman e Tagnit-Hamou (2016)	Desenvolver um CCUAD inovador de baixo custo e sustentável mediante a substituição do cimento e da areia de quartzo por pó de vidro.	Canadá
Tagnit-Hamou; Soliman e Omran (2016)	Desenvolver um tipo de CCUAD sustentável utilizando pó de vidro com granulometria diferente para a substituição de areia quartzosa, cimento, pó de quartzo e sílica ativa.	Canadá
Guignone (2017)	Avaliar o desempenho de concretos produzidos com resíduos da lapidação do vidro em substituição parcial do cimento.	Brasil
Mosaberpanah; Eren; Tarassoly (2018)	Aprimorar o desempenho do CCUAD em termos de propriedades mecânicas, retração e reológico, tornando o material <i>eco-friendly</i> adicionando materiais pozolânicos e resíduos mediante redução do consumo de cimento.	Chipre
Freitas (2019)	Avaliar o efeito da adição de pó de vidro na mitigação da reação álcali-sílica de compósitos cimentícios de alto desempenho.	Brasil
Wilson <i>et al.</i> (2019)	Difundir as características da microestrutura do CCUAD com pó de vidro nas quais os constituintes podem ser parcialmente substituídos por pó de vidro, sem afetar as propriedades em longo prazo.	Canadá, Estados Unidos e Suécia
Mostofinejad <i>et al.</i> (2020)	Avaliar a durabilidade de misturas de concreto contendo agregado miúdo e gráudo reciclado como substituição parcial (0% e 30%) de agregados (cascalho e areia) e pó de vidro como substituição parcial (0% e 20 30%) de cimento em misturas de concreto.	Irã, Canadá e Estados Unidos
Oliveira Júnior (2020)	Analisar as propriedades residuais de compósitos cimentícios de alto desempenho com pó de vidro após exposição em altas temperaturas.	Brasil
Soares (2021)	Avaliar a influência da substituição do cimento Portland por diferentes teores de pó de vidro reciclado em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho na resistência mecânica e na durabilidade frente à ação de cloretos.	Brasil

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Um adendo quanto à utilização do vidro moído é a alta incidência da quantidade de álcalis usualmente encontrada no material (12% a 17% de  $\text{Na}_2\text{O}_e$  (equivalente alcalino)) que pode propiciar o surgimento da reação álcali-agregado (RAA) em matrizes cimentícias.

Contundo, Shayan e Xu (2004); Bhandari e Tajne (2013); Kamali e Ghahremaninezhad (2015) e Mehta e Ashish (2020) comprovaram que o pó de vidro não propicia o surgimento da RAA em compósitos cimentícios, desde que a partícula apresente dimensão igual ou menor a 75  $\mu\text{m}$ . Sendo assim, o desempenho do pó de vidro depende principalmente do tamanho das partículas (KAMALI; GHAHREMANINEZHAD, 2015; MEHTA; ASHISH, 2020).

Visando avaliar a RAA, Kamali e Ghahremaninezhad (2015) investigaram amostras de concreto com teores de substituições de 10% e 20% de incorporação de pó de vidro em substituição ao cimento. Foram utilizados dois tipos de vidros moídos: um subproduto industrial derivado da fibra de vidro, e um subproduto pós-consumo proveniente do vidro reciclado, ambos com tamanho médio da partícula ( $d_{50}$ ) pó de vidro próximo a 8,4  $\mu\text{m}$ .

Mediante o ensaio acelerado da barra de argamassa, conforme ASTM C1260 (2019), ao longo de 15 dias, verificou-se que a argamassa de controle apresentou uma expansão acentuada, enquanto as amostras com incorporação de vidro demonstraram uma redução da RAS. A expansão dos corpos de prova com 20% de substituição de pó de vidro, independentemente do tipo do vidro moído, foram as mais eficazes na mitigação da RAS.

Shafaatian *et al.* (2013) comprovaram que a mitigação da RAS em compósitos cimentícios mediante a utilização de materiais suplementares é resultado da redução da concentração dos álcalis e hidróxidos na solução nos poros do concreto como resultado da reação pozolânica e da diluição de álcalis devido à substituição parcial do cimento, uma vez que os  $C - S - H$ , com baixo teor de cálcio, produzidos na reação pozolânica, ligam-se aos álcalis na solução intersticial, reduzindo os álcalis disponíveis para fazer parte da RAS.

Freitas (2019) avaliou compósitos cimentícios com substituição parcial de cimento por pó de vidro ( $d_{50} = 75 \mu\text{m}$ ) em teores de 10%, 20%, 30% e 50% (em volume) com mediante ABNT NBR 15577:4-5 (2018). Os teores de 10% e 20% de adição de vidro moído aumentaram as expansões nas barras de argamassa analisadas e os teores de 30% e 50% diminuíram as expansões, chegando a variações dimensionais próximas de 0%. Logo, o comportamento frente à RAS variou de acordo com o teor de pó de vidro das misturas. Por fim, constatou-se que 30% e 50% de incorporação são os teores ótimos de substituição em relação à RAS.

Quanto às propriedades no estado fresco, Soliman e Tagnit-Hamou (2016), Islam, Rahman e Kazi (2017) e Mosaberpanah, Eren e Tarassoly (2019) constataram que quanto maior o teor de adição do pó de vidro em substituição parcial do cimento, ligeiramente maior a consistência do concreto. Segundo os autores, essa melhora ocorreu devido às partículas

de pó de vidro que apresentam superfície lisa, ocasionando menor atrito entre elas, bem como da baixa absorção de água por parte das partículas de pó de vidro, gerando maior disponibilidade de água para fluidificação da matriz cimentícia.

O oposto aconteceu na pesquisa desenvolvida por Barros (2016): os valores de consistência diminuíram à medida que aumentou o teor de substituição de cimento por pó de vidro. De acordo com o autor, esse comportamento ocorre em razão da menor hidratação das misturas. Vaitkevičius, Šerelis e Hilbig (2014) e Soliman e Tagnit-Hamou (2016) ressaltam que o vidro moído pode diminuir a quantidade de água da mistura e, em outros casos, atua de maneira oposta. Tais características dependem da distribuição do tamanho e das irregularidades das partículas, empacotamento, como também de sua superfície específica.

Em relação às propriedades mecânicas, Kou; Xing (2012); Barros (2016); Soliman; Tagnit-Hamou (2016); Guignone (2017); Lee *et al.* (2018); Mostofinejad *et al.* (2020) demonstraram que as amostras com a adição de vidro apresentaram menor resistência à compressão aos 28 dias quando comparadas com as de referência. No entanto, em longo prazo (maior que 28 dias), ocorreu aumento significativo da resistência à compressão.

O aumento de resistência à compressão em idades avançadas dos compósitos cimentícios com substituição de cimento por pó de vidro pode ser atribuído à capacidade de ligação do silicato de cálcio hidratado  $C - S - H$ , que resulta da reação pozolânica do vidro com o hidróxido de cálcio ( $CH$ ), e também ao refinamento e à redução dos poros capilares (VAITKEVIČIUS; ŠERELIS; HILBIG, 2014; BARROS, 2016).

Kamali e Ghahremaninezhad (2015) submeteram amostras de concreto com teores de substituições de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de incorporação de vidro moído mediante ensaio de penetração de cloreto conforme ASTM C1202 (2019) aos 28 dias. Verificou-se que houve redução da taxa de penetração de cloreto conforme ocorreu aumento do teor de pó de vidro.

Soares (2021) observou por meio do método NT BUILD 492 (2011) que os traços com substituição de 10% e 20% de cimento Portland por pó de vidro ( $d_{50}$ ) apresentaram uma diminuição no coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias enquanto os traços com substituição de 30% e 50% apresentaram aumento no coeficiente. Sendo assim, os compósitos cimentícios com adição de vidro moído apresentaram profundidade de penetração de cloretos e teor total de cloretos maior ante o traço referência, sem incorporação de pó de vidro.

A Tabela 2.5 expõe a compilação dos resultados de alguns autores que utilizaram o pó de vidro como material pozolânico nos compósitos cimentícios, apresentando as características do material e os resultados obtidos.

Tabela 2.5 – Compilação de trabalhos com pó de vidro incorporados em compósitos cimentícios.

Referência	Substituição do cimento em massa	fc <sub>28</sub> respectivos aos teores de pó de vidro (MPa)	Consumo inicial de cimento* (kg/m <sup>3</sup> )	Relação a/agl	Pó de vidro em d <sub>50</sub> (µm)	Composição química do vidro	Teor de fibras (%)	lf/df (mm)	Conclusão
Kou e Xing (2012)	0%, 15% e 30%	-	1062; 903; 743	0,15	45	71,4% SiO <sub>2</sub> 10,6% CaO 12,7% Na <sub>2</sub> O	-	-	A substituição do cimento por pó de vidro diminuiu no início (antes de 7 dias), mas aumentou a resistência à compressão e à flexão em idades avançadas (após 28 dias) do CCUAD.
Barros (2016)	0%, 10%, 15% e 20%	67, 65, 63 e 51	512	0,36	60	70,5% SiO <sub>2</sub> 13,5% CaO 12,4% Na <sub>2</sub> O	-	-	O ganho de resistência nos concretos contendo pó de vidro ocorreu a uma taxa ligeiramente menor que a do concreto convencional, mas possui potencial de alcançar resistências superiores às do concreto sem pó de vidro para tempos de cura mais longos.
Islam; Rahman e Kazi (2016)	0%, 10%, 15%, 20% e 25%	43; 41; 38; 36; 35	300	0,49	75	68,1% SiO <sub>2</sub> 14,5% CaO 12,2% Na <sub>2</sub> O	-	-	As amostras com 20% de adição de vidro em pó apresentaram melhor desempenho na resistência à compressão após 90 dias de idade. O aumento da resistência à compressão ocorreu devido ao efeito combinado do empacotamento das partículas, à hidratação do cimento e à reação pozolânica do pó de vidro.
						68,7% SiO <sub>2</sub> 12,0% CaO 13,3% Na <sub>2</sub> O	-	-	
Soliman e Tagnit-Hamou (2016)	0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%	170, 165, 170, 165, 155 e 145	807	0,19	12, 5, 3,8, 2,8	73,0% SiO <sub>2</sub> 11,3% CaO 13,0% Na <sub>2</sub> O	-	-	A melhoria nas propriedades mecânicas foi atribuída à pozolanicidade do vidro moído, à resistência química e física do vidro.
Tagnit-Hamou; Soliman e Omran (2016)	-	177; 170; 158; 150; 130 e 138	-	0,17 0,21 0,24	10	73,0% SiO <sub>2</sub> 11,3% CaO 13,0% Na <sub>2</sub> O	2	<u>13</u> 0,20	O CUADRF exibiu microestrutura aprimorada com propriedades mecânicas e durabilidade superiores à amostra de referência.
Guignone (2017)	0%, 10% e 20%	37; 38; 37	302	0,60	35	64,8% SiO <sub>2</sub> 6,9% CaO 19,4% Na <sub>2</sub> O	-	-	A utilização de vidro moído em concretos é satisfatória para a utilização de teores com até 20% em substituição ao cimento, uma vez que promove ganhos na resistência à compressão, resistência ao ingresso de cloretos e produz efeito mitigador da expansão por reação álcali-silica.

Notas: \*Consumo de cimento para o traço sem pó de vidro.

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Tabela 2.5 – Compilação de trabalhos com pó de vidro incorporados em compósitos cimentícios (continuação).

Referência	Substituição do cimento em massa	fc <sub>28</sub> respectivos aos teores de pó de vidro (MPa)	Consumo inicial de cimento* (kg/m <sup>3</sup> )	Relação a/agl	Pó de vidro em d <sub>50</sub> (µm)	Composição química do vidro	Teor de fibras (%)	l <sub>f</sub> / d <sub>f</sub> (mm)	Conclusão
Mosaberpanah, Eren e Tarassoly (2018)	0%, 10% e 20%	124; 136; 131	-	0,20	63	71,1% SiO <sub>2</sub> 10,6% CaO 10,5% Na <sub>2</sub> O	1	<u>13</u> 0,55	As amostras com pó de vidro obtiveram aumento na resistência à compressão aos 28 dias, redução da retração e trabalhabilidade aprimorada. Os espécimes com 20% de vidro em pó em substituição parcial ao cimento apresentaram o melhor desempenho quanto à resistência à compressão.
Lee <i>et al.</i> (2018)	0% e 20%	48 e 44	493	0,35	20	67% SiO <sub>2</sub> 10,8% CaO 9,0% Na <sub>2</sub> O	-	-	Em termos de durabilidade, os resultados dos testes de resistência ao congelamento e descongelamento confirmaram que as amostras de pó de vidro apresentaram um excelente fator de durabilidade (>90%). A melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade são atribuídas à reatividade pozolânica, à área superficial elevada, a partículas finas do vidro moído e à menor porosidade da matriz.
Carvalho (2019)	0%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5%	37,5; 35,1; 33,4; 32,5; 34,3	503	0,59	-	72% SiO <sub>2</sub> 9% CaO 13,8% Na <sub>2</sub> O	-	-	Concretos com maiores substituições apresentaram elevada trabalhabilidade e menor resistência à compressão em idades iniciais (<28 dias). Já entre 28 e 56 dias de idade, as amostras com pó de vidro obtiveram um ganho de resistência médio 50% maior em comparação à amostra de referência. O teor de 12,5% de substituição de pó de vidro apresentou maior ganho de resistência à compressão aos 56 dias entre os demais teores.
Wilson <i>et al.</i> (2019)	0% e 30%	-	556	0,19	12	73% SiO <sub>2</sub> 11,3% CaO 13% Na <sub>2</sub> O	-	-	As amostras com substituição do cimento por pó de vidro alcançaram maior fluidez, bem como uma estrutura densa.
Mostofinejad <i>et al.</i> (2020)	0% e 30%	48; 28	543	0,43	-	70,8% SiO <sub>2</sub> 10,1% CaO 11,8% Na <sub>2</sub> O	-	-	Os concretos desenvolvidos apresentaram elevada resistência à compressão e melhoria quanto à resistência ao ataque por sulfato.

Notas: \*Consumo de cimento para o traço sem pó de vidro.

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Mediante análise dos resultados expostos na Tabela 2.5, pode-se afirmar que os teores de substituição do cimento por vidro moído variaram entre 0 e 30%. Apenas os autores Soliman e Tagnit-Hamou (2016) utilizaram 40% e 50% do vidro como material suplementar.

Islam, Rahman e Kazi (2016), Guignone (2017) e Mosaberpanah, Eren e Tarassoly (2018) apontaram que 20% de substituição de cimento por vidro moído é pertinente, e acarretam aumento no desempenho das amostras em relação à resistência à compressão.

As relações água/aglomerantes (a/agl) examinadas variaram entre 0,15 e 0,60. Apenas dois trabalhos utilizaram fibras metálicas em seus estudos. Tagnit-Hamou, Soliman e Omran (2016) e Mosaberpanah, Eren e Tarassoly (2018) incorporaram fibras de aço com teores de 2% e 1%, respectivamente.

Em síntese, as pesquisas apresentadas na Tabela 2.5 constataram que o pó de vidro quando moído em granulometria adequada e incorporado na mistura apresenta atividade pozolânica. Ademais, pode-se citar que a incorporação de pó de vidro promoveu o aumento da resistência à compressão em idades avançadas e incremento da resistência do compósito quanto ao ataque por sulfato e ao ingresso de íons cloreto. O aprimoramento das propriedades no estado fresco e endurecido ocorre devido ao efeito combinado do empacotamentos das partículas, da hidratação do cimento e da reação pozolânica do pó de vidro.

### **2.3 APLICAÇÃO DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM PÓ DE VIDRO**

Tagnit-Hamou *et al.* (2015) desenvolveram um CCUAD com fibras de PVA e incorporação de pó de vidro em substituição parcial ao cimento. O compósito apresentou uma estrutura densa, e a resistência à compressão atingiu o patamar de 127 MPa aos 96 dias, com consumo de cimento e pó de vidro em torno de 555 kg/m<sup>3</sup> e 410 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

O material foi empregado na construção de duas passarelas idênticas, pré-fabricadas e instaladas na Universidade de *Sherbrooke* em Québec, no Canadá. O sistema estrutural das passarelas é formado por uma laje em arco com 4,91 m de comprimento, 2,50 m de largura e 0,075 m de espessura.

As passarelas foram projetadas com seções transversais menores, acarretando uma economia de 60% do volume de concreto; conseqüentemente, houve redução do peso próprio da estrutura e dos custos com manutenção devido ao desempenho aprimorado. A construção das passarelas demonstra o potencial do CCUAD com a incorporação de pó de vidro para produção em grande escala (TAGNIT-HAMOU *et al.*, 2015).



As Figuras 2.15 (a) e (b) ilustram o modelo finalizado e a sua instalação, respectivamente.

**Figuras 2.15 – (a) Passarela. Elemento finalizado no laboratório, antes do envio para o canteiro de obras (esquerda); (b) instalação com a utilização de um guindaste (direita).**



(a)



(b)

Fonte: Tagnit-Hamou *et al.* (2015)

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mediante a revisão realizada na bibliografia sobre o CUADRF e o vidro moído, algumas considerações podem ser mencionadas.

É perceptível o interesse pelo conhecimento e o fomento acerca do CUADRF e de materiais pozolânicos alternativos para o uso do cimento.

Os estudos dispostos ao longo do capítulo indicam que o uso do pó de vidro como material suplementar foi e continua sendo estudado por diversos pesquisadores em diferentes locais do mundo. Em síntese, o pó de vidro moído em partículas menores que  $75\ \mu\text{m}$  participa efetivamente no efeito pozolânico e não promove a reação álcali-sílica, mesmo apresentando grandes quantidades de  $\text{Na}_2\text{O}_e$  (equivalente alcalino). A inserção do material pode acarretar melhoria nas propriedades do estado fresco, endurecido e na durabilidade.

No entanto, ainda são escassos os estudos que abordam o conjunto fibra de aço e pó de vidro em matrizes cimentícias de ultra-alto desempenho e que utilizam teores elevados (acima de 30%) de substituição do cimento por vidro moído.

Logo, dentro desse contexto, o presente trabalho utilizou vidro moído em substituição parcial ao cimento e a incorporação de fibras metálicas visando otimizar as propriedades no estado fresco e endurecido do CUADRF, adequando os tipos e as proporções dos constituintes a fim de reduzir o impacto ambiental do compósito, substituindo o cimento pelo vidro moído em grande quantidade.

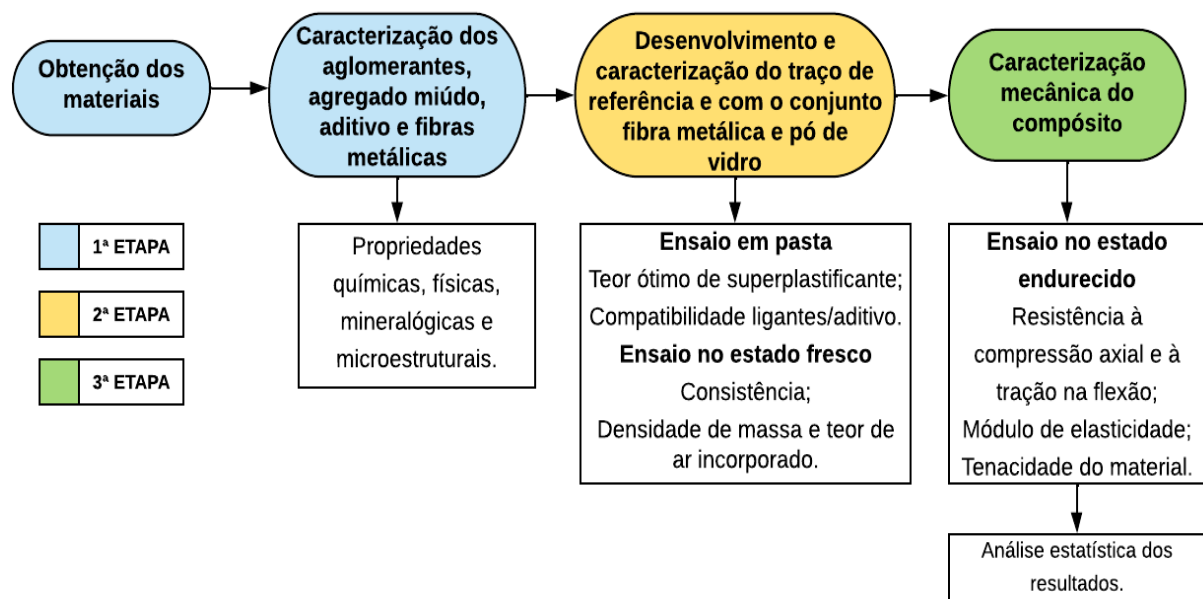
### 3. METODOLOGIA

Com o intuito de analisar o efeito da incorporação do pó de vidro e das fibras metálicas em compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho (CCUAD), o programa experimental adotado buscou determinar as propriedades físicas e mecânicas do CCUAD.

Destaca-se que a presente pesquisa é uma continuidade de estudos realizados por pesquisadores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), *campus* de Caraguatatuba/SP (SALVADOR FILHO *et al.*, 2017). A pesquisa também se relaciona com outros estudos que foram e ainda estão sendo desenvolvidos no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pelo Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana (Gesec).

O programa experimental foi dividido em três etapas: obtenção dos insumos, caracterização química, física, mineralógica e microestrutural dos materiais; definição dos traços e moldagem dos corpos de prova; bem como caracterização mecânica dos compósitos cimentícios. Um fluxograma geral da pesquisa está apresentado na Figura 3.1. Ressalta-se que a primeira etapa foi realizada pelos participantes do Gesec. As etapas do programa experimental estão descritas a seguir.

Figura 3.1 – Etapas gerais do programa experimental.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

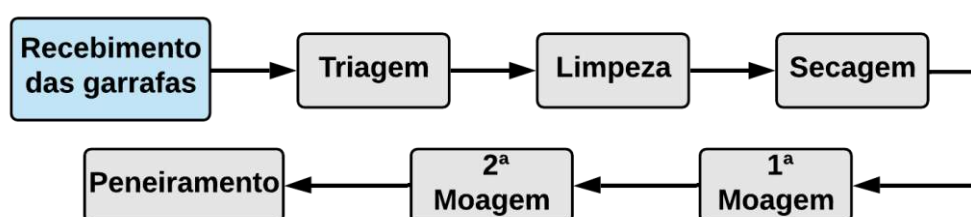
A obtenção e a caracterização dos materiais corresponderam à primeira etapa do programa experimental. Os materiais utilizados na produção dos compósitos cimentícios estão listados a seguir:

- Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), da *Holcim* do Brasil;
- Sílica ativa do tipo microsílca 920U, da *Elkem Materials South America*;
- Pó de vidro com tamanho de partículas inferior a 75 µm;
- Agregado miúdo quartzoso proveniente de leito de rio e peneirado manualmente em malha de abertura de 1,2 mm;
- Água do sistema de abastecimento da cidade de São Carlos/SP;
- Fibras de aço – *Dramix® OL 13/.20*, da *Belgo Bekaert Arames*;
- Aditivo superplastificante à base de policarboxilatos (*Tec Flow 8000*) e redutor de retração (*Eclipse*), ambos da *GCP Applied Technologies*.

Os materiais adotados são encontrados e comercializados na região Sudeste do Brasil, à exceção do pó de vidro, que foi processado pelo grupo de pesquisa do Gesec.

O vidro moído empregado no estudo advém de garrafas de bebidas disponibilizadas por estabelecimentos comerciais da cidade de São Carlos/SP. As etapas do beneficiamento do material são apresentadas no fluxograma presente na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Etapas do beneficiamento do vidro.

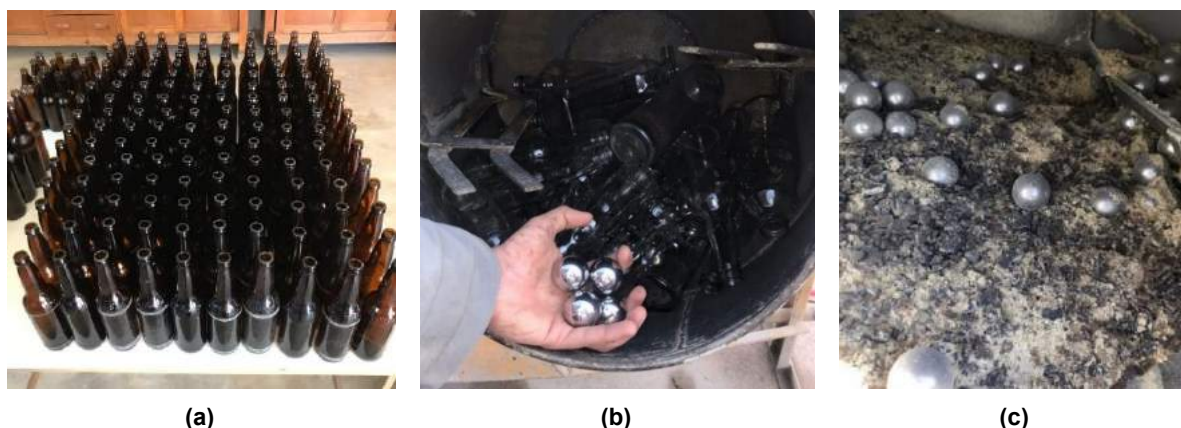


Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Após o recebimento das garrafas no laboratório, os recipientes passaram por uma triagem, tendo sido separadas apenas as garrafas na cor âmbar. Posteriormente, iniciou-se a limpeza, que consistiu na retirada dos rótulos e da cola. As garrafas foram dispostas em ambiente aberto e arejado para a primeira secagem, conforme ilustrado na Figura 3.3 (a).

Em seguida, ocorreu a primeira etapa de moagem: as garrafas foram processadas em uma betoneira com esferas de aço e transformadas em cacos. As Figuras 3.3 (b) e (c) exibem o antes e o depois do procedimento, respectivamente.

**Figuras 3.3 – (a) Garrafas limpas e dispostas em ambiente seco e arejado. Primeira moagem do material; (b) antes da moagem (esquerda); (c) vidro após a moagem (direita).**



Fonte: Oliveira Jr. (2020)

Logo em seguida, foi realizada a segunda etapa de moagem do material. Foram processados 250 kg de vidro em um moinho por via seca durante 14 horas. O equipamento utilizado possuía revestimento de sílex, rocha sedimentar silicatada, e as bolas utilizadas para o processo de moagem eram do mesmo material. A Figura 3.4 apresenta o equipamento utilizado e o pó de vidro após a segunda etapa de moagem.

**Figura 3.4 – Moinho utilizado e o pó de vidro após a segunda moagem.**

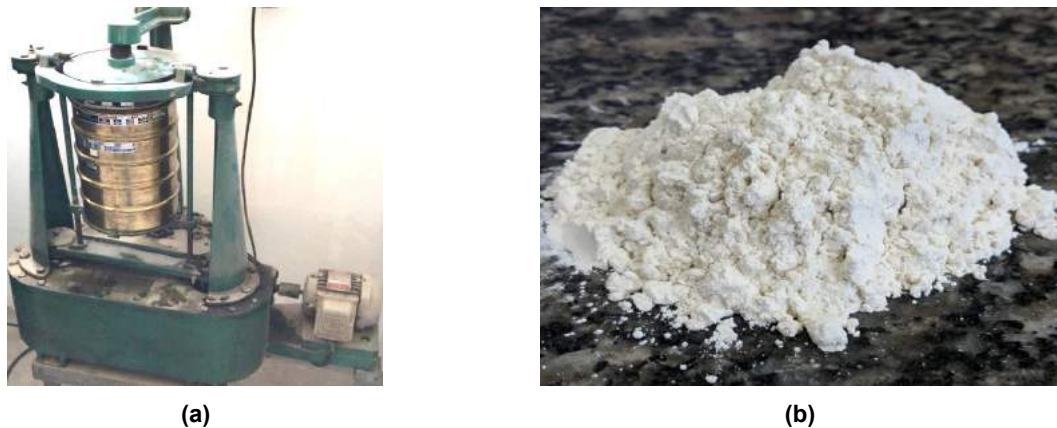


Fonte: Freitas (2019)

Após a segunda moagem, o material foi seco em estufa a 105°C por 24 horas. Em seguida, foi realizado o peneiramento mecânico mediante agitador de peneiras *Ro-Tap*, obtendo-se o vidro finamente moído passante na peneira #200, com partículas menores de 75 µm. Por fim, o material foi armazenado em uma sacola de papel *kraft* protegida por um saco plástico.

As Figuras 3.5 (a) e (b) apresentam o equipamento utilizado e o pó de vidro final, respectivamente.

Figuras 3.5 – (a) Peneirador mecânico (esquerda); (b) pó de vidro passado na #200 (75 µm) (direita).

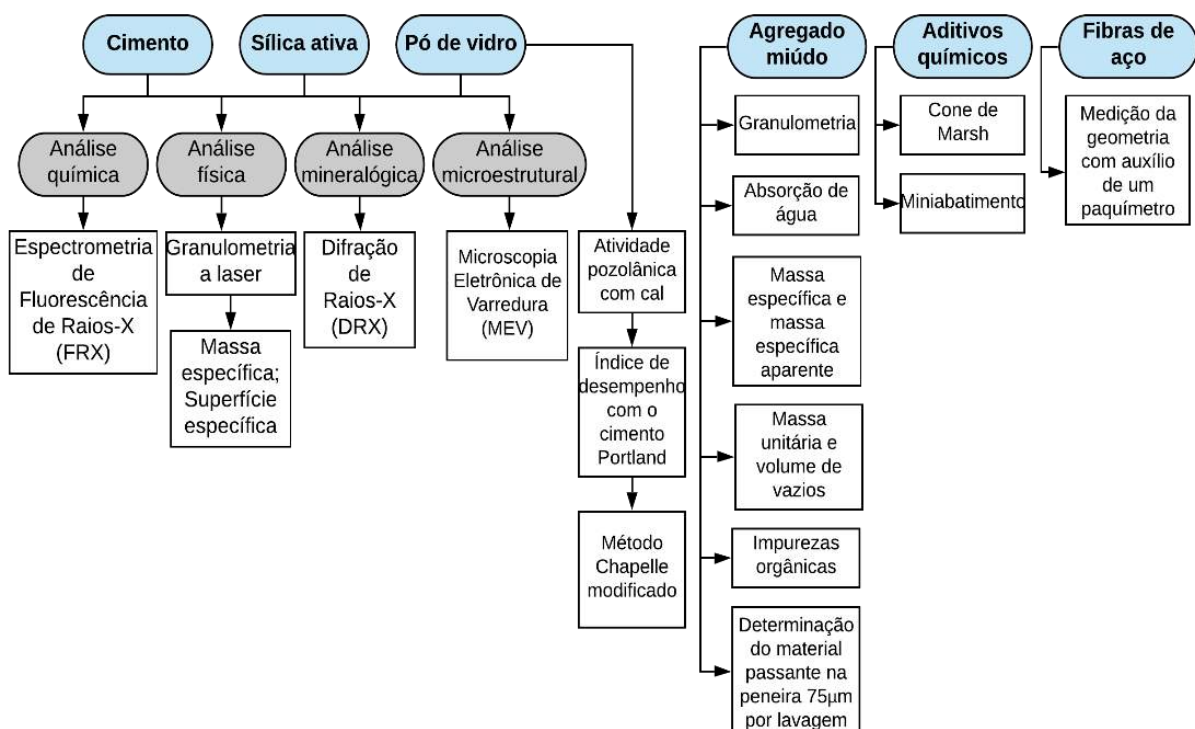


Fonte: Acervo da autora (2022)

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A etapa de caracterização dos materiais foi realizada pelos integrantes do Gesec. Nessa fase, foram analisadas as propriedades químicas, físicas, mineralógicas e microestruturais dos componentes: cimento, sílica ativa, pó de vidro, agregado miúdo, aditivo superplastificante, aditivo redutor de retração e fibras metálicas. A Figura 3.6 exibe um fluxograma geral dos ensaios realizados. No apêndice A, são apresentados os métodos adotados e as normas correspondentes.

Figura 3.6 – Ensaio de caracterização dos materiais.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

### 3.2.1 Aditivos

Foi adicionado à mistura dos compósitos cimentícios um aditivo superplastificante à base de policarboxilato (*TECFLOW 8000*) e um aditivo redutor de retração (*Eclipse*), ambos caracterizados pela fabricante *GCP Applied Technologies*. O ensaio de pH dos aditivos foi realizado no LMC situado na UFSCar.

### 3.2.2 Fibras de aço

Utilizaram-se fibras de aço carbono, retas e sem ancoragem, com 0,20 mm de diâmetro e 13 mm de comprimento (fator de forma igual a 65), sendo classificadas como tipo R, de acordo com a NBR 15530 (ABNT, 2019). As características das fibras metálicas foram fornecidas pelo fabricante *Belgo Bekaert Arames*.

## 3.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

### 3.3.1 Estudos em pasta

A fim de averiguar a compatibilidade entre os aglomerantes (cimento, sílica ativa e pó de vidro) e o aditivo superplastificante, foram realizados os ensaios Cone de Marsh, miniabatimento e tempos de pega. Os ensaios foram realizados pelos integrantes do Gesec. A descrição dos experimentos encontra-se no Apêndice A.

### 3.3.2 Definição dos traços

Os traços produzidos são uma continuidade das pesquisas desenvolvidas por Salvador Filho *et al.* (2017) e Soares (2021). No entanto, para a presente pesquisa, foram incorporadas fibras metálicas nos compósitos cimentícios desenvolvidos. Os teores de adição de fibras de aço adotados foram definidos mediante a determinação do teor máximo de fibras proposto por Martinie, Rossi e Roussel (2010) e modificado por Christ (2019).

#### 3.3.2.1 Determinação do teor máximo de fibras

Optou-se por utilizar o método de determinação do teor máximo estabelecido por Martinie, Rossi e Roussel (2010) e modificado por Christ (2019), uma vez que a adoção da metodologia considera o fator de forma da fibra metálica, bem como as massas unitária e específica do agregado miúdo. A Equação 3-1 apresenta-se abaixo.

$$T_{fibras} = \frac{400}{r} * \left(1 - \frac{M_{unitária}}{M_{específica}}\right) \quad \text{Equação 3-1}$$

Fonte: Martinie, Rossi e Roussel (2010) e modificada por Christ (2019).



Nela:

$T_{fibras}$  é o teor máximo de fibras a ser inserido na mistura (%);

$r$  é a relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra, ou seja, o fator de forma (mm/mm);

$M_{unitária}$  é a massa unitária do agregado miúdo ( $g/cm^3$ );

$M_{específica}$  é a massa específica do agregado miúdo ( $g/cm^3$ );

Logo, uma vez que  $r$  corresponde a 65 mm/mm, e as massas unitária e específica do agregado equivalem  $1,475 g/cm^3$  e  $2,560 g/cm^3$ , respectivamente, obteve-se o  $T_{fibras}$  igual a 2,61%, conforme apresentado na Equação 3-2.

$$T_{fibras} = \frac{400}{65} * \left(1 - \frac{1,475}{2,560}\right) = 2,61\% \quad \text{Equação 3-2}$$

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Dessa forma, os teores de fibras de aço em relação ao volume de material adotado foram 2% e 3%. O teor correspondente a 3% foi utilizado devido à proximidade com o teor máximo estipulado pelo método. Também foi constatado por meio do ensaio de determinação de índice de consistência que não houve perdas significativas quanto à trabalhabilidade das misturas com 3% de adição de fibras metálicas (em volume). O resultado do ensaio será apresentado no quarto capítulo. O teor de 3% também foi utilizado por Abbas, Soliman e Nehdi (2015), Wu *et al.* (2016) e Le Hoang e Fehling (2017).

### 3.3.2.2 Parâmetros

Para todos os traços avaliados, foi estabelecida a relação água/aglomerante ( $a/agl$ ) igual a 0,18, e o vidro moído foi considerado como aglomerante para o cálculo da  $a/agl$ . Houve a adição de 8% de sílica ativa em relação ao consumo de cimento (em massa). A incorporação de pó de vidro foi realizada nos teores de 20% e 50% em substituição volumétrica parcial do cimento. Os teores de adição volumétrica de fibras metálicas empregados foram de 2% e 3%.

Os parâmetros que se mantiveram fixos foram: o tipo de cimento, o tipo e o consumo de sílica ativa (8% em massa), o agregado miúdo, a relação ( $a/agl$ ) e o teor dos aditivos superplastificante e redutor de retração.

Como variáveis do estudo, têm-se os teores de pó de vidro empregados em substituição volumétrica do cimento e, conseqüentemente, o consumo de cimento das misturas, bem como a adição volumétrica de fibras metálicas. As nomenclaturas e especificidades dos traços avaliados estão descritas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Nomenclatura adotada para os traços estudados.**

Nomenclatura	Composição
REF	Traço referência com 8% de sílica ativa (em massa), 0% de pó de vidro e adição de 0% de fibras de aço
PV20-F2	Traço com 8% de sílica ativa (em massa), 20% de substituição do cimento por vidro moído (em volume) + adição de 2% de fibras de aço (em volume)
PV20-F3	Traço com 8% de sílica ativa (em massa), 20% de substituição do cimento por vidro moído (em volume) + adição de 3% de fibras de aço (em volume)
PV50-F2	Traço com 8% de sílica ativa (em massa), 50% de substituição do cimento por vidro moído (em volume) + adição de 2% de fibras de aço (em volume)
PV50-F3	Traço com 8% de sílica ativa (em massa), 50% de substituição do cimento por vidro moído (em volume) + adição de 3% de fibras de aço (em volume)

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

O consumo de materiais em kg/m<sup>3</sup> empregado no estudo pode ser observado na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Consumo de cada material constituinte dos compósitos cimentícios estudados em kg/m<sup>3</sup>.**

Traços	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	Água*	SP**	RR***	Fibra de aço
REF	1000,00	80,00	0,00	1074,25	181,28	24,30	10,80	0,00
PV20-F2	800,00	80,00	161,40	1074,25	181,28	24,30	10,80	162,25
PV20-F3	800,00	80,00	161,40	1074,25	181,28	24,30	10,80	245,88
PV50-F2	500,00	80,00	403,48	1074,25	181,28	24,30	10,80	162,25
PV50-F3	500,00	80,00	403,48	1074,25	181,28	24,30	10,80	245,88
PV50	500,00	80,00	403,48	1074,25	181,28	24,30	10,80	0,00

\* Valor de água corrigido em relação aos 46% de sólidos do superplastificante

\*\* SP = Superplastificante

\*\*\* RR = Redutor de retração

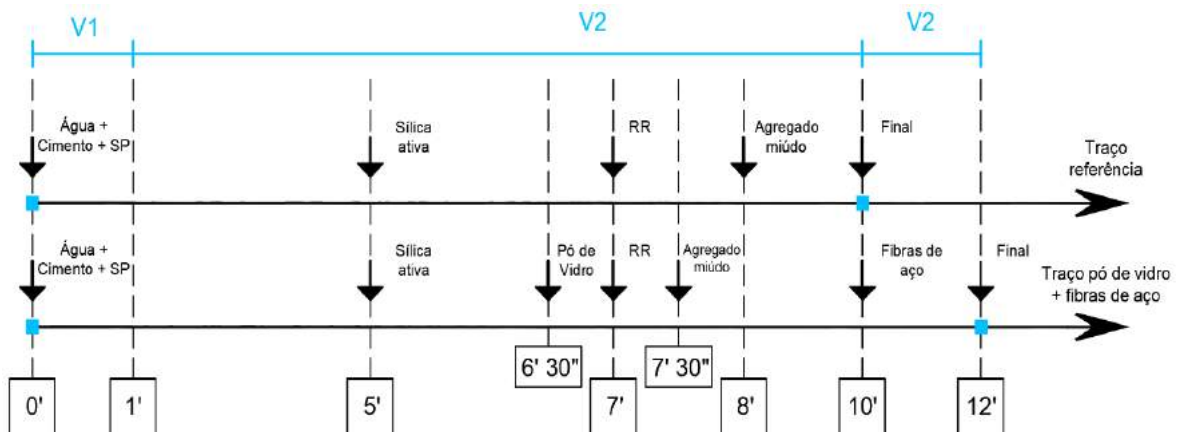
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Foi realizada a determinação do índice de consistência dos traços objetivando a manutenção da trabalhabilidade dos compósitos. A consistência dos compósitos cimentícios foi analisada conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016).

Destaca-se que a relação a/agl igual a 0,18 manteve-se fixa para todos os traços avaliados. O procedimento de mistura dos compósitos é apresentado na Figura 3.7. Ressalta-se que V1 corresponde à velocidade de 180 rpm, enquanto V2 equivale à velocidade de 240 rpm; SP representa o superplastificante, e RR, o redutor de retração.



Figura 3.7 – Procedimento de mistura dos compostos.



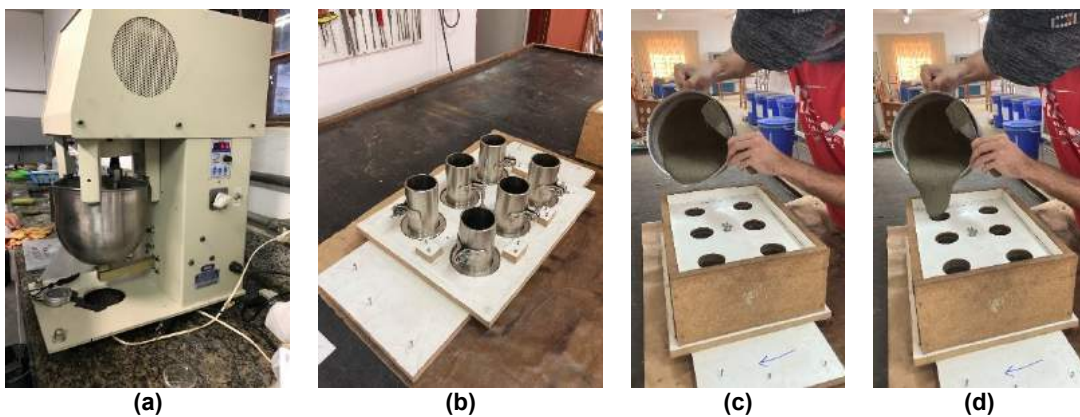
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Devido à capacidade máxima da argamassadeira (5 L), as amostras foram produzidas em lotes estabelecidos por ordem decrescente de idade de ruptura. Primeiramente, foram moldados os corpos de prova para os ensaios que seriam realizados aos 91 dias de idade, em seguida as amostras que seriam rompidas aos 56 dias, e, por fim, os corpos de prova que seriam ensaiados aos 28 dias. A Figura 3.8 (a) apresenta o equipamento utilizado.

Todos os corpos de prova foram moldados em camada única. As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10, apresentam os processos de moldagens dos corpos de prova cilíndricos (50x100 mm), (100x200 mm) e prismáticos (40x40x160 mm), respectivamente.

Hassan, Jones e Mahmud (2012), Agüero *et al.* (2019) e Hu, He e Zhang (2020) realizaram o adensamento mediante mesa vibratória durante 1 min. Logo, optou-se por utilizar o adensamento por meio da mesa vibratória com duração de aproximadamente 30 seg, uma vez que vibração demasiada poderia causar segregação do material.

Figuras 3.8 – (a) Argamassadeira utilizada no procedimento de mistura dos materiais; (b), (c) e (d) moldagem dos corpos de prova cilíndricos (50 mmx100 mm).



Fonte: Acervo da autora (2022)

**Figura 3.9 – Moldagem dos exemplares cilíndricos (100x200 mm).**



Fonte: Acervo da autora (2022)

**Figura 3.10 – Moldagem dos espécimes prismáticos (40x40x160 mm).**



Fonte: Acervo da autora (2022)

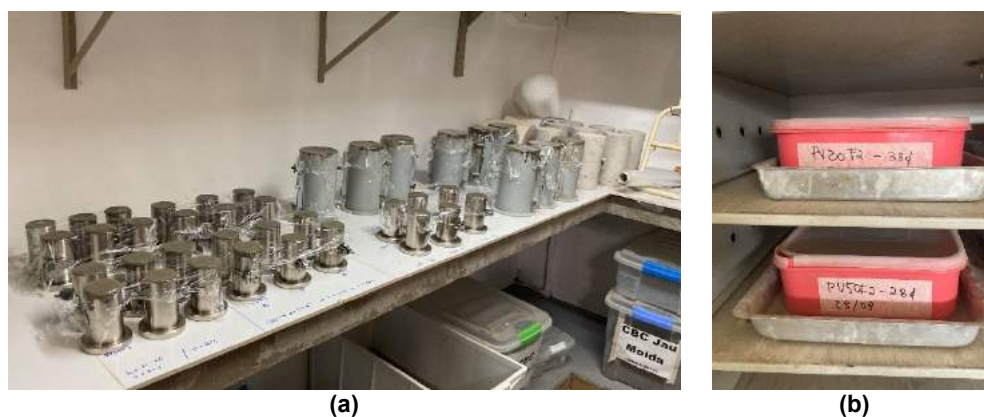
Após a moldagem, as amostras foram armazenadas em uma câmara em temperatura ambiente e cobertas por plástico filme (Figura 3.11 (a)). Os espécimes foram desmoldados após 24 horas. Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água por mais um período de 24 horas em temperatura ambiente, antes de serem submetidos à cura térmica. Essa espera ocorreu em razão de os traços PV50, PV50-F2 e PV50-F3 não apresentarem resistência suficiente.

Posteriormente, os compósitos foram levados para a estufa, onde permaneceram submersos em água durante 48 horas, com temperatura igual a  $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.11 (b)). Por fim, as amostras foram retiradas da estufa e continuaram imersas em água saturada com cal em temperatura ambiente até a realização dos ensaios.

Yoo *et al.* (2015) e Yoo *et al.* (2016) submeteram concretos de ultra-alto desempenho reforçados com fibras metálicas à cura térmica com vapor ( $90^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) durante 72 horas. Já Azreen *et al.* (2018) utilizaram cura térmica imersa ( $90^{\circ}\text{C}$ ) com duração de 72 horas. Blais e Couture (1999) e Hassan, Jones e Mahmud (2012) aplicaram cura térmica imersa ( $90^{\circ}\text{C}$ ) por um período de 48 horas, enquanto Kou e Xing (2012) adotaram cura térmica imersa em  $90^{\circ}\text{C}$

por 24 horas. Sendo assim, o processo de cura adotado foi escolhido em decorrência das melhores práticas aplicadas por pesquisadores e respeitando a especificidade dos traços avaliados, visando ao aprimoramento do comportamento mecânico do material.

**Figuras 3.11 – Armazenamento das amostras (a) após a moldagem (esquerda); (b) durante a cura térmica (direita).**



Fonte: Acervo da autora (2022)

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

As especificidades dos ensaios realizados para a caracterização dos compósitos cimentícios estão descritas na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Ensaios realizados para caracterização dos compósitos cimentícios.**

Característica	Estado	Metodologia	CPs (unidade)	Formato e dimensão dos CPs	Idades (dias)
Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )	Fresco	NBR 13278 (ABNT, 2005)	2 verificações	Cilíndrico 80x85 mm	-
Teor de ar incorporado (%)	Fresco	NBR 13278 (ABNT, 2005)	2 verificações	Cilíndrico 80x85 mm	-
Resistência à compressão axial (MPa)	Endurecido	NBR 5739 (ABNT, 2018)	6	Cilíndrico 50x100 mm	28, 56 e 91
Módulo de elasticidade estático (GPa)	Endurecido	NBR 8522 (ABNT, 2021)	3	Cilíndrico 50x100 mm	28
Resistência à tração na flexão (MPa)	Endurecido	NBR 13279 (ABNT, 2005)	6	Prismático 40x40x160 mm	28
Determinação das resistências residuais à fissuração à tração por duplo puncionamento (MPa)	Endurecido	NBR 16939 (ABNT, 2021)	6	Cilíndrico 100x100 mm	28, 56 e 91

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

### 3.4.1 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A determinação da densidade de massa e de teor de ar incorporado dos compósitos cimentícios foi executada conforme preconização da NBR 13278 (ABNT, 2005). A Figura 3.12 ilustra o aparato utilizado durante a execução do ensaio.

Figura 3.12 – Ensaio de densidade de massa e de teor de ar incorporado.

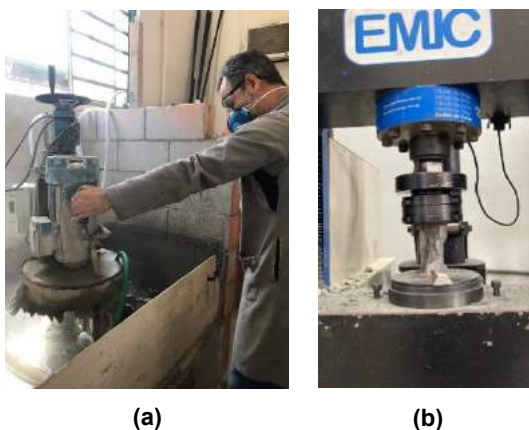


Fonte: Acervo da autora (2022)

### 3.4.2 Resistência à compressão axial

As análises das resistências à compressão axial foram realizadas conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de 28, 56 e 91 dias. Antes da ruptura, as amostras foram retificadas para garantir uma distribuição uniforme do esforço durante a aplicação da carga. Durante o ensaio, também foram utilizadas placas de madeira entre a superfície do pistão e do corpo de prova para garantir homogeneidade na distribuição da carga. Os corpos de prova foram ensaiados na Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade de carga de 600 kN. As Figuras 3.13 (a) e (b) ilustram o procedimento.

Figuras 3.13 – Ensaio de resistência à compressão axial: a) retífica dos corpos de prova; b) corpo de prova após ruptura do ensaio de resistência à compressão.



(a)

(b)

Fonte: (a) Freitas (2019); (b) Acervo da autora (2022)

### 3.4.3 Módulo de elasticidade estático

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada de acordo com a metodologia A, estipulada pela NBR 8522 (ABNT, 2021), na idade de 28 dias. Primeiramente, foram colocados medidores de deformação nas faces da amostra; posteriormente, os corpos de prova foram ensaiados na Máquina Universal de Ensaio EMIC com capacidade de carga de 600 kN. A Figura 3.14 exibe o aparato utilizado durante o experimento.

Figura 3.14 – Aparato e corpo de prova durante ensaio de determinação de módulo de elasticidade.



Fonte: Acervo da autora (2022)

### 3.4.4 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão dos compósitos cimentícios foi determinada de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) na idade de 28 dias. Os corpos de prova foram ensaiados na Máquina Universal de Ensaio EMIC com capacidade de carga de 600 kN. A Figura 3.15 exibe o aparato utilizado no procedimento.

Figura 3.15 – Aparato e corpo de prova durante ensaio de determinação de resistência à tração na flexão.



Fonte: Acervo da autora (2022)

### 3.4.5 Resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento

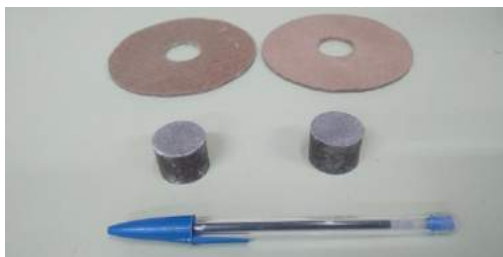
A determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento dos compósitos cimentícios foi aferida conforme preconização da NBR 16939 (ABNT, 2021), nas idades de 28, 56 e 91 dias.



Foram moldados corpos de prova com 100 mm de diâmetro ( $d$ ) e 200 mm de altura ( $H$ ). Em seguida, as amostras foram cortadas ao meio, e obtiveram-se espécimes com 100 mm de diâmetro ( $d$ ) e 100 mm de altura ( $H$ ), mantendo a relação  $d=H$  e a dimensão mínima recomendada pela NBR 16939 (ABNT, 2021). De acordo com Monte (2015), o emprego de corpos de prova menores (mínimo  $d=100$  mm e  $H=100$  mm) possibilita a utilização de uma máquina de ensaio com menor capacidade, já que as cargas de puncionamento usualmente são inferiores a 10 tf.

O carregamento foi aplicado mediante dois cilindros usinados em aço carbono que possuíam 20 mm de altura e 25 mm de diâmetro. Os discos foram centralizados na face dos corpos de prova com o auxílio de placas de madeira (gabarito) para garantir o correto posicionamento dos cilindros e o espécime. Os discos e as placas de madeira estão ilustrados na Figura 3.16.

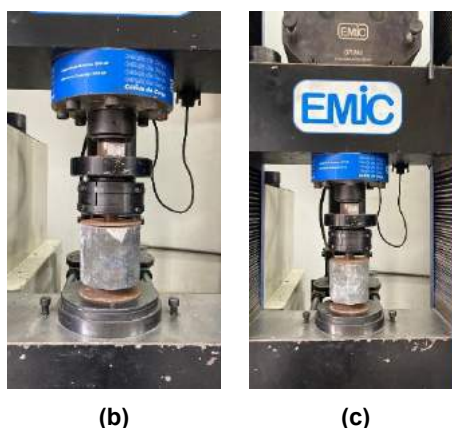
**Figura 3.16 – Discos de aço carbono e placas de madeira.**



Fonte: Acervo da autora (2022)

A velocidade de deslocamento vertical adotada foi 0,50 mm/min, e o ensaio foi finalizado quando o deslocamento total medido atingiu 7 mm, garantindo os 4 mm de deslocamento vertical mínimo após a carga de fissuração ( $P_f$ ) estipulado pela NBR 16939 (ABNT, 2021). Os corpos de prova foram ensaiados na Máquina Universal de Ensaio EMIC com capacidade de carga de 600 kN. As Figuras 3.17 (a) e (b) exibem o aparato utilizado durante o experimento.

**Figuras 3.17 – EDP: (a) e (b) – aparato utilizado durante ensaio de duplo puncionamento.**



Fonte: Acervo da autora (2022)

### 3.4.5.1 Cálculo da resistência à tração por duplo puncionamento

Para a determinação da resistência à tração por duplo puncionamento ( $f_t$ ), o parâmetro principal é a carga de fissuração ( $P_f$ ). O cálculo da resistência à tração por duplo puncionamento (fissuração) foi realizado de acordo com a Equação 3-3 (ABNT NBR 16939, 2021).

$$f_t = \frac{4 * P_f}{9 * \pi * a * H} \quad \text{Equação 3-3}$$

Em que:

$f_t$  é a resistência à tração por duplo puncionamento (fissuração) (MPa);

$P_f$  é a carga que produz a fissuração (N);

$a$  é o diâmetro do disco de aplicação da carga (mm);

$H$  é a altura do corpo de prova (mm).

### 3.4.5.2 Cálculo das resistências residuais

O cálculo das resistências residuais ( $f_{R,\delta p}$ ) para os diferentes níveis de deslocamento vertical ( $\delta_p$ ), contados a partir da carga de fissuração ( $P_f$ ), foi realizado conforme a Equação 3-4.

$$f_{R,\delta p} = \frac{4 * P_f}{9 * \pi * a * H} \quad \text{Equação 3-4}$$

Dessa forma,

$f_{R,\delta p}$  é a resistência residual correspondente a um deslocamento vertical  $\delta_p$  (MPa);

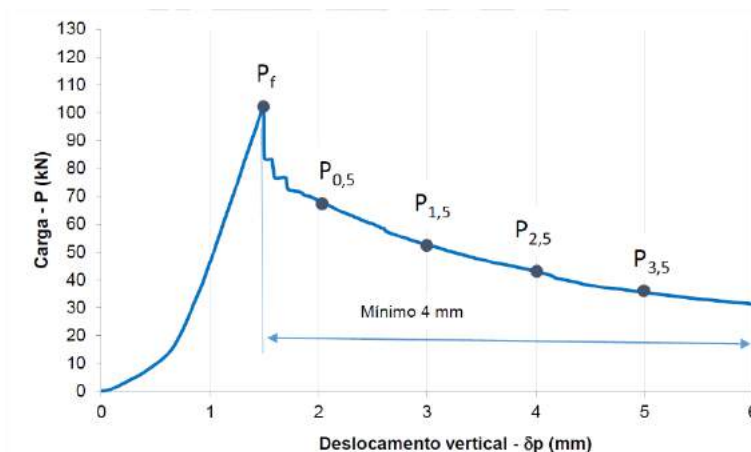
$P_{R,\delta p}$  é a carga residual correspondente a um deslocamento vertical  $\delta_p$  (N);

$a$  é o diâmetro do disco de aplicação da carga (mm);

$H$  é a altura do corpo de prova (mm).

Os valores das resistências residuais foram determinados mediante 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm e 3,5 mm de deslocamento vertical pós-fissuração ( $\delta_p$ ), conforme apresentado na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Níveis de deslocamento adotados para a verificação das resistências residuais.



Fonte: NBR 16939 (ABNT, 2021)

### 3.4.5.3 Cálculo da tenacidade

A determinação da tenacidade, expressa em joules (J), foi calculada mediante a área abaixo da curva de carga ( $P$ ) por deslocamento vertical ( $\delta_p$ ) após a carga de fissuração ( $P_f$ ). Para o cálculo da tenacidade, foi utilizado o *software OriginPro®*.

### 3.4.6 Análise estatística dos resultados

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

O método da ANOVA realiza um teste estatístico para verificar se há diferença na distribuição de um valor entre três ou mais grupos. Ele é feito mediante 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 estaticamente diferente.

Compara-se também o valor-p com o  $\alpha$ . Para este trabalho, o  $\alpha$  adotado foi de 5%.

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

Para os casos onde  $H_0$  foi rejeitado, realizou-se o teste de *Tukey* utilizando o *software* gratuito de análises estatísticas *Past®*. Os resultados completos das análises estatísticas estão dispostos nos apêndices.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados da definição dos traços e a avaliação mecânica dos compósitos cimentícios, incluindo as devidas análises estatísticas obtidas nesta pesquisa.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Cimento, sílica ativa, pó de vidro, agregado miúdo

Os resultados da caracterização dos materiais obtidos pelos participantes do Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana (Gesec) encontram-se no Apêndice B.

#### 4.1.2 Aditivos

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as propriedades do aditivo superplastificante e redutor de retração, respectivamente. O superplastificante é comercializado com a nomenclatura *TEC-FLOW 8000*. Já o nome comercial do redutor de retração é *Eclipse*.

**Tabela 4.1 – Propriedades do aditivo superplastificante.**

Características	<i>TEC-FLOW 8000</i>
Aspecto/cor	Líquido/amarelo claro
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) ((ABNT NBR 10908 (2009))	1,080 -1,120
Teor de sólidos (%)	44,35 – 49,01
pH*	5,52

\*Ensaio realizado no LMC da UFSCar.

Fonte: *Grace – GCP Applied Technologies (2017)*

**Tabela 4.2 – Propriedades do aditivo redutor de retração.**

Características	<i>Eclipse</i>
Aspecto/cor	Líquido/transparente
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) ((ABNT NBR 10908 (2009))	0,91
pH*	5,95

\*Ensaio realizado no LMC da UFSCar.

Fonte: *Grace – GCP Applied Technologies (2017)*

### 4.1.3 Fibras metálicas

As características das fibras metálicas foram proporcionadas pelo fornecedor e estão descritas na Tabela 4.3. As fibras são comercializadas com a nomenclatura *Dramix® OL 13/20*

**Tabela 4.3 – Propriedades da fibra de aço.**

Propriedade	Dimensão
Comprimento - $L_f$ (mm)	13
Diâmetro - $d_f$ (mm)	0,20
Resistência à tração (N/mm <sup>2</sup> )	2.750
Módulo de Elasticidade (N/mm <sup>2</sup> )	200.000
Fator de forma ( $\lambda$ )	65
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	7,95

**Fonte: Dramix (2020)**

As fibras de aço são lisas e sem ancoragem, sendo classificadas como tipo R de acordo com a NBR 15530 (ABNT, 2019). A Figura 4.1 apresenta a fibra de aço utilizada.

**Figura 4.1 – Fibras metálicas – *Dramix® OL 13/20*.**



Fonte: Acervo da autora (2021)

As fibras com  $L_f$  igual a 13 mm e  $d_f$  igual a 0,20 mm são comumente utilizadas em estudos que abordam o concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (CHRIST, 2014; YOO *et al.*, 2015; TAGNIT-HAMOU; SOLIMAN; OMRAN, 2016; YOO *et al.*, 2016; YOO; KANG; YOON, 2016; OLIVEIRA, 2019).

## 4.2 ESTUDOS EM PASTA

Os estudos em pasta foram realizados pelos integrantes do Gesec. Os resultados e discussões obtidos encontram-se no Apêndice B.

### 4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

Na Tabela 4.4, encontram-se o traço unitário e os índices de consistência dos compósitos cimentícios.

**Tabela 4.4 – Traço unitário e índice de consistência dos compósitos cimentícios.**

Traço	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	Água	SP*	Redutor de retração	Fibra de aço	Consistência (mm)
REF	1,000	0,080	0,000	1,070	0,194	0,020	0,010	0,000	346
PV20****	1,000	0,100	0,201	1,343	0,243	0,030	0,014	0,000	375
PV20-F2								**	300
PV20-F3								***	312
PV50****	1,000	0,160	0,810	2,150	0,389	0,049	0,022	0,00	330
PV50-F2								**	290
PV50-F3								***	385

\* Superplastificante (SP)

\*\* Consumo igual a 162,25 kg/m<sup>3</sup>

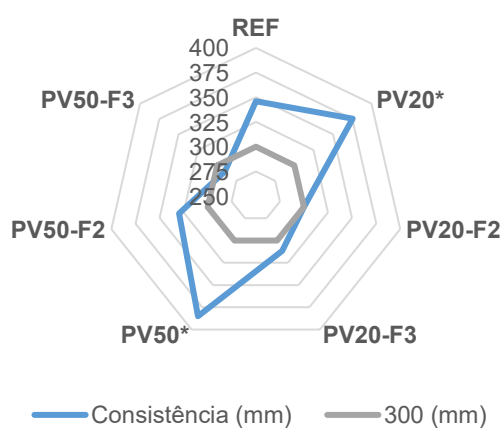
\*\*\* Consumo igual a 245,88 kg/m<sup>3</sup>

\*\*\*\* Fonte: Soares (2021)

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A Figura 4.2 apresenta os índices de consistência dos traços analisados em relação ao mínimo adotado (310 mm±10 mm).

**Figura 4.2 – Consistência dos compósitos cimentícios.**



\* Fonte: Soares (2021)

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Observa-se que os traços que não contêm fibras metálicas (REF, PV20 e PV50) apresentam índices de consistência maiores que o índice mínimo adotado (310 mm±10 mm). Em relação aos traços com incorporação de 2% de fibras de aço, o PV20-F2 exibiu

espalhamento de acordo com o limite do índice adotado, enquanto o PV50-F2 apresentou espalhamento maior que o índice mínimo de referência.

Os traços com 3% de adição de fibras metálicas apresentaram comportamentos distintos. O PV20-F3 apresentou espalhamento de acordo com o índice de referência. Já o traço PV50-F3 reportou espalhamento ligeiramente menor (3,3%) que o mínimo adotado.

A Figura 4.3 apresenta os espalhamentos dos traços analisados neste estudo. Observa-se que não houve processos de segregação ou exsudação nos traços analisados.

**Figura 4.3 – Consistência dos compósitos cimentícios.**



Fonte: Acervo da autora (2022)

Wu *et al.* (2016) observaram que a adição de 2% e 3% de fibras de aço nos compósitos cimentícios acarretou a redução da fluidez das misturas em 25,6% e 38,1%, respectivamente, atribuindo esse comportamento ao aumento da área de superfície específica associada ao aumento do teor de fibras.

O aumento da superfície específica na matriz cimentícia requer uma maior área de molhagem; dessa forma, há uma menor disponibilidade de água para fluidificação do compósito (FIGUEIREDO, 2011). No entanto, de acordo com o autor, os principais fatores que reduzem a trabalhabilidade dos compósitos são a dimensão das fibras e seu grau de rigidez, uma vez que tais fatores ocasionam uma maior dificuldade de mobilidade, dificultando a fluidez da mistura.

Soares (2021) avaliou os mesmos traços do presente estudo, porém sem adição de fibras metálicas (REF, PV20 e PV50). A diferença entre os traços com incorporação de pó de vidro e o traço referência variou de 0,9% a 3,2%. Portanto, conclui-se que quanto maior a adição de pó de vidro, maior a trabalhabilidade.

Logo, a substituição do cimento por vidro moído pode acarretar melhoria na trabalhabilidade dos compósitos cimentícios, como constatado por Soliman e Tagnit-Hamou (2016), Islam, Rahman e Kazi (2017), Salvador Filho *et al.* (2017), Lee *et al.* (2018), Mosaberpanah, Eren e Tarassoly (2019) e Soares (2021).

Segundo os autores, o vidro possui formato angular e superfície lisa. Tais características também foram observadas neste estudo, mediante o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme apresentado no apêndice B. A superfície lisa do vidro moído ocasiona menor atrito entre as partículas. Além disso, quando comparado ao cimento, o vidro moído absorve menos água, conseqüentemente promove maior disponibilidade de água para fluidificação da matriz cimentícia.

Outro fator apontado pelos autores é a menor superfície específica da partícula de pó de vidro, promovendo mais água para fluidificar a matriz. Observa-se que quando o cimento, que tem superfície específica de 665,0 m<sup>2</sup>/kg, é substituído por pó de vidro com superfície específica de 393,0 m<sup>2</sup>/kg, a superfície específica total da mistura diminui. Para os teores avaliados, 20% e 50% de incorporação de pó de vidro, a diminuição na superfície específica equivale a 11,9% e 47,6%, respectivamente. Dessa forma, há maior disponibilidade de água para fluidificar a matriz.

Barros (2016) constatou que os valores de consistência diminuíram à medida que aumentou o teor de substituição de cimento por pó de vidro. De acordo com o autor, esse comportamento ocorre devido à menor hidratação das misturas. Vaitkevičius, Šerelis e Hilbig (2014) e Soliman e Tagnit-Hamou (2016) destacam que o pó de vidro pode reduzir a quantidade de água da mistura e, em outros casos, atua de maneira oposta. Tais comportamentos dependem da distribuição do tamanho e das irregularidades das partículas, assim como do empacotamento delas, e também da superfície específica.

Sendo assim, conclui-se que, apesar de a fibra metálica e o pó de vidro proporcionarem características antagônicas no estado fresco da matriz cimentícia, não houve perdas significativas à trabalhabilidade da mistura, visto vez que apenas o traço PV50-F3 exibiu índice de consistência menor (3,3%) que o de referência.

## 4.4 ESTUDO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

### 4.4.1 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado nos compósitos cimentícios no estado fresco podem ser observados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Densidade de massa e teor de ar incorporado dos traços.

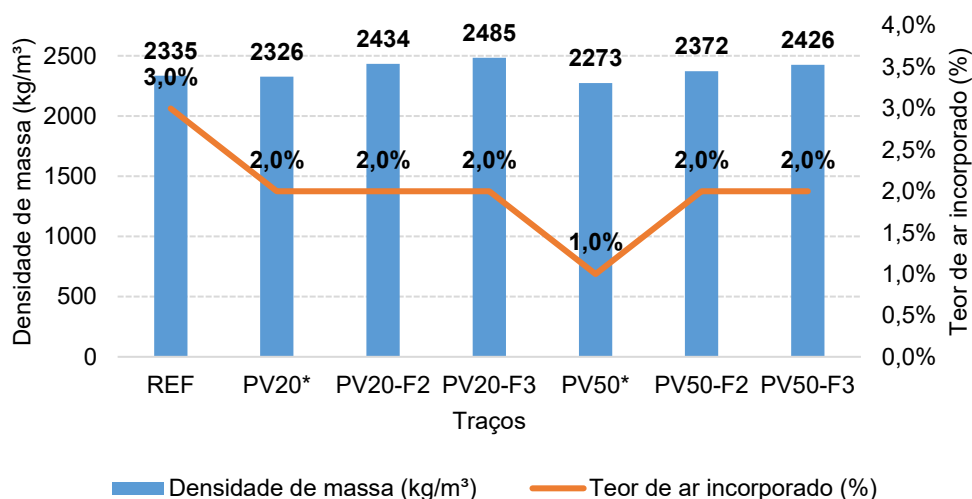
Traço	Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)
REF	2335	3,0
PV20*	2326	2,0
PV20-F2	2434	2,0
PV20-F3	2485	2,0
PV50-F2	2372	2,0
PV50-F3	2426	2,0
PV50*	2273	1,0

\* Fonte: Soares (2021)

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A Figura 4.4 apresenta os valores de densidade de massa e teor de ar incorporado para os traços avaliados.

Figura 4.4 – Gráfico com os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado.



\* Fonte: Soares (2021)

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Observa-se que a adição de fibras metálicas aumenta a densidade de massa da mistura em torno de 7,0%, visto que as fibras possuem uma densidade maior que a da matriz cimentícia (FIGUEIREDO, 2011). A densidade dos compósitos com substituição de 20% e 50% de cimento Portland por pó de vidro diminuiu em relação ao traço de referência 0,4% e 2,7%, respectivamente. O que pode ser atribuído à menor massa específica do vidro moído

(2550,0 kg/m<sup>3</sup>) em comparação ao cimento (3160,0 kg/m<sup>3</sup>), como indicado por Sharifi, Afshoon e Firoozjaie (2015).

Em relação ao teor de ar incorporado, todos os traços com incorporação de fibras de aço mantiveram a mesma margem (2,0%), independentemente do teor de adição de fibras metálicas. O traço PV50 apresentou teor de ar três vezes menor que o traço de referência (REF). De acordo com Sharifi, Afshoon e Firoozjaie (2015) e Soares (2021), o acréscimo no teor de água livre na mistura, em razão da baixa absorção de água pelo vidro moído concomitantemente ao efeito *filler* acarretam melhoria na capacidade de preenchimento dos vazios na matriz cimentícia.

O concreto utilizado por Tagnit-Hamou *et al.* (2015) para a construção de uma ponte na *University of Sherbrooke* continha em sua composição o consumo de 555,0 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 450,0 kg/m<sup>3</sup> de vidro moído, 32,5 kg/m<sup>3</sup> de fibras sintéticas e teor de ar incorporado de 3,5%. Portanto, o teor de ar incorporado apresentado no presente estudo é menor.

#### 4.4.2 Resistência à compressão axial

Nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 são apresentadas as resistências à compressão axial das amostras com 28, 56 e 91 dias, respectivamente. A análise estatística para a resistência à compressão axial das três idades avaliadas encontra-se no Apêndice C.

**Tabela 4.6 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias.**

Traço	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	145,96	7,67	5,25	
PV20-F2	142,86	11,20	7,84	NÃO
PV20-F3	145,87	4,11	2,82	NÃO
PV50-F2	127,90	4,96	3,88	SIM
PV50-F3	132,22	3,72	2,82	NÃO
PV50	121,18	15,95	13,16	SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

**Tabela 4.7 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial aos 56 dias.**

Traço	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	126,58	8,48	6,70	
PV20-F2	131,29	7,89	6,01	NÃO
PV20-F3	135,52	2,87	2,12	NÃO
PV50-F2	117,94	5,28	4,48	NÃO
PV50-F3	121,29	6,82	5,62	NÃO
PV50	131,97	3,46	2,62	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

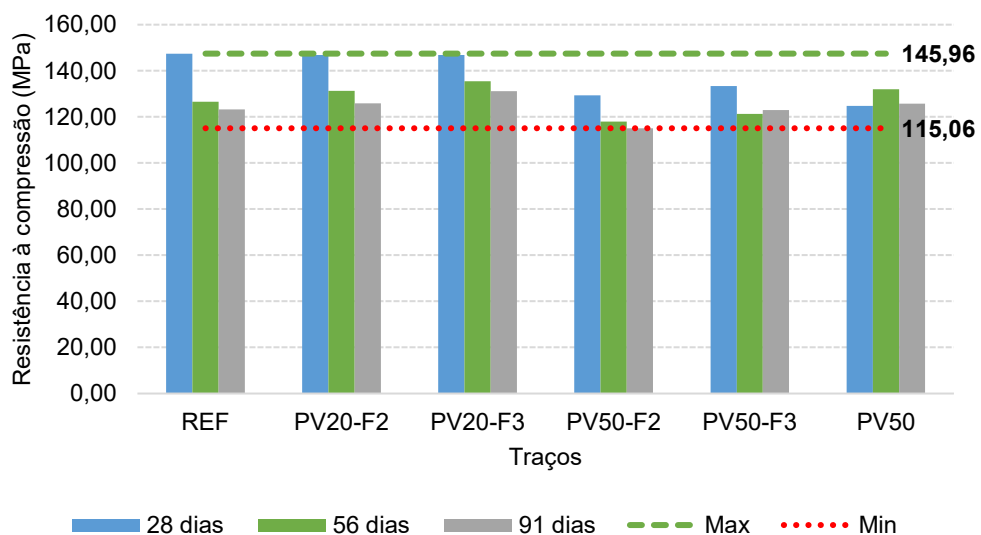
**Tabela 4.8 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial aos 91 dias.**

Traço	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	123,27	5,29	4,29	
PV20-F2	125,92	5,75	4,57	NÃO
PV20-F3	131,21	5,23	3,99	NÃO
PV50-F2	115,06	7,83	6,80	NÃO
PV50-F3	122,99	6,23	5,07	NÃO
PV50	125,71	7,78	6,19	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Observa-se que aos 28 dias apenas os traços PV50 e PV50-F2 apresentaram diferenças estatísticas significativas em relação ao REF. Já para as demais idades, ou seja, 58 e 91 dias, todas as amostras demonstraram ser estatisticamente equivalentes (análise de variância com nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05) em relação ao REF.

Aos 91 dias todos os compósitos avaliados apresentaram resistências à compressão maiores que 115,0 MPa. A Figura 4.5 exibe graficamente um comparativo dos valores resultantes de resistência à compressão axial entre as três idades analisadas.

**Figura 4.5 – Comparação dos valores dos resultados de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios entre as idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Observa-se um decréscimo da resistência à compressão axial conforme ocorre o aumento das idades de ruptura. Tal comportamento também foi observado por Zain *et al.* (2000), Ke-Feng e Nichols (2004), Tan e Zhu (2017), Mindess (2019), Lu *et al.* (2021), em compósitos cimentícios com alto teor de aglomerante e concretos de ultra-alto desempenho.



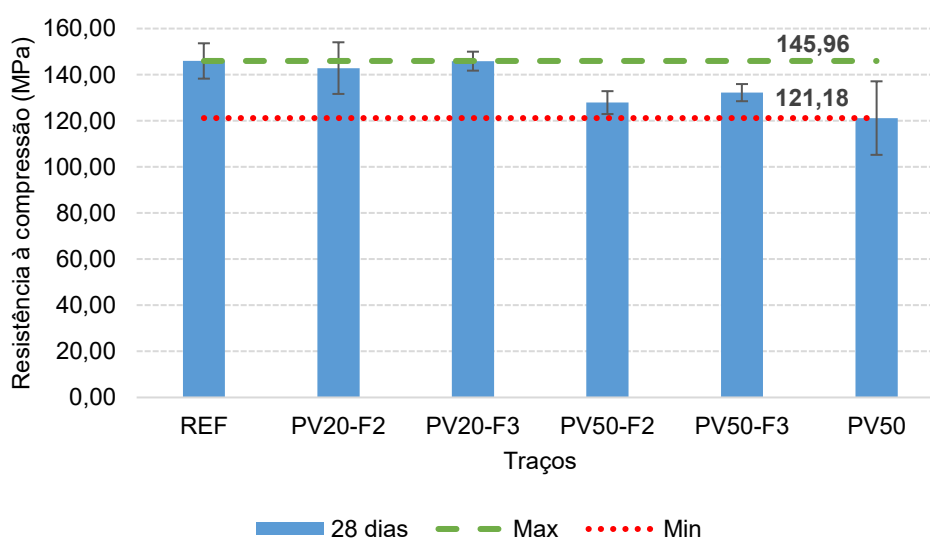
Ke-Feng e Nichols (2004) observaram por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) que o decréscimo de resistência à compressão não é causado pela diferença do grau de hidratação, uma vez que o grau de hidratação apresentou similaridade entre a cura em temperatura elevada e normal, tal conclusão também foi apontada por Tan e Zhu (2017).

Durante a cura com temperatura elevada, a taxa de hidratação é mais rápida, de modo que os produtos de hidratação não têm tempo suficiente para se difundir e precipitar uniformemente em todos os espaços intersticiais entre as partículas dos aglomerantes. Sendo assim, mais produtos de hidratação são reunidos em torno das partículas de cimento/aglomerante hidratante, ocasionando uma distribuição heterogênea dos produtos de hidratação. Logo, uma microestrutura mais porosa é formada e, conseqüentemente, ocasiona o decréscimo da resistência à compressão em idades avançadas (ZAIN *et al.*, 2000; KE-FENG e NICHOLS, 2004; TAN e ZHU, 2017; MINDESS, 2019; LU *et al.*, 2021).

A adição de sílica ativa, cinzas volantes e escórias pode mitigar a redução de resistência compressão em idades posteriores causada pela cura térmica, uma vez que a cura em temperatura elevada pode acelerar o efeito pozolânico, logo, mais produtos de hidratação podem ser formados (KE-FENG e NICHOLS, 2004; TAN e ZHU, 2017; LU *et al.*, 2021).

Sendo assim, a redução de resistência à compressão em idades avançadas das amostras analisadas pode ter sido ocasionada pela cura térmica empregada, visto que as amostras foram submersas em água a 90°C durante 24 horas. A Figura 4.6 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

**Figura 4.6 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 28 dias.**



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Observa-se que a resistência à compressão axial máxima alcançada aos 28 dias foi de 145,9 MPa (REF), e a mínima, de 121,1 MPa (PV50). As amostras PV20-F2 e PV20-F3 apresentaram desempenho equivalente a 97,9% e 99,9%, respectivamente, em relação ao REF. Já os compósitos com 50% de incorporação de vidro moído (PV50, PV50-F2 e PV50-F3) obtiveram resistências que alcançaram 83,0%, 87,6% e 90,6% da resistência máxima (REF), respectivamente. Ressalta-se que apenas os traços PV50-F2 e PV50 apresentaram diferença estatística em relação ao REF.

Conclui-se que todos os traços alcançaram no mínimo 83,0% da resistência máxima (REF), representando um fator positivo para os compósitos, principalmente para as amostras com 50% de substituição de cimento por vidro moído visto que, estudos anteriores apontam que a reação pozolânica do pó de vidro é mais lenta ante a do cimento. Logo, a resistência à compressão dos compósitos com teores elevados de pó de vidro tende a ser menor em idades iniciais. Porém, os benefícios da reação pozolânica são observados em idades avançadas (KOU e XING, 2012; BARROS, 2016; ISLAM, RAHMAN E KAZI, 2017; CARVALHO, 2019; FREITAS, 2019; OLIVEIRA JÚNIOR, 2020; SOARES, 2021).

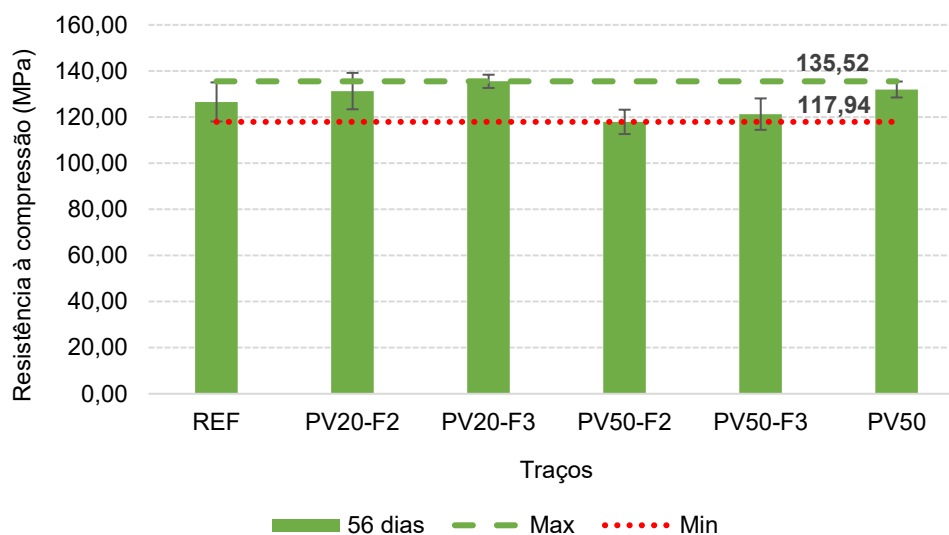
O acréscimo da resistência à compressão em idades avançadas é devido à formação de  $C-S-H$  pelo efeito pozolânico, que promove a densificação do compósito. A incorporação de maior quantidade de pó de vidro como substituto do cimento altera diretamente a relação  $a/c$ , disponibilizando mais água para uma menor proporção de cimento, intensificando a formação de  $Ca(OH)_2$ , que reage com a maior quantidade de material pozolânico disponível em pó de vidro (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016; DU; TAN, 2017).

Em relação à adição de fibras metálicas, ressalta-se que por meio da análise estatística as amostras PV20-F2 e PV20-F3 são consideradas equivalentes entre si, assim como os traços PV50-F2 e PV50-F3.

Ressalta-se que aos 28 dias o traço PV50 foi considerado estatisticamente diferente dos traços PV20-F2 e PV20-F3. A resistência à compressão da amostra PV50 corresponde à 84,8% e 83,1% da resistência de PV20-F2 e PV20-F3, respectivamente. Em relação aos compósitos ensaiados aos 56 dias de idade, a Figura 4.7 ilustra os resultados das amostras analisadas. Conclui-se que a resistência à compressão axial máxima alcançada foi de 135,5 MPa (PV20-F3), e a mínima, de 117,9 MPa (PV50-F2). As resistências dos traços PV20-F2, PV20-F3 e PV50 ultrapassaram a resistência do traço de referência (REF) em 3,7%, 7,1% e 4,3%, respectivamente, evidenciando a pozolanidade do vidro moído em idades mais avançadas. Ressalta-se que a resistência à compressão de todos os traços analisados fora considerada estatisticamente equivalente em relação ao REF.

Os espécimes PV50-F2 e PV50-F3 alcançaram desempenho de 93,2% e 95,8% em relação ao REF, respectivamente, e 87,1% e 89,5% ante a resistência máxima (PV20-F3).

**Figura 4.7 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 56 dias.**



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

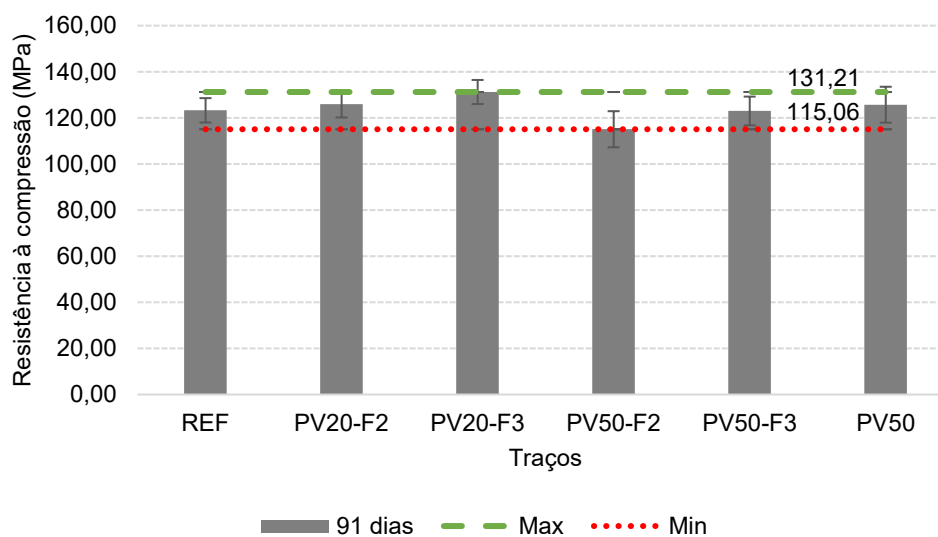
Destaca-se que a resistência à compressão dos traços PV20-F2 e PV20-F3 são estatisticamente equivalentes ( $p$  superior a 0,05) mediante a análise estatística (ANOVA). O mesmo ocorre com as amostras PV50-F2 e PV50-F3.

O traço PV50-F2 apresentou diferença estatística em relação aos traços PV20-F2 e PV20-F3 e PV50. Comparativamente, a resistência de PV20-F2 equivale à 111,3% da resistência de PV50-F2. Sendo assim, para o mesmo teor de adição de fibras metálicas (2%) o traço com 20% de incorporação de vidro moído apresentou performance superior à amostra com 50% de pó de vidro. Enquanto o traço PV20-F3 apresentou resistência superior à 14,9% ante a amostra PV50-F2. A resistência à compressão de PV50 corresponde a 111,9% da resistência de PV50-F2. Logo, para o mesmo teor de adição de vidro moído (50%) o compósito sem fibras apresentou resistência superior ante a amostra com 2% fibras metálicas.

Já a amostra PV20-F3 difere estatisticamente do traço PV50-F3. A resistência de PV20-F3 corresponde à 111,7% da resistência de PV50-F3. Logo, para o mesmo teor de fibra de aço (3%), a amostra com 20% adição de pó de vidro apresentou desempenho superior ante o compósito com 50% de vidro moído aos 56 dias de idade.

A Figura 4.8 apresenta os resultados dos exemplares ensaiados aos 91 dias. As amostras obtiveram resistência à compressão axial máxima de 131,2 MPa (PV20-F3), e mínima equivalente a 115,0 MPa (PV50-F2).

**Figura 4.8 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias.**



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Destaca-se que a resistência à compressão de todos os traços analisados aos 91 dias fora considerada estatisticamente equivalente em relação ao REF. A resistência à compressão dos traços PV20-F2, PV20-F3 expressaram ser estatisticamente equivalentes entre si (análise de variância com nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05), o mesmo ocorreu com as amostras PV50-F2 e PV50-F3.

Ressalta-se que aos 91 dias a amostra PV20-F3 apresentou diferença estatística em relação ao traço PV50-F2. A resistência de PV20-F3 foi superior a 14,0% ante PV50-F2. Tal comportamento também ocorreu aos 56 dias. Constata-se que aos 91 dias houve maior uniformidade nos valores de resistência à compressão dos traços analisados.

Dito isso, observa-se comportamentos similares dos traços aos 28, 56 e 91 dias de idade. As amostras com 3% de fibras apresentaram acréscimo na resistência à compressão axial em torno de 5,0% nas três idades analisadas. No entanto, as resistências à compressão dos traços foram consideradas estatisticamente semelhantes ( $p$  maior que 0,05). Tal comportamento também foi observado por Le Hoang e Fehling (2017), Yoo e Yoon (2015) e Oliveira (2019).

Aos 56 e 91 dias os traços com 20% de incorporação de vidro moído obtiveram resistências maiores que os com 50%, corroborando estudos anteriores, uma vez que Islam, Rahman e Kazi (2016), Mosaberpanah, Eren e Tarassoly (2018) e Guignone (2017) apontaram que 20% de substituição de cimento por vidro moído foi pertinente, acarretando aumento no desempenho das amostras em relação à resistência à compressão. Ressalta-se que o  $d_{50}$  do pó de vidro utilizado pelos autores foi de 75  $\mu\text{m}$ , 63  $\mu\text{m}$  e 35  $\mu\text{m}$ , respectivamente, ou seja, valores próximos ao utilizado neste estudo.

A ruptura das amostras sem fibras (REF) é explosiva e acompanhada de fragmentação do espécime. Em contrapartida, as amostras com fibras metálicas não apresentaram fragmentação, como também foi observado por Le Hoang e Fehling (2017) e Oliveira (2019). Os modos de ruptura dos espécimes com e sem fibras estão apresentados nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, respectivamente. Observa-se que o comportamento das fissuras dos espécimes com 2% e 3% de adição de fibras são semelhantes. Verifica-se que o modo de ruptura do REF foi compatível com os tipos A – cônica e cônica, afastada em 25 mm do capeamento (Figura 4.9), de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

**Figura 4.9 – Modo de ruptura do REF aos 56 dias.**



Fonte: Acervo da autora (2022)

**Figura 4.10 – Modo de ruptura do PV50-F2 aos 56 dias.**



Fonte: Acervo da autora (2022)

**Figura 4.11 – Modo de ruptura do PV50-F3 aos 56 dias.**



Fonte: Acervo da autora (2022)

#### 4.4.2.1 Eficiência do cimento e dos aglomerantes em relação à resistência à compressão

Na Tabela 4.9, observam-se os valores da eficiência energética dos compósitos cimentícios em relação ao cimento e aos aglomerantes para todos os traços desenvolvidos neste trabalho.

Tabela 4.9 – Eficiência energética dos compósitos cimentícios aos 28, 56 e 91 dias.

Traço	Idade (dias)	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	Pó de vidro (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa)	Eficiência do cimento (kg/m <sup>3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )	Eficiência dos aglomerantes (kg/m <sup>3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )
REF	28	1035,69	82,86	0,00	145,96	7,10	7,66
PV20-F2		831,41	83,14	166,28	142,86	5,82	7,57
PV20-F3		831,41	83,14	166,28	145,87	5,70	7,41
PV50-F2		516,78	82,68	418,59	127,90	4,04	7,96
PV50-F3		516,78	82,68	418,59	132,22	3,91	7,70
PV50		516,78	82,68	418,59	121,18	4,26	8,40
REF	56	1035,69	82,86	0,00	126,58	8,18	8,84
PV20-F2		831,41	83,14	166,28	131,29	6,33	8,23
PV20-F3		831,41	83,14	166,28	135,52	6,13	7,98
PV50-F2		516,78	82,68	418,59	117,94	4,38	8,63
PV50-F3		516,78	82,68	418,59	121,29	4,26	8,39
PV50**		516,78	82,68	418,59	131,97	3,92	7,71
REF	91	1035,69	82,86	0,00	123,27	8,40	9,07
PV20-F2		831,41	83,14	166,28	125,92	6,60	8,58
PV20-F3		831,41	83,14	166,28	131,21	6,34	8,24
PV50-F2		516,78	82,68	418,59	115,06	4,49	8,85
PV50-F3		516,78	82,68	418,59	122,99	4,20	8,28
PV50**		516,78	82,68	418,59	125,71	4,11	8,10

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Por meio da análise da Tabela 4.9, verifica-se que a eficiência dos aglomerantes varia entre 7,5 a 9,0 kg/m<sup>3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, o que é bastante positivo, uma vez que Barros (2016), Islam, Rahman e Kazi (2016), Soliman e Tagnit-Hamou (2016), Guignone (2017), Carvalho (2019) e Mostofinejad *et al.* (2020) apresentaram eficiência em torno de 6,9 a 11,7 kg/m<sup>3</sup>.MPa<sup>-1</sup>. Logo, embora os traços analisados possuam alto consumo de cimento, observa-se a alta eficiência energética ante estudos anteriores.

#### 4.4.3 Módulo de elasticidade estático

Na Tabela 4.10, são apresentados os resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático aos 28 dias de idade. A análise estatística para o módulo de elasticidade das amostras avaliadas encontra-se no Apêndice D.

**Tabela 4.10 – Módulos de elasticidade aos 28 dias de idade.**

Traço	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	46,27	1,06	2,29	
PV20-F2	46,12	1,34	2,91	NÃO
PV20-F3	48,30	0,18	0,38	NÃO
PV50-F2	46,24	2,38	5,15	NÃO
PV50-F3	45,78	1,08	2,37	NÃO
PV50	45,65	0,93	2,04	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Conclui-se que, para a determinação do módulo de elasticidade, a análise de variância com nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05 não apresentou diferença significativa das amostras analisadas em relação ao REF, também não houveram diferença estatística entre os traços avaliados, e tal comportamento é corroborado por estudos anteriores.

Oliveira (2019) incorporou 1,0% e 2,0% de fibras de aço em concreto de ultra-alto desempenho, o que acarretou o aumento de 1,9% (44,8 GPa) e 5,1% (46,2 GPa) no módulo de elasticidade do compósito, respectivamente.

Le Hoang e Fehling (2017) utilizaram os teores 1,5% e 3,0% de incorporação de fibras metálicas, e alcançaram um aumento no módulo de elasticidade de 0,5% (53,1 GPa) e 0,2% (53,4 GPa), respectivamente. Já Hassan, Jones e Mahmud (2012), adotaram o teor de 2,0% de fibras de aço, o que ocasionou um acréscimo no módulo de elasticidade em torno de 7,0% (45,6 GPa).

Tagnit-Hamou, Soliman e Omran (2016) obtiveram módulo de elasticidade de 55,0 GPa aos 28 dias, mediante a utilização de 400,0 kg/m<sup>3</sup> de vidro moído e 158,0 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço. Já Yoo *et al.* (2016), adotaram 2,0% de fibras metálicas com fator de forma igual a 65, e obtiveram um ganho de 3,0% (46,7 GPa) no módulo elasticidade.

Soares (2021) alcançou os valores médios de módulo elasticidade aos 28 dias das amostras com 20% e 50% de adição de pó de vidro ( $d_{50} = 75 \mu\text{m}$ ) de 41,7 GPa e 41,5 GPa, respectivamente. Logo, os valores médios de módulo de elasticidade das amostras analisadas estão próximos aos obtidos pelos estudos citados anteriormente.



#### 4.4.4 Resistência à tração na flexão

Na Tabela 4.11, podem ser observados os resultados de resistência à tração por flexão aos 28 dias dos compósitos cimentícios avaliados. A análise estatística para a resistência à tração na flexão encontra-se no Apêndice E.

**Tabela 4.11 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias.**

Traço	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	18,97	1,37	7,24	
PV20-F2	21,04	1,09	5,17	NÃO
PV20-F3	21,92	5,56	25,39	NÃO
PV50-F2	22,77	7,99	35,10	NÃO
PV50-F3	21,35	2,30	10,76	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Constata-se que todos os traços apresentaram resistência à tração na flexão em torno de 1,0% maior que o traço de referência (REF). No entanto, todas as amostras avaliadas são estatisticamente equivalentes em relação (análise de variância com nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05).

Soares (2021) avaliou as amostras com adição de 20% e 50% de pó de vidro sem incorporação de fibras metálicas aos 28 dias, e obteve valores médios de 21,1 MPa e 18,7 MPa, respectivamente, representando um decréscimo de 8,8% e 19,0%, respectivamente, em relação ao traço de referência. Segundo a autora, as amostras com maior teor de pó de vidro apresentam hidratação da matriz mais lenta, o que acarreta menor resistência à tração da matriz cimentícia.

A NBR 16940 (ABNT, 2021) preconiza que a determinação das resistências à tração indiretas (resistência à tração na flexão) do concreto com fibras seja realizada mediante o ensaio de flexão em corpos de prova prismáticos com entalhe. No entanto, devido ao tamanho da amostra (150 mm de altura e comprimento entre 550-700 mm), e, conseqüentemente, ao elevado consumo de material, no presente estudo, optou-se pela realização do ensaio de resistência à tração por duplo puncionamento, de acordo com a NBR 16939 (ABNT, 2021).



#### 4.4.5 Resistência à tração por duplo puncionamento

As amostras avaliadas exibiram o padrão de fissuração esperado, apresentando entre duas e quatro fissuras radiais principais nas superfícies de puncionamento, que se prolongaram ao longo da altura do espécime (MONTE, 2015; NOGUEIRA 2019). A Figura 4.12 exibe o padrão de ruptura dos espécimes avaliados.

Como esperado, o traço REF apresentou ruptura explosiva após alcançar a carga máxima ( $P_f$ ), ocasionando fragmentação dos corpos de prova, ao contrário das amostras com adição de fibras, visto que as fibras atuam como ponte de transferência de tensão através das fissuras, redistribuindo os esforços da matriz e, conseqüentemente, atenuando a formação e propagação das fissuras (BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011; ZHANG; SHAO; ZHU, 2020).

Figura 4.12 – Padrão de fissuração nos corpos de prova do ensaio de duplo puncionamento.



Fonte: Acervo da autora (2022)

Nas Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14 podem ser observados os resultados da determinação das resistências à tração por duplo puncionamento. O parâmetro principal é a carga de fissuração ( $P_f$ ). A análise estatística para a resistência à tração por duplo puncionamento encontra-se no Apêndice F.

Tabela 4.12 – Resultados do ensaio de duplo puncionamento aos 28 dias - ( $P_f$ ).

Traço	Resistência à tração por duplo puncionamento (MPa)	Carga máxima média (kN)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	7,55	133,34	0,39	5,22	
PV20-F2	7,12	125,83	0,47	6,59	NÃO
PV20-F3	7,31	129,19	0,23	3,21	NÃO
PV50-F2	6,77	119,72	0,51	7,58	NÃO
PV50-F3	7,67	135,62	1,16	15,10	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Tabela 4.13 – Resultados do ensaio de duplo puncionamento aos 56 dias - ( $P_f$ ).

Traço	Resistência à tração por duplo puncionamento (MPa)	Carga máxima média (kN)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	7,21	127,36	0,41	5,63	
PV20-F2	7,81	138,10	0,40	5,08	NÃO
PV20-F3	8,09	142,90	1,26	15,56	NÃO
PV50-F2	7,24	127,92	0,51	7,09	NÃO
PV50-F3	7,79	137,75	0,90	11,55	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

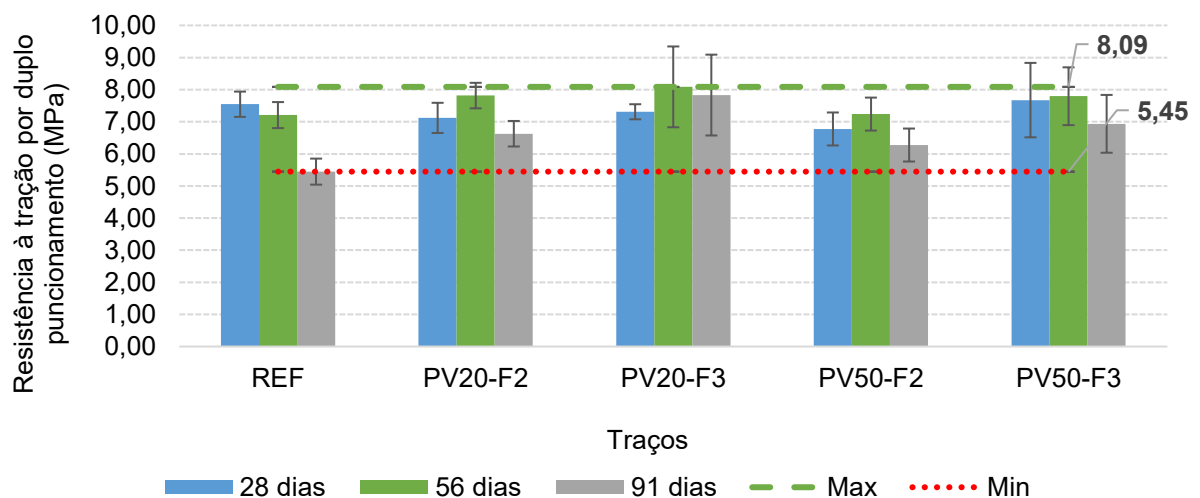
Tabela 4.14 – Resultados do ensaio de duplo puncionamento aos 91 dias - ( $P_f$ ).

Traço	Resistência à tração por duplo puncionamento (MPa)	Carga máxima média (kN)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	5,45	96,26	0,95	17,51	
PV20-F2	6,63	117,11	0,51	7,69	NÃO
PV20-F3	7,83	138,39	0,69	8,77	SIM
PV50-F2	6,27	110,89	0,92	14,71	NÃO
PV50-F3	6,94	122,55	0,82	11,77	SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A Figura 4.13 apresenta um comparativo dos valores de resistência à tração médios obtidos pelos traços entre as idades avaliadas

Figura 4.13 – Comparação dos valores dos resultados de resistência à tração mediante EDP das amostras entre as idades de 28, 56 e 91 dias.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Por meio da análise de variância com nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pode-se concluir que para as idades de 28 e 56 dias não houve diferenças significativas da carga que produz a fissuração na matriz ( $P_f$ ) em relação ao REF. Visto que  $P_f$  depende das características da matriz cimentícia, pode-se concluir que a adição de pó de vidro e fibras de aço não acarretou alteração na resistência à tração por meio do ensaio de duplo puncionamento (EDP). Aos 28 e 56 dias os coeficientes de variação (CV) variam entre 8-16%.

Já aos 91 dias, os traços PV20-F3 e PV50-F3 mostraram diferenças estatísticas significativas em relação ao REF. As resistências à tração do PV20-F3 e PV50-F3 equivalem a 143,8% e 127,3% da resistência da amostra REF, respectivamente. Os traços PV20-F3 e PV50-F2 apresentaram diferença estatística entre si. A resistência à tração de PV20-F3 corresponde a 124,8% ante PV50-F2. Aos 91 dias os valores de CV são elevados e variam entre 8-17%.

No entanto, Monte (2015) e Nogueira (2019) obtiveram CV entre 6-10% e 8-21%, respectivamente. Segundo Salvador (2012), o CV depende do tipo, teor da fibra e da máquina de ensaio. Outro fator apontado por Cavalaro e Aguado (2015) é a dimensão do corpo de prova. De acordo com os autores, quanto maior a dimensão, menor será o CV.

No tocante à adição de fibras, Monte (2015) analisou a incorporação de fibras de aço com consumo de 20 kg/m<sup>3</sup>, 30 kg/m<sup>3</sup> e 45 kg/m<sup>3</sup> em concreto, e constatou estatisticamente que não houve mudança na carga máxima de puncionamento para os diferentes teores de fibras corroborando o presente estudo.

Nota-se um decréscimo da resistência à tração por EDP conforme a idade de ruptura. Tal comportamento é análogo ao obtido no ensaio de resistência à compressão, o que é razoável, visto que  $P_f$  depende das propriedades da matriz cimentícia.

Ressalta-se que o papel fundamental das fibras ocorre após a fissuração. Portanto, em seguida serão analisadas as cargas residuais e as respectivas tenacidades das amostras. Logo, as Tabelas 4.15 a 4.22 exibem os resultados médios e os CV para as resistências, as cargas máximas de fissuração e residuais dos traços com incorporação de fibras metálicas, enquanto as Figuras 4.14 a 4.18 apresentam as curvas de carga por deslocamento, em que as linhas tracejadas representam as amostras, enquanto as linhas mais grossas indicam as curvas médias para cada idade avaliada.

As análises estatísticas foram realizadas para cada traço, comparando as três idades a fim de investigar se haveria variação no desempenho do compósito conforme a variação de idade. Os parâmetros avaliados foram as resistências residuais ( $P_{0,5}$ ,  $P_{1,5}$ ,  $P_{2,5}$ ,  $P_{3,5}$ ,  $P_{4,0}$ ) e a tenacidade para o deslocamento vertical ( $\delta p$ ) correspondente a 4,0 mm. Os resultados de todos os corpos de prova avaliados encontram-se no Apêndice F.

Tabela 4.15 – Resultados médios e coeficiente de variação do traço PV20-F2.

Traço	Idade (dias)	Resistência e carga máxima			Resistências e cargas residuais														
		Pf			P0,5			P1,5			P2,5			P3,5			P4,0		
		Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)
PV20-F2	28	7,12	125,83	0,37	3,63	64,15	2,01	2,47	43,65	1,32	1,98	35,02	1,40	1,55	27,40	1,70	1,35	23,90	1,97
	56	7,81	138,10	0,29	2,92	51,62	1,49	2,21	39,00	1,58	1,69	29,80	1,50	1,28	22,54	1,72	1,12	19,88	1,82
	91	6,63	117,11	0,44	3,99	70,48	0,88	2,91	51,51	0,95	2,14	37,90	0,89	1,63	28,88	1,25	1,43	25,32	1,30

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 4.14 – Curvas de carga versus deslocamento vertical do traço PV20-F2 das idades analisadas.

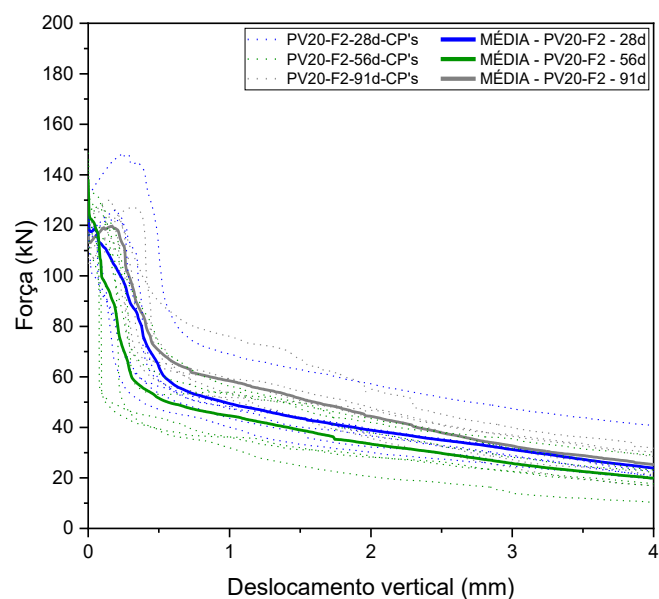


Tabela 4.16 – Resultados da análise estatística da amostra PV20-F2.

Traço	Parâmetro	Diferença significativa em relação aos 28d	
		56 dias	91 dias
PV20-F2	Pf	NÃO	NÃO
	P0,5	NÃO	NÃO
	P1,5	NÃO	NÃO
	P2,5	NÃO	NÃO
	P3,5	NÃO	NÃO
	P4,0	NÃO	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Tabela 4.17 – Resultados médios e coeficiente de variação do traço PV20-F3.

Traço	Idade (dias)	Resistência e carga máxima			Resistências e cargas residuais														
		Pf			P0,5			P1,5			P2,5			P3,5			P4,0		
		Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)
PV20-F3	28	7,31	129,19	0,18	4,84	85,60	0,47	2,85	50,32	0,55	2,11	37,21	0,78	1,59	28,16	0,96	1,40	24,74	1,00
	56	8,09	142,90	0,88	6,10	107,88	2,60	3,79	67,06	1,94	2,87	50,69	1,73	2,16	38,15	1,75	1,84	32,49	1,72
	91	7,83	138,39	0,50	7,84	138,55	1,00	4,46	78,83	2,52	3,08	54,42	2,18	2,32	40,92	2,43	1,99	35,16	2,70

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 4.15 – Curvas de carga versus deslocamento vertical do traço PV20-F3 das idades analisadas.

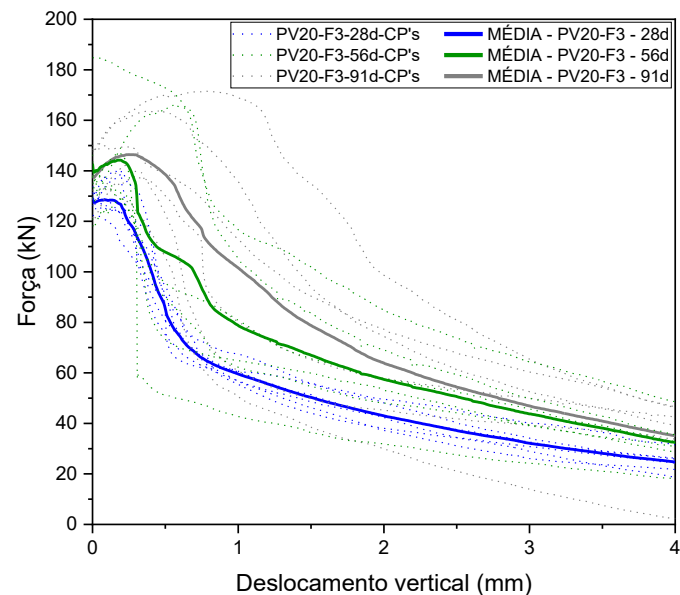


Tabela 4.18 – Resultados da análise estatística da amostra PV20-F3.

Traço	Parâmetro	Diferença significativa em relação aos 28d	
		56 dias	91 dias
PV20-F3	Pf	NÃO	NÃO
	P0,5	NÃO	SIM
	P1,5	NÃO	NÃO
	P2,5	NÃO	SIM
	P3,5	NÃO	NÃO
	P4,0	NÃO	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Destaca-se que para a plotagem das curvas, o eixo y foi deslocado para coincidir com a carga máxima de fissuração ( $P_f$ ) e o valor zero do eixo x. Dessa forma, o ponto zero foi estipulado como referência para os deslocamentos verticais ( $\delta p$ ). Ressalta-se que quando a amostra apresenta comportamento *softening* na pós-fissuração, ( $P_f$ ) coincide com a maior carga apresentada durante o ensaio. Para o comportamento *hardening* no EDP, ( $P_f$ ) deve ser apontada como o primeiro pico de carga, e não o maior valor absoluto da carga do ensaio. (GALEOTE *et al.*, 2017; MALATESTA *et al.*, 2012). Nesse caso, a identificação do valor de ( $P_f$ ) é dificultada pela subjetividade de onde de fato ocorra. Para o presente estudo considerou-se o pico local de carga, com posterior mudança de inclinação do gráfico, caracterizando rompimento da matriz cimentícia e mudança de módulo de elasticidade do compósito como apontado por Nogueira (2019). A utilização de *zoom* nos gráficos durante a análise das curvas contribui para essas identificações.

Logo, as curvas médias aos 28 e 91 dias do traço PV20-F2 exibem comportamento *hardening* na pós-fissuração, e aos 56 dias apresenta comportamento *softening* (Figura 4.14). As curvas médias de PV20-F3 para as três idades exibem desempenho *hardening* (Figura 4.15), visto o teor elevado de fibras de aço (3% em volume). Tal comportamento também foi observado por Monte (2015), Galeote *et al.* (2017), Carlos (2018) e Nogueira (2019).

Em relação aos parâmetros ( $P_f, P_{0,5}, P_{1,5}, P_{2,5}, P_{3,5}, P_{4,0}$ ), os traços PV20-F2 com 56 e 91 dias não apontaram diferenças estatísticas ante as amostras de 28 dias (Tabela 4.16). Porém,  $P_{0,5}$  e  $P_{2,5}$  do traço PV20-F3 aos 91 dias apontaram diferença estatística em relação às amostras de 28 dias. Tal fato é corroborado pela análise gráfica da Figura 4.15, visto que as curvas com 91 dias são mais dispersas que as das demais idades. Observa-se que os CV das amostras PV20-F2 e PV20-F3 são menores que 2,0% e 3,0%, respectivamente (Tabelas 4.15 e 4.17). Segundo Malatesta, De Cea e Borrell (2012), o EDP pode ser sensível à homogeneização do compósito e à presença de agregados e fibras, principalmente na região de punção e ao longo da fissuras. A Figura 4.16 apresenta o afloramento de fibras na região de punção e superfície do corpo de prova, o que pode ter acarretado tal comportamento.

**Figura 4.16 – Corpo de prova do traço PV20-F3 aos 91 dias.**



Fonte: Acervo da autora (2022)

Tabela 4.19 – Resultados médios e coeficiente de variação do traço PV50-F2.

Traço	Idade (dias)	Resistência e carga máxima			Resistências e cargas residuais														
		Pf			P0,5			P1,5			P2,5			P3,5			P4,0		
		Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)
PV50-F2	28	6,77	119,72	0,43	3,83	67,68	1,72	2,62	46,36	0,87	2,10	37,11	1,08	1,72	30,36	1,44	1,39	24,50	1,67
	56	7,24	127,92	0,40	4,11	72,58	1,85	2,66	46,97	1,40	2,09	36,94	1,63	1,67	29,57	1,66	1,51	26,63	1,73
	91	6,27	110,89	0,83	5,05	89,30	1,81	3,04	53,79	1,96	2,20	38,97	2,62	1,67	29,54	3,45	1,43	25,33	3,96

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 4.17 – Curvas de carga versus deslocamento vertical do traço PV50-F2 das idades analisadas.

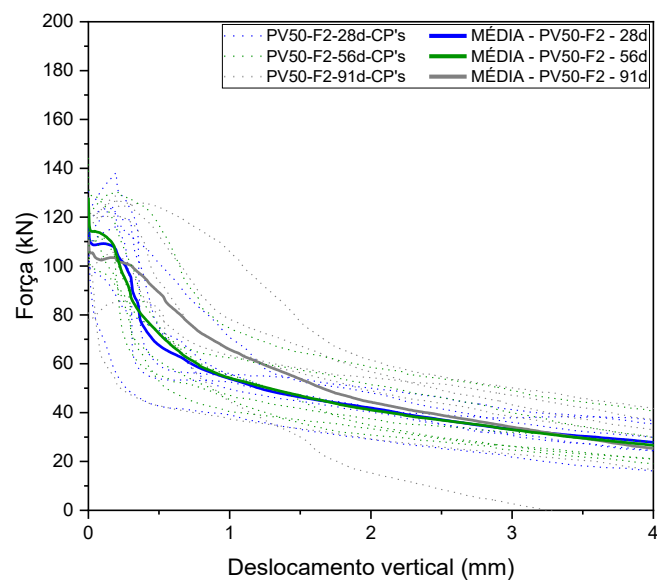


Tabela 4.20 – Resultados da análise estatística da amostra PV50-F2.

Traço	Parâmetro	Diferença significativa em relação aos 28d	
		56 dias	91 dias
PV50-F2	Pf	NÃO	NÃO
	P0,5	NÃO	NÃO
	P1,5	NÃO	NÃO
	P2,5	NÃO	NÃO
	P3,5	NÃO	NÃO
	P4,0	NÃO	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Tabela 4.21 – Resultados médios e coeficiente de variação do traço PV50-F3.

Traço	Idade (dias)	Resistência e carga máxima			Resistências e cargas residuais														
		Pf			P0,5			P1,5			P2,5			P3,5			P4,0		
		Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)	Média (MPa)	Média (kN)	CV (%)
PV50-F3	28	7,67	135,62	1,24	6,09	107,60	1,57	3,34	58,94	1,11	2,61	46,07	1,26	2,09	36,97	1,47	1,87	33,05	1,58
	56	7,79	137,75	0,65	6,88	121,58	1,39	4,10	72,53	1,77	3,03	53,59	1,83	2,29	40,53	2,16	2,03	35,88	2,25
	91	6,94	122,55	0,67	6,47	114,29	2,04	4,29	75,89	2,40	3,33	58,87	3,02	2,57	45,48	3,33	2,31	40,76	3,58

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Figura 4.18 – Curvas de carga versus deslocamento vertical do traço PV50-F3 das idades analisadas.

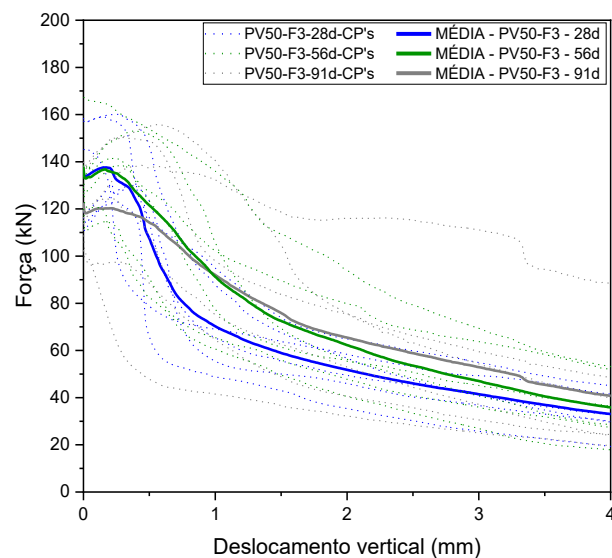


Tabela 4.22 – Resultados da análise estatística da amostra PV50-F3.

Traço	Parâmetro	Diferença significativa em relação aos 28d	
		56 dias	91 dias
PV50-F3	Pf	NÃO	NÃO
	P0,5	NÃO	NÃO
	P1,5	NÃO	NÃO
	P2,5	NÃO	NÃO
	P3,5	NÃO	NÃO
	P4,0	NÃO	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

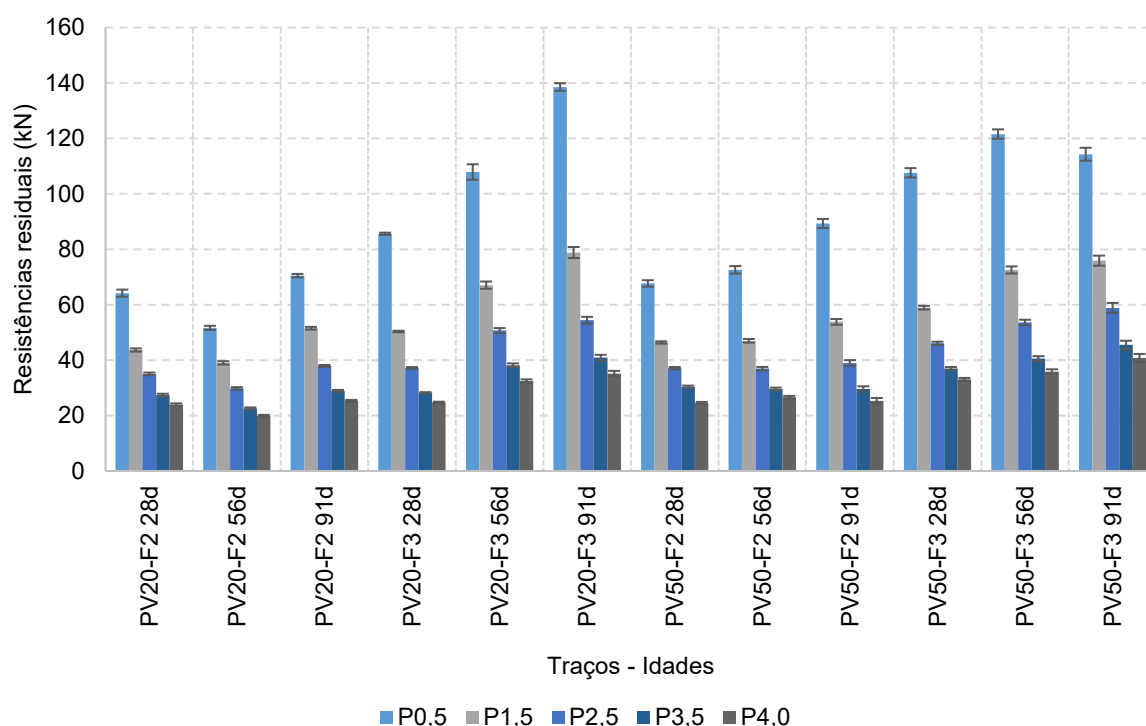


Pode-se concluir que os CV dos traços PV50-F2 e PV50-F3 foram menores que 4,0% para as três idades (Tabelas 4.19 e 4.21).

A comparação estatística com nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05 indica que não houve distinção estatística dos parâmetros ( $P_f, P_{0,5}, P_{1,5}, P_{2,5}, P_{3,5}, P_{4,0}$ ) das amostras PV50-F2 e PV50-F3 nas três idades analisadas, o que é corroborado pela observação das Figuras 4.17 e 4.18. Apesar das curvas de 56 e 91 dias exibirem uma dispersão expressiva, as curvas médias apresentaram comportamentos similares, considerando-se a proximidade das curvas, principalmente a partir de 2 mm de deslocamento.

As curvas médias dos compósitos cimentícios PV50-F2 apresentaram comportamento *softening* para as três idades analisadas. Já as curvas médias de PV50-F3 apresentaram comportamento *hardening* aos 28, 56 e 91 dias, o que é factível em virtude do maior consumo de fibras metálicas do traço. A Figura 4.19 apresenta os parâmetros ( $P_{0,5}, P_{1,5}, P_{2,5}, P_{3,5}, P_{4,0}$ ) versus traços e respectivas idades avaliadas.

Figura 4.19 – Resistências residuais dos traços para as idades analisadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Constata-se predominantemente o aumento dos valores de  $P_{0,5}, P_{1,5}, P_{2,5}, P_{3,5}, P_{4,0}$  à medida que ocorre o acréscimo de idade do corpo de prova (Figura 4.19). Sabe-se que no estágio de pós-fissuração do concreto as fibras mitigam a progressão da formação de fissuras e absorvem o carregamento aplicado, dissipando a energia responsável pela ruptura frágil do concreto sob a forma de deformação, arrancamento e ruptura das fibras.

Logo, uma vez que as amostras possuíam o mesmo teor de fibras nas três idades, possivelmente a matriz cimentícia contribuiu com o aumento da resistência residual devido a suas propriedades mecânicas elevadas.

Em geral, os coeficientes de variação dos traços foram inferiores a 4,0% para todos os traços e parâmetros ( $P_f, P_{0,5}, P_{1,5}, P_{2,5}, P_{3,5}, P_{4,0}$ ) avaliados, o que é bastante positivo, visto que Malatesta; De Cea e Borrell (2012), Monte (2015) e Nogueira (2019) alcançaram CV em torno de 10-35%. Segundo Cavalaro e Aguado (2015), a variabilidade da resposta mecânica do material tende a diminuir de acordo com a quantidade de fibras e o tamanho do corpo de prova.

Em relação à análise estatística, apenas o traço PV20-F2 para os parâmetros  $P_{0,5}$  e  $P_{2,5}$  aos 91 dias apresentou variação estatística significativa. Os demais traços não apresentaram diferença estatística ante as amostras de 28 dias. Tal fato é plausível, já que as amostras possuem o mesmo teor de fibras. Constata-se que quanto maior o valor do deslocamento, maior a proximidade dos valores de carga das curvas entre as idades analisadas, o que é um indicativo de equivalência entre as médias independentemente da idade, corroborando a análise estatística.

O comportamento *hardening* foi exibido nos traços PV20-F3 e PV50-F3. Tal desempenho ocorre geralmente em consequência do alinhamento preferencial das fibras (transversal ao esforço axial) ou da utilização de teor acima do teor crítico. Ressalta-se que o teor máximo de fibras metálicas calculado foi de 2,6% e o adotado foi de 3,0% (em volume).

#### 4.4.5.1 Tenacidade

As Tabelas 4.23 e 4.24 e as Figuras 4.20 (a) e (b) apresentam os resultados médios para o parâmetro tenacidade dos traços PV20-F2 e PV20-F3 para deslocamento vertical ( $\delta p$ ) igual a 4,0 mm nas três idades avaliadas.

**Tabela 4.23 – Resultados médios de tenacidade e análise estatística dos traços PV20-F2 e PV20-F3.**

Traço	Idade (dias)	Tenacidade média (J)	Desvio padrão (J)	CV (%)	Diferença significativa em relação aos 28 dias
PV20-F2	28	180,85	45,27	25,03	-
	56	154,23	39,31	25,49	NÃO
	91	200,68	27,43	13,67	NÃO
PV20-F3	28	207,90	14,02	6,74	-
	56	268,13	83,36	31,09	NÃO
	91	280,07	97,31	34,74	NÃO

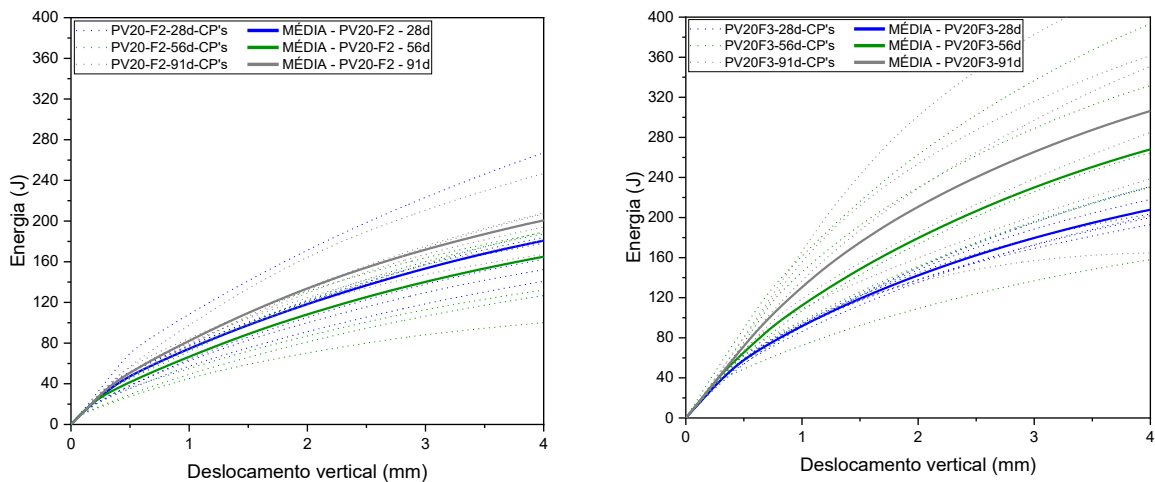
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

**Tabela 4.24 – Resultado da análise estatística entre os traços PV20-F2 e PV20-F3.**

Idade (dias)	Traço	Traço	Diferença estatística entre os traços
28	PV20-F2	PV20-F3	NÃO
56	PV20-F2	PV20-F3	SIM
91	PV20-F2	PV20-F3	SIM

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

**Figuras 4.20 – Curvas de energia versus deslocamento vertical do traço (a) PV20-F2 e (b) PV20-F3 para as três idades avaliadas.**



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Conforme a Tabela 4.23, não há distinção estatística da tenacidade ( $\delta p = 4,00$  mm) conforme a variação da idade da amostra, o que é positivo, visto que os compósitos cimentícios possuem o mesmo teor de fibras metálicas nas três idades avaliadas. No entanto, constata-se que os coeficientes de variação (CV) são elevados, ou seja, entre 6,7% e 34,7%. Observa-se na Figura 4.20 (b) a amplitude entre as curvas, porém, as curvas apresentam trajetórias semelhantes, corroborando a análise estatística.

Por meio da Tabela 4.24 constata-se que aos 28 dias, os traços PV20-F2 e PV20-F3 são estatisticamente equivalentes entre si. Logo, a adição de fibra metálica não interferiu na tenacidade ( $\delta p = 4,00$  mm) dos compósitos cimentícios. No entanto, aos 56 e 91 dias as amostras PV20-F2 e PV20-F3 apresentaram diferença estatística. Quando comparado ao traço PV20-F2, o traço PV20-F3 apresentou ganho de capacidade de absorção de energia médio igual a 73,9% e 52,6% aos 56 e 91 dias, respectivamente. Portanto, houve aumento de capacidade de absorção de energia dos traços com 3% de adição de fibra metálica aos 56 e 91 dias de idade. Como apontando Malatesta; De Cea e Borrell (2012), Monte (2015), Monteiro (2020).

As Tabelas 4.25 e 4.26 e as Figuras 4.21 (a) e (b) exibem os resultados de tenacidade obtidos no ensaio EDP para o traço PV50-F2 e PV50-F3 para  $\delta p$  equivalente a 4,0 mm, nas três idades analisadas.

**Tabela 4.25 – Resultados médios de tenacidade e análise estatística dos traços PV50-F2 e PV50-F3.**

Traço	Idade (dias)	Tenacidade média (J)	Desvio padrão (J)	CV (%)	Diferença significativa em relação aos 28 dias
PV50-F2	28	191,73	36,18	18,87	-
	56	192,44	46,97	24,41	NÃO
	91	210,27	77,30	36,76	NÃO
PV50-F3	28	249,69	46,64	18,68	-
	56	288,19	78,88	27,37	NÃO
	91	292,42	119,20	40,76	NÃO

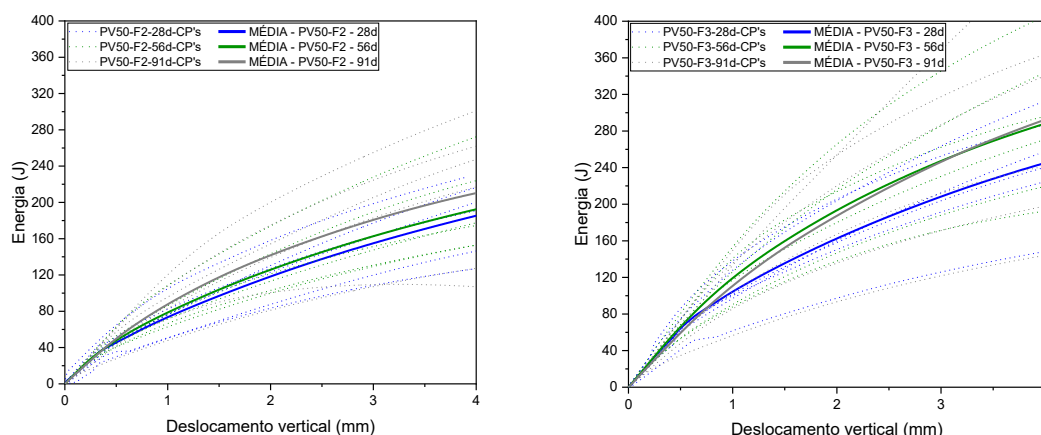
Fonte: Elaborado pela autora (2022)

**Tabela 4.26 – Resultado da análise estatística entre os traços PV50-F2 e PV50-F3.**

Idade (dias)	Traço	Traço	Diferença estatística entre os traços
28	PV50-F2	PV50-F3	NÃO
56	PV50-F2	PV50-F3	NÃO
91	PV50-F2	PV50-F3	NÃO

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

**Figuras 4.21 – Curvas de energia versus deslocamento vertical do traço (a) PV50-F2 e (b) PV50-F3 das três idades analisadas.**



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Os CV das amostras PV50-F2 e PV50-F3 alcançaram 36,7% e 40,0%, respectivamente, no entanto, empregado o nível de significância ( $p$ ) de 0,05, pode-se afirmar que as tenacidades ( $\delta p = 4,00$  mm) das amostras são estatisticamente similares para as três idades avaliadas, apresentadas na Tabela 4.25. Observa-se, nas Figuras 4.21 (a) e (b), que as curvas médias de tenacidade se sobrepõem em alguns trechos durante o deslocamento vertical, corroborando o estudo estatístico.

Para as três idades analisadas a capacidade de absorção de energia ( $\delta p = 4,00$  mm) dos traços PV50-F2 e PV50-F3 foram consideradas estatisticamente equivalentes. Logo, a incorporação de fibra metálica não interferiu na tenacidade dos compósitos cimentícios com 50% de substituição de vidro moído por cimento.

Sendo assim, a Tabela 4.27 apresenta o resultado da análise estatística entre os traços com teor de adição de fibras metálicas semelhantes em relação ao teor de substituição de cimento por vidro moído.

**Tabela 4.27 – Resultado da análise estatística entre os traços com o mesmo teor de adição de fibra de aço.**

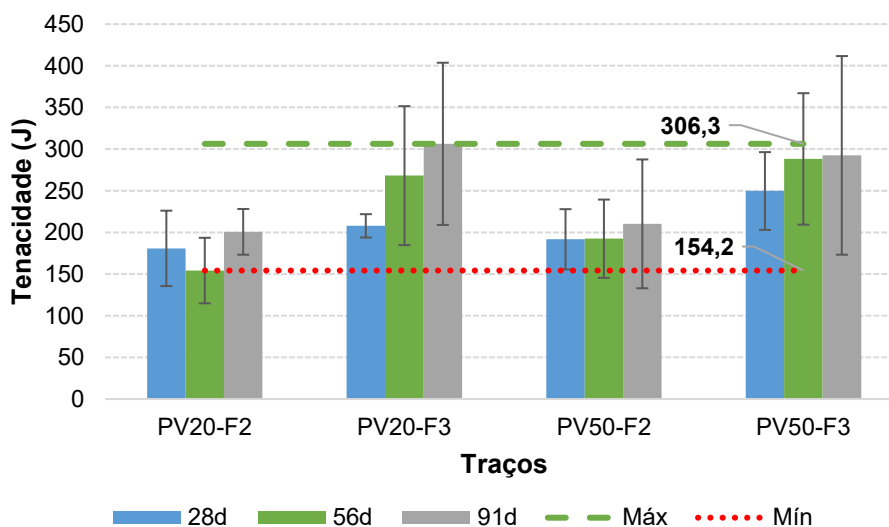
Idade (dias)	Traço	Traço	Diferença estatística entre os traços
28	PV20-F2	PV50-F2	<b>NÃO</b>
56	PV20-F2	PV50-F2	<b>NÃO</b>
91	PV20-F2	PV50-F2	<b>NÃO</b>
28	PV20-F3	PV50-F3	<b>NÃO</b>
56	PV20-F3	PV50-F3	<b>NÃO</b>
91	PV20-F3	PV50-F3	<b>NÃO</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Conclui-se que os traços com teor de adição de fibras metálicas semelhantes em relação à variação de incorporação de pó de vidro não apresentaram diferença estatística entre si.

A Figura 4.22 exibe um panorama geral dos valores médios de tenacidade dos traços *versus* idades analisadas.

Figura 4.22 – Tenacidade das amostras para as três idades analisadas.



Observa-se que o valor médio máximo de tenacidade obtido foi de 306,3 J para o traço PV20-F3 aos 91 dias. Já a amostra PV20-F2, alcançou o valor médio mínimo de 154,2 J aos 28 dias. Os CV foram elevados (6,4% - 40,7%), visto que estudos anteriores reportam valores em torno de 0,2% a 32,5% (MONTE, 2015; GALO BARDES *et al.*, 2019; CARMONA; MOLINS; GARCÍA, 2020).

Os resultados alcançados no estudo estão alinhados com trabalhos anteriores, como os de Carmona, Molins e García (2020), que realizaram o EDP em concretos com 4,8 kg/m<sup>3</sup> e 12 kg/m<sup>3</sup> de fibras sintéticas de fator de forma igual a 64, e obtiveram 212,0 J; 290,0 J; e 390,0 J de tenacidade, respectivamente, para o deslocamento correspondente a 3,5 mm, enquanto Malatesta, De Cea e Borrell (2012) adotaram o consumo de 450,0 kg/m<sup>3</sup> de cimento e 25 kg/m<sup>3</sup>, 50 kg/m<sup>3</sup> e 75 kg/m<sup>3</sup> de fibras metálicas com fator de forma igual a 64, e obtiveram 241,8 J; 350,6 J; e 292,9 J, respectivamente, para o deslocamento vertical igual a 4,0 mm. Já para as fibras sintéticas, os autores utilizaram 13 kg/m<sup>3</sup>, 16 kg/m<sup>3</sup> e 39 kg/m<sup>3</sup>, alcançando uma tenacidade média igual a 185,9 J; 235,4 J; e 259,6 J, respectivamente, e CV médios menores que 15,0%.

## 5. CONCLUSÃO

---

Neste trabalho, procurou-se analisar experimentalmente a influência da utilização de vidro moído em substituição parcial ao cimento e das fibras metálicas nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho (CCUAD).

Para atingir tal objetivo, utilizou-se a dosagem empregada em trabalhos anteriores do Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana (Gesec) e de Salvador Filho *et al.* (2017). Foram utilizadas as proporções de 20% e 50% de pó de vidro em substituição volumétrica ao cimento, e adição de 2% e 3% de fibras metálicas em volume.

Mediante análises realizadas e resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho, destaca-se:

- A incorporação de pó de vidro e fibras de aço não comprometeu a consistência do compósito no estado fresco, visto que apenas o PV50-F3 apresentou índice de consistência marginalmente abaixo do mínimo adotado.
- Em relação à densidade de massa do compósito, houve decréscimo conforme ocorreu o aumento do teor de pó de vidro, enquanto a adição de fibras metálicas aumentou tal propriedade. Já o teor de ar incorporado dos traços com pó de vidro e fibra metálica se manteve constante (2%), e 33,3% abaixo do traço de referência (REF), porém apenas o traço PV50 divergiu e se mostrou (67,3%) abaixo do REF.
- Quanto à resistência à compressão axial, apenas as amostras PV50-F2 e PV50 apresentaram diferença estatística (com nível de segurança de 95%) em relação ao REF aos 28 dias. Já para as demais idades (56 e 91 dias), todos os traços foram estatisticamente equivalentes quando comparados ao REF.
- Aos 28 dias, os traços avaliados atingiram 83,0% da resistência da amostra de referência (REF). Observou-se que estatisticamente os traços PV20-F2 e PV20-F3 são considerados semelhantes entre si, bem como os traços PV50-F2 e PV50-F3. Porém, PV50 apresentou divergência estatística ante as amostras PV20-F2 e PV20-F3. A resistência à compressão da amostra PV50 equivale a 84,8% e 83,1% da resistência de PV20-F2 e PV20-F3, respectivamente. A resistência à compressão dos compósitos cimentícios com teores elevados de pó de vidro tende a ser menor em idades iniciais. No

entanto, devido à reação pozolânica a resistência tende a aumentar em idades posteriores.

- Aos 56 dias, observou-se que os compósitos cimentícios com o mesmo teor de adição de fibra metálica (2%), a amostra com 20% de pó de vidro (PV20-F2) apresentou resistência à compressão superior ante o traço com 50% de substituição de vidro moído por cimento (PV50-F2). Já, para o mesmo teor de adição de vidro moído (50%) o compósito sem fibras (PV50) exibiu resistência à compressão superior ante a amostra com 2% fibras metálicas (PV50-F2).
- Aos 91 dias, houve maior uniformidade nos valores de resistência à compressão dos compósitos cimentícios avaliados, visto o efeito pozolânico tardio do vidro moído.
- Os valores médios dos módulos de elasticidade alcançaram em torno de 45,0 GPa, ou seja, valores próximos aos de estudos anteriores. Ressalta-se que os traços foram considerados estatisticamente equivalentes ante a amostra REF.
- Quanto à resistência à tração na flexão, conclui-se que as amostras avaliadas foram estatisticamente semelhantes em relação à amostra REF.
- No tocante à resistência à tração por duplo puncionamento, a carga de ruptura (carga de fissuração) das amostras de 28 e 56 dias foi estatisticamente equivalente ao REF, ou seja, a carga máxima não é sensível à adição de fibras, porém, aos 91 dias, os traços PV20-F3 e PV50-F3 exibiram diferença estatística (análise de variância com nível de significância igual a 0,05) em relação ao REF.
- Todos os traços com adição de 3% (em volume) de fibras metálicas nas três idades analisadas apresentaram comportamento *hardening*, ou seja, alcançaram resistência residual maior que a resistência à tração por duplo puncionamento.
- Em relação as cargas residuais, as amostras apresentaram coeficientes de variação abaixo de 4,0%.
- Quanto à tenacidade, o compósito PV20-F3 exibiu acréscimo de capacidade de absorção de energia médio igual a 73,9% e 52,6% aos 56 e 91 dias, respectivamente, quando comparado ao traço PV20-F2. Logo, houve aumento da tenacidade dos traços com 3% de adição de fibra metálica e 20% de incorporação de pó de vidro aos 56 e 91 dias de idade.



- Os traços PV50-F2 e PV50-F3 foram considerados estatisticamente equivalentes. Logo, a incorporação de fibra metálica não interferiu na tenacidade dos compósitos cimentícios com 50% de substituição de vidro moído por cimento.
- Constatou-se que a variação no teor de substituição de cimento por pó de vidro não apresentou variação estatística em relação ao mesmo teor de adição de fibra de aço.

Com base nas considerações citadas acima, conclui-se que a substituição de 20% e 50% de cimento por vidro moído e a adição volumétrica de 2% e 3% acarretaram melhorias nas propriedades do compósito tanto no estado fresco quanto no endurecido. Ressalta-se que os traços com 50% de substituição de pó de vidro são promissores no âmbito da sustentabilidade, uma vez que as propriedades mecânicas foram mantidas e em alguns casos até aprimoradas.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- Avaliação de traços sem incorporação de pó de vidro e adição de 2% e 3% de fibras metálicas mediante EDP;
- Análise da influência do processo de cura térmica das amostras;
- Realização de modelagem numérica com os resultados experimentais obtidos no trabalho, objetivando a redução de consumo de material durante o programa experimental;
- Realização de análise comparativa entre os parâmetros do ensaio EDP estipulado pela NBR 16939 (ABNT, 2021) e ensaio de flexão em prismas preconizado pela NBR 16940 (ABNT, 2021), objetivando averiguar se as equações constitutivas são válidas para o concreto de ultra-alto desempenho;
- Avaliação do *Global Warming Potential* (GWP) dos traços a fim de mensurar a mitigação do gás de efeito estufa devido à utilização do pó de vidro.

## Referências bibliográficas

---

- ABBAS, S.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 429–441, 2015.
- ABDULKAREEM, O. M. *et al.* Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 235–246, 2018.
- ABRAVIDRO. **Panorama Abravidros - O mercado vidreiro em números 2019**. Disponível em: <<https://abravidro.org.br/mercado/panorama-abravidro/>>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2020.
- AGUERO, R. R. *et al.* Experimental study of concrete mixtures to produce UHPRC using sustainable brazilian materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 4, p. 766–789, ago. 2019.
- AIRE, C.; MOLINS, C.; AGUADO, A. Ensayo de doble punzonamiento para concreto reforzado con fibra: efecto del tamaño y origen de la probeta. **Concreto y cemento**. Investigación y desarrollo, v. 5, n. 1, p. 17-31, 2013.
- AL-OSTA, M. A. Exploitation of ultrahigh-performance fibre-reinforced concrete for the strengthening of concrete structural members. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 2018.
- ALBERTI, M. G.; ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J. C. A review on the assessment and prediction of the orientation and distribution of fibres for concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 151, p. 274-290, 2018.
- ALMEIDA, F. C. R. *et al.* Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31-38, 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Building code requirements for structural concrete and commentary. **ACI 318**. 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. **ASTM C618**. West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- \_\_\_\_\_. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. **ASTM C1202**. West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- \_\_\_\_\_. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). **ASTM C1260**. West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BEBIDAS - ABRABE. **Glass is Good**. Disponível em: <<https://www.abrabe.org.br/glass-is-good/>>. Acesso em: 12 abr. de 2021.
- Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento/historia/>>. Acesso em: 13 de outubro de 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

- \_\_\_\_\_. **NBR NM 49:** Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** agregado miúdo - determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739:** concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5751:** materiais pozolânicos - determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5752:** materiais pozolânicos - determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211:** agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7680-1:** concreto - extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto - parte 1: resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7681-1:** calda de cimento para injeção - Parte 1: requisitos . Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8522-1:** concreto endurecido - determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - parte 1: módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10908:** aditivos para argamassa e concreto - ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12653:** materiais pozolânicos — requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13276:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13278:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado . Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13279:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13956-1:** sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15530:** fibras de aço para concreto — requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 2019.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15577-1:** agregados - reatividade álcali-agregado - parte 1: guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto . Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **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 ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16605:** cimento Portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 16607**: cimento Portland — determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697**: cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16935**: projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16938**: concreto reforçado com fibras - controle da qualidade. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16939**: concreto reforçado com fibras - determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16940**: concreto reforçado com fibras - determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83515: Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción - Método Barcelona**. Barcelona, 2013.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - AFNOR. **NF P 18-470: Bétons fibrés à ultra-hautes performances—Spécification, performance, production et conformité**. AFNOR, Paris, 2016.

\_\_\_\_\_. **NF P 18-513: Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons**. AFNOR, Paris, 2012.

\_\_\_\_\_. **NF P 18-710: Calcul des structures en béton-Regies spécifiques pour les bétons fibrés a ultra-hautes performances (BFUP)**. AFNOR, Paris, 2016.

AZMEE, N. M.; SHAFIQ, N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, 1 dez. 2018.

AZREEN, N. M. *et al.* Radiation shielding of ultra-high-performance concrete with silica sand, amang and lead glass. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 370–377, 2018.

BHANDARI, PS1; TAJNE, K. M. Use of waste glass in cement mortar. **International journal of civil and structural engineering**, v. 3, n. 4, p. 704, 2013.

BAQERSAD, M.; SAYYAFI, E. A.; BAK, H. M. State of the art: mechanical properties of ultra-high performance concrete. **Civil Engineering Journal**, v. 3, n. 3, p. 190-198, 2017.

BARBAR, J. S. **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados**. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. doi:10.11606/T.102.2017.tde-23012017-100027.

BARROS, L. M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. doi:10.11606/T.18.2017.tde-31012017-163751.

BENTUR, A.; MINDESS, S.. **Fibre reinforced cementitious composites**. Crc Press, 2006.

BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. PRECAST, prestressed pedestrian BRIDGE-WORLD'S first reactive powder concrete bridge. **PCI journal**, v. 44, n. 5, 1999.

BLANCO, A. **Characterization and modelling of SFRC elements**. Tesi doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria de la Construcció, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2117/94843>>

BORGES, A. L. **Efeitos filer e pozolânico do pó de vidro em argamassas**. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14441>>.

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. UHPFRC: a review of material properties and design procedures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 957–971, 2017.

CARMONA, S.; MOLINS, C.; GARCÍA, S. Application of Barcelona test for controlling energy absorption capacity of FRS in underground mining works. **Construction and Building Materials**, v. 246, p. 118458, 2020.

CARVALHO, E. L. B. de. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro em substituição parcial ao cimento no concreto verde**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2019. Disponível em: <<http://bia.ifpi.edu.br:8080/jspui/handle/123456789/779>>

CASAGRANDE, C. A. **Desempenho de microfibras de aço funcionalizadas com silanos em concreto de ultra-alto desempenho reforçados com fibras**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/185611>>.

CASTRO, E. D. D. E. **Análise da aplicação de casca de café nas propriedades de tijolos de solo-cimento**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósico - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. Intrinsic scatter of FRC: an alternative philosophy to estimate characteristic values. **Materials and Structures**, v. 48, n. 11, p. 3537–3555, 2015.

CEMPRE, C. E. R.. **Fichas técnicas**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>>. Acesso em: 06 de junho de 2021.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/3207>>

\_\_\_\_\_. **Proposição de um método de dosagem para concreto de ultra alto desempenho (UHPC)**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/9052>>.

CHRIST, R. *et al.* **Aplicação do concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) em sistema construtivo habitacional no Brasil**. **CONCRETO & Construções**, n. dezembro, p. 52–56, 2019.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1699–1704, 2002.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton - DAfStb. **DAfStb 561: Ultrahochfester Beton – Sachstandsbericht**. Berlin, 2008.

DUCTAL® EXCELÊNCIA EM PERFORMANCE E ACABAMENTO. . [s.l: s.n.]. Disponível em: <[www.stone.ind.br/ductal.shtml](http://www.stone.ind.br/ductal.shtml)>.

FANG, C. *et al.* The influence of steel fibre properties on the shrinkage of ultra-high performance fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 242, 10 maio 2020.

FERDOSIAN, I.; CAMÕES, A.; RIBEIRO, M. High-volume fly ash paste for developing ultra-high performance concrete (UHPC). **Ciencia e Tecnologia dos Materiais**, v. 29, n. 1, p. e157–e161, 2017.

FERRARI, V. J.; ARQUEZ, A. P.; DE HANAI, J. B. Compósitos cimentícios de alto desempenho para aplicação como substrato de transição em vigas. **Revista ALCONPAT**, v. 6, n. 1, p. 52-63, 2016.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, p. 36, 2011.

FREITAS, T. O. G. **Efeito do pó de vidro na mitigação da reação álcali-sílica de compósitos cimentícios de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12137>

GALEOTE, E. *et al.* Correlation between the Barcelona test and the bending test in fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 529–538, 2017.

GALOBARDES, I. *et al.* Alternative quality control of steel fibre reinforced sprayed concrete (SFRSC). **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 1008–1015, 2019.

Global Cement and Concrete Association (GCCA). **GNR PROJECT Reporting CO2**. Disponível em: <<https://gccassociation.org/gnr/>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

GUIGNONE, G. C. **Desempenho de concretos com a utilização de resíduos da lapidação do vidro como substitutos parciais ao cimento**. Tese (Doutorado). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

HASSAN, A. M. T.; JONES, S. W.; MAHMUD, G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete(UHPFRC). **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 874–882, dez. 2012.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. doi:10.11606/T.3.2008.tde-19082008-172648.

HU, L.; HE, Z.; ZHANG, S. Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121744, 2020.

HUANG, W. *et al.* Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Composites**, v. 77, p. 86–101, 2017.

INTERGLAD. International Glass Database System. Disponível em:<[https://www.newglass.jp/interglad\\_n/gaiyo/info\\_e.html](https://www.newglass.jp/interglad_n/gaiyo/info_e.html)>. Acesso em: 28 de setembro de 2019.

ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Cap, v. 36, 2011.

ISLAM, G. M. S.; RAHMAN, M. H.; KAZI, N. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 1, p. 37–44, 2017.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - JSCE. **JSCE: Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cranks (HPFRCC)**. Japan, 2008. 113p.

JIANG, Y. *et al.* A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. **Journal of Environmental Management**, v. 242,

n. November 2018, p. 440–449, 2019.

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

KE-FENG, Tan; NICHOLS, John M. Performances of concrete under elevated curing temperature. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 19, n. 3, p. 65-67, 2004.

KOU, S. C.; XING, F. The effect of recycled glass powder and reject fly ash on the mechanical properties of fibre-reinforced ultrahigh performance concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2012, 2012.

KRAHL, P A. **Lateral stability of ultra-high performance fiber-reinforced concrete beams with emphasis in transitory phases**. 2018. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. doi:10.11606/T.18.2018.tde-27082018-125631.

LAMEIRAS, R. M. **Desenvolvimento de concretos através da utilização do resíduo do beneficiamento de chapas de granito (RBCG)**. Monografia (TCC em Engenharia Civil) - Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

LE HOANG, A.; FEHLING, E. Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 790–806, 30 out. 2017.

LEE, H. *et al.* Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 683–693, 2018.

LIU, Tiejun *et al.* Multiscale investigation on tensile properties of ultra-high performance concrete with silane coupling agent modified steel fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 111, p. 103638, 2020.

MALATESTA, S. C.; DE CEA, A. A.; BORRELL, C. M. Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 45, n. 7, p. 1053–1069, 2012.

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.

MARTINIE, L.; ROSSI, P.; ROUSSEL, N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. **Cement and concrete research**, v. 40, n. 2, p. 226-234, 2010.

MEHTA, A.; ASHISH, D. K. Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 29, p. 100888, 2020.

MINDESS, Sidney (Ed.). **Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete**. Woodhead Publishing, 2019.

MOHAMMADI, A.; GHIASVAND, E.; NILI, M. Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR); a review. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 119567, 2020.

MONTE, R. **Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/T.3.2016.tde-18022016-124850.

MONTE, R.; TOALDO, G. S.; FIGUEIREDO, A. D. de. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 19, p. 132-149, 2014.

MOREIRA DE ALENCAR MONTEIRO, V.; DE ANDRADE SILVA, F. The use of the Barcelona test as quality control of fiber reinforced shotcrete for underground mining. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120719, 2020.

MORSE, D. L.; EVENSON, J. W. Welcome to the Glass Age. **International Journal of Applied Glass Science**, v. 7, n. 4, p. 409–412, 2016.

MOSABERPANAH, M. A.; EREN, O.; TARASSOLY, A. R. The effect of nano-silica and waste glass powder on mechanical, rheological, and shrinkage properties of UHPC using response surface methodology. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 804–811, 2019.

MOSTOFINEJAD, D. *et al.* Durability of concrete containing recycled concrete coarse and fine aggregates and milled waste glass in magnesium sulfate environment. **Journal of Building Engineering**, v. 29, p. 101182, 2020.

MULLER, R. M. Pesquisas, projetos, tecnologia, controle da qualidade e usos do CRF no Brasil e no Mundo. **Revista IBRACON Concreto & Construções**, v. 87, n. 6, p. 57–62, 2017.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi:10.11606/D.3.2007.tde-10012008-100734.

NAAMAN, A. E.; K.WILLE. The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): five decades of progress, in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Glotzbach, *et al.*, (Eds.), **Proceedings of 3rd Hipermat: International Symposium on UHPC and Nano- technology for High Performanc.** p. 3–16, 2012.

NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/>>. Acesso em: 28 de março de 2022.

NOGUEIRA, A. B. **Avaliação da repetibilidade e da reprodutibilidade do ensaio de duplo puncionamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. doi:10.11606/D.3.2019.tde-17072019-081030.

NOGUEIRA, A. B. *et al.* Avaliação da reprodutibilidade do ensaio Barcelona para controle do concreto reforçado com fibras In: **59o. Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON**, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2017.

OLIVEIRA, C. O. e. **Estudo numérico e experimental da distribuição das fibras de aço em vigas de UHPFRC**. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. doi:10.11606/T.18.2020.tde-07022020-134801.

OLIVEIRA JR., A. DE. **Propriedades residuais de compósitos cimentícios de alto desempenho com pó de vidro submetidos a altas temperaturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12298>>

PUJADAS, P. **Caracterización y diseño del homigón reforzado con fibras plásticas. Tesis doctoral**, UPC, Departament d'Enginyeria de la Construcció, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2117/94840>>

RASHIDIAN-DEZFOULI, H.; RANGARAJU, P. R. Role of ground glass fiber as a pozzolan in portland cement concrete. **Transportation Research Record**, v. 2629, n. 1, p. 33–41, 2017.

ROADMAP. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. 2019.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compósitos de cimento Portland**.



Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de engenharia, Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9LEFBP>>.

SALVADOR FILHO, J. A. A. *et al.* Influência da utilização de pó de vidro em substituição ao cimento Portland na resistência à compressão de matrizes cimentícias de ultra alta resistência. In: **59o Congresso Brasileiro do Concreto - IIBRACON**, p. 14, 2017.

SHAFATIAN, S. M. H. *et al.* How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)? **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 143-153, 2013.

SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin. Value-added utilisation of waste glass in concrete. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 1, p. 81-89, 2004.

SHI, X. *et al.* Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension. **Construction and Building Materials**, v. 233, 10 fev. 2020.

SNIC. Sindicato Nacional de Indústria de Cimento. **Relatório Anual 2019**. Disponível em: [http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2019.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf). Acesso em: 02 de maio de 2021.

SNIS. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Sistema Nacional de Informações sobre Sanreamento (SNIS), v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2021.

SOARES, S. M. **Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14126>>.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 600–612, 2016.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 374–383, 2017.

TAGNIT-HAMOU, A. *et al.* Novel ultra-high-performance glass concrete. **Concrete International**, v. 37, n. 3, p. 41-47, 2015.

TAGNIT-HAMOU, Arezki; SOLIMAN, Nancy; OMRAN, Ahmed. Green ultra-high-performance glass concrete. In: **International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete**. Iowa State University Digital Press, 2016.

VAITKEVIČIUS, V.; ŠERELIS, E.; HILBIG, H. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 102–109, 2014.

VARSHNEYA, A. K.; MAURO, J. C. Introduction. **Fundamentals of Inorganic Glasses**, p. 1–18, 2019.

WANG, X. *et al.* Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density. **Cement and Concrete Research**, v. 126, 1 dez. 2019.

WILLE, K.; BOISVERT-COTULIO, C. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 33–43, 1 jul. 2015.

WILSON, W. *et al.* Micro-chemo-mechanical features of ultra-high performance glass concrete (UHPC). **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 104, n. June, p. 102373, 2019.

WU, Z. *et al.* Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 103, p. 8–14, 30 jan. 2016.

YOO, D. Y. *et al.* Biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete

with different fiber lengths and placement methods. **Cement and Concrete Composites**, v. 63, p. 51–66, 2015.

YOO, D. Y. *et al.* Size effect in ultra-high-performance concrete beams. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 157, p. 86–106, 1 maio 2016.

YOO, D. Y.; KANG, S. T.; YOON, Y. S. Enhancing the flexural performance of ultra-high-performance concrete using long steel fibers. **Composite Structures**, v. 147, p. 220–230, 2016.

YOO, D. Y.; YOON, Y. S. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. **Engineering Structures**, v. 102, p. 409–423, 1 nov. 2015.

ZAIN, M. F. M.; SAFIUDDIN, Md; YUSOF, K. M. Influence of different curing conditions on strength and durability of high-performance concrete. **ACI Special Publications**, v. 193, p. 275-292, 2000.

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

ZHANG, Y. *et al.* Flexural behaviors and capacity prediction on damaged reinforcement concrete (RC) bridge deck strengthened by ultra-high performance concrete (UHPC)layer. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 347–359, 10 ago. 2019.

ZHANG, Z.; SHAO, X. D.; ZHU, P. Direct tensile behaviors of steel-bar reinforced ultra-high performance fiber reinforced concrete: Effects of steel fibers and steel rebars. **Construction and Building Materials**, v. 243, 20 maio 2020.

ZHU, Y. *et al.* Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review. **Engineering Structures**, v. 205, p. 110035, 2020.

# APÊNDICE A

---

Neste apêndice, são apresentados os ensaios de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa.

## A.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS: CIMENTO, SÍLICA ATIVA E PÓ DE VIDRO

A caracterização química do cimento, a sílica ativa e o pó de vidro foram determinados mediante o ensaio de fluorescência de raios-X (FRX), técnica não destrutiva utilizada para identificar os elementos químicos presentes na amostra e estabelecer a concentração de cada componente. Foram utilizadas três técnicas: a espectrometria por plasma com emissão ótica (ICP-OES), a espectrometria por FRX e a gravimetria.

As amostras para o ensaio FRX foram preparadas por fusão alcalina, britagem, moagem, homogeneização e prensagem em leito de ácido bórico. As análises foram realizadas no laboratório da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cenen) em Poços de Caldas/MG.

As granulometrias dos aglomerantes foram aferidas por meio do granulômetro a laser *FRITSCH*, modelo *ANALYSETTE 22 NanoTec*. O granulômetro utiliza difração de lasers para determinar o tamanho das partículas pela teoria de cálculo de Mie. A preparação da amostra consistiu em adicionar uma determinada quantidade do material em um líquido composto por água potável em temperatura ambiente e dispersante químico de polimetacrilato de amônio *Darvan C-N* da *Vanderbilt*, com a finalidade de evitar a aglomeração das partículas no equipamento.

Especificamente para a sílica ativa, por se tratar de um material extremamente fino e com tendência à aglomeração, foi preparada uma solução com três partes de sílica ativa para cada parte de água potável à temperatura ambiente, com teor de 1% de dispersante de polimetacrilato de amônio em relação à água. Um pequeno moinho de bolas com esferas de alumina foi utilizado. O material foi desaglomerado mecanicamente por 1,5 horas. Tal metodologia foi necessária para desaglomerar as partículas maiores de sílica ativa e para averiguar a real granulometria do material.

A preparação das amostras, bem como o aparelho utilizado no experimento, encontram-se nas Figuras A.1 (a) e (b), respectivamente. A realização do ensaio ocorreu na Universidade de São Paulo (USP), no Laboratório de Engenharia de Materiais, *campus* São Carlos.

**Figuras A.1 – a) Preparação da amostra para o ensaio de granulometria (esquerda); b) aparelhagem para a realização do ensaio de granulometria (direita).**



Fonte: Freitas (2019)

As fases mineralógicas foram avaliadas por difração de raio-X (DRX) na unidade *Rigaku Rotaflex*, modelo *RU200B*, com parâmetros de  $2\theta/\theta$  de varredura nominal de  $3^\circ$  a  $120^\circ$ , passo de 0,0200/seg, varredura de  $2^\circ/\text{min}$  em tensão de 40kV e 60mA, e ânodo de cobre (*Cu*), exibindo qualitativamente os picos cristalinos de cada material. Os ensaios de DRX foram realizados no Laboratório Multiusuário de Cristalografia Estrutural do Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo (IFSC/USP).

A análise microestrutural por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), técnica que permite avaliar mediante imagens de alta resolução e em escala microscópica a morfologia dos materiais, foi realizada no equipamento *Inspect F50* da *FEI Company*, 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).

A massa específica dos aglomerantes foi aferida de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017), e a finura e superfície específica do material foram determinadas pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine) segundo a NBR 16372 (ABNT, 2015). O procedimento experimental foi executado no Laboratório de Materiais da Construção Civil do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo/SP.

O cimento foi caracterizado física e quimicamente conforme especificação da NBR 16697 (ABNT, 2018).

Foram realizados ensaios para determinação da atividade pozolânica do pó de vidro. O Índice de Atividade Pozolânica (IAP) do material foi aferido com cal aos 7 dias e com cimento Portland aos 28 dias, conforme a NBR 5751 (ABNT, 2015) e a NBR 5752 (ABNT, 2014), respectivamente. O procedimento foi executado no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

O ensaio de Chapelle modificado foi executado conforme preconização da NBR 15895 (ABNT, 2010), sendo realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

### A.1.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia natural quartzosa, com dimensão máxima de 1,2 mm. A Tabela A.1 expõe os ensaios realizados, bem como as normativas adotadas.

**Tabela A.1 – Ensaio de caracterização do agregado miúdo.**

<b>Ensaio realizado</b>	<b>Norma</b>
Absorção de água	NBR NM 30 (ABNT, 2001)
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2001)
Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária e do volume de vazios	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica e massa específica aparente	NBR NM 52 (ABNT, 2009)

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

### A.1.2 Estudos em pasta

O teor ótimo de aditivo superplastificante foi avaliado mediante ensaio cone de Marsh, conforme recomendação da NBR 7681 (ABNT, 2013), que avalia a fluidez das pastas com o decorrer do tempo.

A compatibilidade entre o aditivo superplastificante, o cimento, a sílica ativa e o pó de vidro foi determinada por meio do ensaio do mini-*slump* desenvolvido por Kantro (1980 apud AÏTCIN, 2000).

Os tempos de pega foram determinados de acordo com a NBR 16607 (ABNT, 2018), que estabelece o método para determinação dos tempos de início e fim de pega da pasta de cimento Portland utilizando o aparelho de Vicat.

# APÊNDICE B

Neste apêndice, são apresentados os resultados e discussões dos ensaios de caracterização dos materiais e ensaios em pasta utilizados na pesquisa.

## B.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS: CIMENTO, SÍLICA ATIVA E PÓ DE VIDRO

### B.1.1 Cimento

As características físicas e químicas do cimento Portland CP V ARI utilizado na pesquisa estão dispostas nas Tabela B.1 e Tabela B.2, respectivamente.

**Tabela B.1 – Características físicas do cimento Portland – CP V.**

Características e propriedades		Valores obtidos	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)
Massa específica NBR NM 23 (ABNT, 2000)		3,16 g/cm <sup>3</sup>	*
Início de pega NBR NM 65 (ABNT, 2002)		135 min	≥ 60 min
Fim de pega NBR NM 65 (ABNT, 2002)		210 min	≤ 600 min
Água para pasta de consistência normal		30%	*
Finura	Retido 75 µm (#200)	0,1%	≤ 6,0%
	Área específica**	665 m <sup>2</sup> /kg	*
Resistência à compressão ( $f_{cj}$ )	1 dia	27,5 MPa	≥ 14,0 MPa
	3 dias	42,00 MPa	≥ 24,0 MPa
	7 dias	48,7 MPa	≥ 34,0 MPa
	28 dias	52,2 MPa	*

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

\*\*Ensaio realizado no IPT (2019).

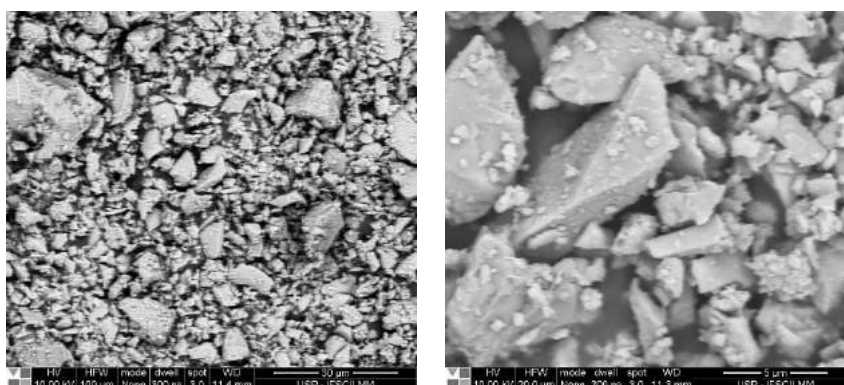
Fonte: Freitas (2019)

**Tabela B.2 – Características químicas do cimento Portland – CP V.**

Componentes	Valores obtidos (% em massa)	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018) (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	4,05	≤ 6,5
Óxido de cálcio ( $CaO$ )	61,4	*
Anidrido silícico ( $SiO_2$ )	23,0	*
Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ )	4,31	*
Trióxido de enxofre ( $SO_3$ )	2,97	≤ 4,5
Óxido férrico ( $Fe_2O_3$ )	2,49	*
Óxido de potássio ( $K_2O$ )	0,96	*



**Figura B.2 – Micrografia do cimento Portland (CP V).**



Fonte: Freitas (2019)

Nota-se que as partículas de cimento são angulares, em formatos lamelares ou cúbicos, mas sem geometria definida, apresentando tamanhos variados.

### B.1.2 Sílica ativa

As propriedades da sílica ativa que será utilizada no estudo estão apresentadas na Tabela B.3.

**Tabela B.3 – Propriedades físicas e químicas da sílica ativa.**

Propriedade	Valor obtido	Limites NBR 13956-1 (ABNT, 2012)
Anidro silícico ( $SiO_2$ )	94,1 %*	≥ 85,0 %
Perda ao fogo	3,6 %*	≤ 6,0 %
Área de superfície específica	247 m <sup>2</sup> /kg**	***
Umidade	Máx. 3,0 %****	≤ 3,0 %
% retida na peneira 45 µm	Máx. 10,0%****	≤ 10,0 %
Índice de atividade pozolânica	Mín 105 %****	≥ 105 %
Densidade g/cm <sup>3</sup>	2,25****	***

\*Ensaio realizado no CNEN/Lapoc (2018).

\*\*Ensaio realizado no IPT (2019).

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

\*\*\*\*Dados fornecidos por *Elkem Silicon Materials* (2017).

Fonte: Freitas (2019)

A Tabela B.4 apresenta a composição química mediante o ensaio de FRX da amostra de sílica ativa.

**Tabela B.4 – Composição química da sílica ativa.**

Componentes	Valores obtidos (% em massa)	Limites NBR 13956-1 (ABNT, 2012)
Perda ao fogo (PF)	3,60	≤ 6,0 %
Anidro silícico ( $SiO_2$ )	94,10	≥ 85,0 %



Componentes	Valores obtidos (% em massa)	Limites NBR 13956-1 (ABNT, 2012)
Óxido de potássio ( $K_2O$ )	1,28	*
Óxido férrico ( $Fe_2O_3$ )	< 0,50	*
Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ )	< 0,20	*
Óxido de cálcio ( $CaO$ )	< 0,20	*
Óxido de estrôncio ( $SrO$ )	< 0,20	*
Dióxido de titânio ( $TiO_2$ )	< 0,20	*
Dióxido de tório ( $ThO_2$ )	< 0,01	*
Uraninita ( $U_3O_8$ )	< 0,01	*

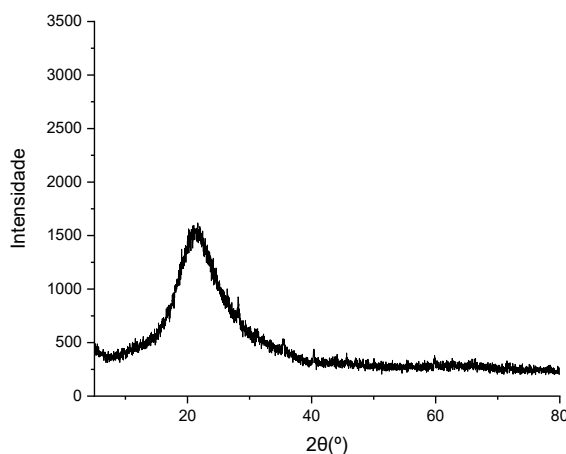
\*Sem limites estabelecidos na NBR 13956-1 (ABNT, 2012).

Fonte: Oliveira Jr. (2020)

Constata-se que a sílica ativa é composta basicamente por dióxido de silício ou sílica ( $SiO_2$  – 94,10%). O elevado teor de óxido de silício na sílica ativa potencializa sua reatividade pozolânica e propriedades cimentícias, o que torna o material adequado para uso em compósitos cimentícios (MEHTA; MONTEIRO, 2014; MEHTA; ASHISH, 2020).

A Figura B.3 apresenta o resultado obtido mediante análise por DRX. O gráfico não apresenta nenhuma indicação de fase cristalina. A amostra de sílica ativa apresentou o padrão típico de um material amorfo.

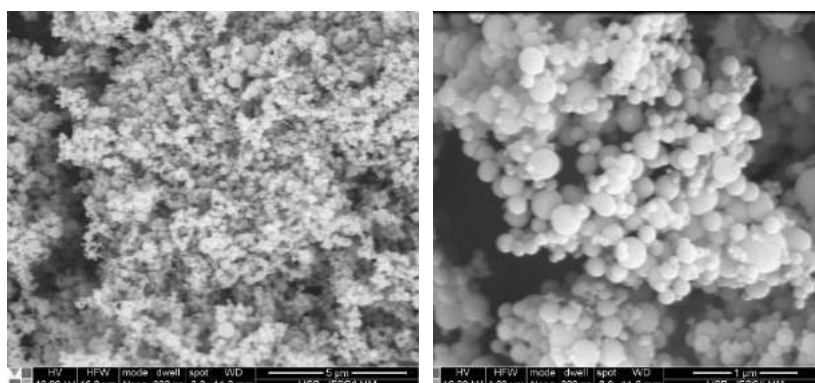
**Figura B.3 – Difratoograma da amostra de sílica ativa.**



Fonte: Oliveira Jr. (2020)

O mesmo padrão de comportamento da sílica ativa foi constatado por diferentes estudos (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2017; ABDULKAREEM *et al.*, 2018; CARVALHO, 2019; MEHTA; ASHISH, 2020). A Figura B.4 ilustra a micrografia da sílica ativa obtida pela MEV.

**Figura B.4 – Micrografia da sílica ativa.**



Fonte: Freitas (2019)

Observa-se que o formato das partículas de sílica ativa é esférico, com predisposição à aglomeração.

### B.1.3 Pó de vidro

A composição química do pó de vidro determinada por FRX encontra-se na Tabela B.5.

**Tabela B.5 – Composição química do pó de vidro.**

Componentes	Valores obtidos (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	0,58
Anidro silícico ( $SiO_2$ )	74,00
Óxido de sódio ( $Na_2O$ )	11,00
Óxido de cálcio ( $CaO$ )	9,10
Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ )	3,70
Óxido de Magnésio ( $MgO$ )	0,74
Óxido de potássio ( $K_2O$ )	0,56
Óxido férrico ( $Fe_2O_3$ )	0,42
Óxido de estrôncio ( $SrO$ )	0,039
Óxido de rubídio ( $Rb_2O$ )	0,016
Dióxido de tório ( $ThO_2$ )	< 0,01
Uraninita ( $U_3O_8$ )	< 0,01

Fonte: Oliveira Jr. (2020)

De acordo com a Tabela B.5, constata-se que o vidro utilizado é classificado como sódico-cálcico (VARSHNEYA; MAURO, 2019). A predominância do dióxido de silício ou sílica ( $SiO_2$ ) indica que o material possui resistência química elevada. Já os demais componentes em maior proporção são o óxido de sódio ( $Na_2O$  – 11,0%) e o óxido de cálcio ( $CaO$  – 9,1%).

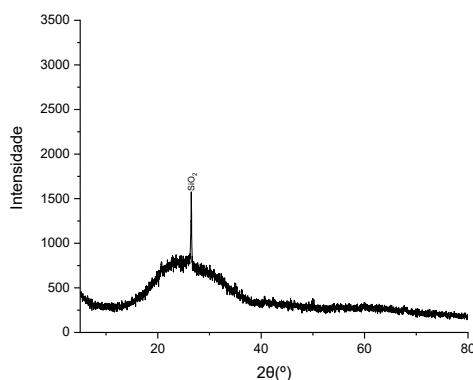
O  $Na_2O$  confere ao material dureza e rigidez, e também é responsável pela redução do ponto de fusão da sílica. O  $CaO$  é responsável pela estabilização química da mistura, impedindo que o vidro constituído de  $SiO_2$  e  $Na_2O$  seja solúvel (BARROS, 2016).

A análise também constatou a presença de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) em um teor relativamente elevado (3,70%). O  $Al_2O_3$  é um modificador que proporciona ao vidro maior resistência a choques mecânicos (VARSHNEYA; MAURO, 2019).

Em suma, a composição química do pó de vidro aplicado no estudo é semelhante a de diversos autores, que utilizam o vidro sódico-cálcico em concretos e argamassas (MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2012; KOU e XING, 2012; TAGNIT-HAMOU *et al.*, 2015; BARROS, 2016; TAGNIT-HAMOU e SOLIMAN, 2016; GUIGNONE, 2017; ISLAM, RAHMAN e KAZI, 2017; LEE *et al.*, 2018; CARVALHO, 2019; WILSON *et al.*, 2019; MOSTOFINEJAD *et al.*, 2020).

O estudo de caracterização mineralógica do vidro finamente moído foi conduzido mediante DRX. O resultado da análise encontra-se na Figura B.5.

**Figura B.5 – Difratograma da amostra do pó de vidro utilizado.**



Fonte: Oliveira Jr. (2020)

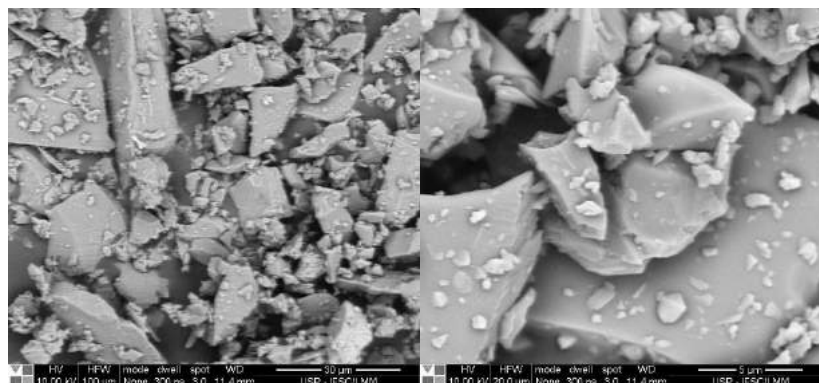
O material é considerado predominantemente amorfo, e o comportamento do elemento representado pela banda amorfa obtida na análise da DRX. No entanto, a amostra de pó de vidro apresentou um pico de fase cristalina de  $SiO_2$ .

O pico de  $SiO_2$  pode ser justificado por uma possível contaminação do material, pois, durante o processo de moagem a seco, as esferas de sílex, sob ação da gravidade e da rotação do moinho, realizam a moagem do material em partículas menores. Conseqüentemente, ocorre o desgaste do moinho e das bolas; a composição desses materiais é rica em  $SiO_2$ .

A estrutura amorfa do vidro moído obtida na análise está de acordo com diversos estudos já realizados (SALES, 2014; SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016; SOLIMAN; TAGNIT-

HAMOU, 2017; LEE *et al.*, 2018; MEHTA; ASHISH, 2020). A Figura B.6 apresenta o resultado da análise do vidro moído por MEV.

Figura B.6 – MEV do pó de vidro.



Fonte: Freitas (2019)

Observa-se que a morfologia da partícula do pó de vidro é análoga à do cimento, porém apresenta forma angular, com arestas mais definidas e superfície mais lisa.

#### B.1.3.1 Massa específica e finura Blaine

A Tabela B.6 apresenta a massa específica e a finura *Blaine* da granulometria analisada.

Tabela B.6 – Massa específica e finura Blaine do pó de vidro.

Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Finura <i>Blaine</i> (g/cm <sup>2</sup> )
Pó de vidro passante na #200	2,54	3930

Fonte: Borges (2020)

#### B.1.3.2 Ensaio de *Chapelle* modificado

A capacidade do pó de vidro de fixar cal para a formação de compostos hidratados foi analisada por meio do ensaio de *Chapelle* modificado preconizado pela normativa NBR 15895 (ABNT, 2010). A Tabela B.7 aponta os resultados obtidos.

Tabela B.7 – Ensaio de *Chapelle* modificado

Metodologia	Granulometria	Valor obtido	Limite NBR 15894-1 (ABNT, 2010)	NF P18- 513 (AFNOR, 2010)	Raverdy <i>et al.</i> (1980)
NBR 15895 (ABNT, 2010)	Passante na peneira #200	654,0 mg <i>Ca(OH)<sub>2</sub>/g</i>	≥750,0 mg <i>Ca(OH)<sub>2</sub>/g</i>	≥700,0 mg <i>Ca(OH)<sub>2</sub>/g</i>	≥330,0 mg <i>Ca(OH)<sub>2</sub>/g</i>

Fonte: Borges (2020) – Adaptado pela autora

A NBR 15895 (ABNT, 2010) não estabelece um limite mínimo para que o material seja considerado pozolânico. A norma brasileira NBR 15894-1 (ABNT, 2010) e a normativa

francesa NF P18-513 (AFN, 2010) estipulam para o metacaulim valores de fixação superiores a 750,0 mg  $Ca(OH)_2/g$  e 700,0 mg  $Ca(OH)_2/g$ , respectivamente.

No entanto, segundo Raverdy *et al.* (1980), para o material apresentar atividade pozolânica, o valor mínimo de consumo de hidróxido de cálcio necessário é de 330,0 mg  $Ca(OH)_2/g$ . Portanto, a amostra de pó de vidro analisada apresentou atividade pozolânica.

### B.1.3.3 Índice de atividade pozolânica (IAP)

A Tabela B.8 apresenta o índice de atividade pozolânica (IAP) obtido por meio dos ensaios de atividade pozolânica. As amostras foram analisadas com cal aos 7 dias e com cimento aos 28 dias.

Tabela B.8 – Índice de atividade pozolânica do vidro moído.

Metodologia	Granulometria	Nº CPs	Valores obtidos	Limites NBR 12653 (ABNT, 2014)	Limite ASTM C 618 (2019)
Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias NBR 5751 (ABNT, 2015)	Passante na #200	6	4,98 MPa	≥ 6,00 MPa	-
Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias NBR 5752 (ABNT, 2014)			81,39%	≥ 90,00%	≥ 75,00%

Fonte: Borges (2020)

Mediante análise dos resultados dispostos na Tabela B.8, verifica-se que a granulometria analisada não atingiu a resistência mínima de 6,00 MPa preconizada pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Em relação aos resultados referentes ao índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, constata-se que a amostra analisada não atingiu o índice mínimo de desempenho de 90% estipulado pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Em contrapartida, a normativa americana ASTM C618 (2019) recomenda que 75% é o índice de desempenho mínimo necessário para classificar um material como pozolânico. Sendo assim, o vidro moído passante na #200 está de acordo com a exigência da referida norma.

Guignone (2017) e Carvalho (2019) analisaram o índice de desempenho pozolânico de resíduo do vidro sódico-cálcico com cal aos 7 dias e com cimento aos 28 dias, respectivamente. Guignone (2017) analisou pó de vidro com  $d_{50} = 10,28 \mu\text{m}$ , e alcançou IAP igual a 6,28 MPa. Já Carvalho (2019), utilizou vidro moído passante na #200; a amostra alcançou 93% de índice de desempenho.

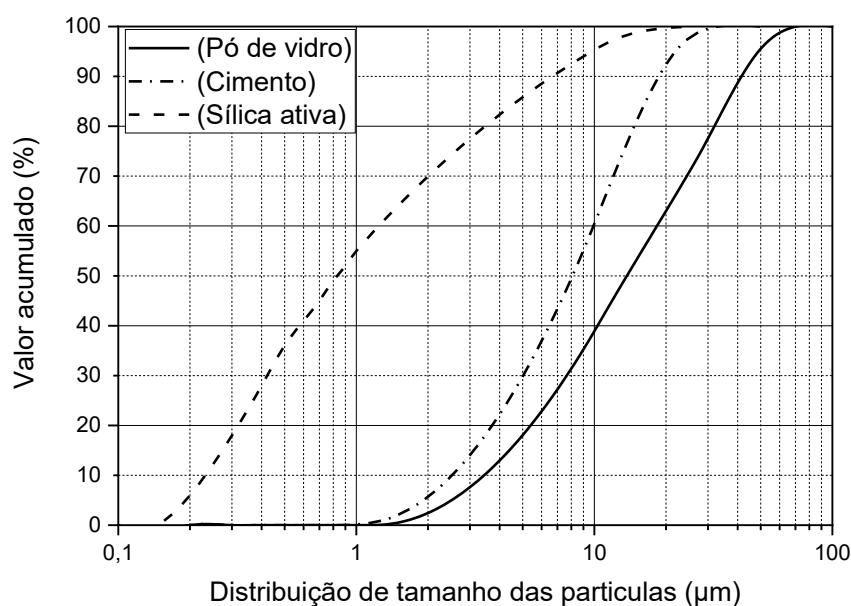
Lee *et al.* (2018) submeteram amostras de pó de vidro finamente moído com tamanho médio das partículas ( $d_{50} = 22,8 \mu\text{m}$ ) ao ensaio ASTM C618 (2019). Os autores averiguaram que as amostras aos 7, aos 28 e aos 90 dias de idade alcançaram o IAP médio de 90%.

Nesse cenário, optou-se por utilizar vidro finamente moído passante pela peneira #200, uma vez que o material apresentou rendimento satisfatório no peneiramento (65%) e cumpriu o requisito recomendado pela ASTM C618 (2019). Além disso, é possível dar continuidade a outros estudos já realizados e em andamento na mesma linha de pesquisa do Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana (Gesec).

#### B.1.4 Granulometria dos aglomerantes

As curvas de distribuição granulométrica do pó de vidro, do cimento e da sílica ativa podem ser observados na Figura B.7.

Figura B.7 – Curvas de distribuição granulométrica dos aglomerantes.



Fonte: Freitas (2019)

O diâmetro mediano ( $d_{50}$ ) da sílica ativa é de aproximadamente  $0,08 \mu\text{m}$ , o do cimento é de  $0,8 \mu\text{m}$ , e o do pó de vidro de  $14,0 \mu\text{m}$ .

Sales (2014) analisou resíduos de vidros transparentes e de cor âmbar. Os vidros foram moídos em moinhos de bolas de aço por via seca durante 24 horas. O pó de vidro da cor âmbar apresentou  $d_{50}$  igual a  $10,6 \mu\text{m}$ , e superfície específica de  $366,3 \text{ m}^2/\text{kg}$ . Matos e Sousa-Coutinho (2012) examinaram amostras de vidros moídos durante 48 horas e com  $d_{50}$  próximo a  $10,1 \mu\text{m}$ .

Guignone (2017), Soliman; Tagnit-Hamou (2017) e Wilson *et al.* (2019) utilizaram pó de vidro classificado como sódico-cálcico e  $d_{50}$  igual a  $10,3 \mu\text{m}$ ,  $12,0 \mu\text{m}$  e  $10,3 \mu\text{m}$ ,

respectivamente. Observa-se que a granulometria e as características do pó de vidro utilizado neste estudo assemelham-se aos de pesquisas realizadas anteriormente com o mesmo tipo de material.

### B.1.5 Agregado miúdo

As características físicas do agregado miúdo estão apresentadas na Tabela B.9.

**Tabela B.9 – Caracterização física do agregado miúdo.**

Característica	Metodologia	Agregado utilizado
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (ABNT, 2000)	0,64
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,56
Massa unitária seca e solta (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1475,78
Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1617,83
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Solução mais clara que a padrão
Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2001)	1,66

Fonte: Freitas (2019)

A composição química do agregado utilizado determinada por meio do FRX está exposta na Tabela B.10.

**Tabela B.10 – Composição química do agregado miúdo.**

Componentes	Valores obtidos (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	0,58
Anidro silícico ( $SiO_2$ )	94,00
Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ )	3,40
Óxido de potássio ( $K_2O$ )	1,20
Óxido férrico ( $Fe_2O_3$ )	0,67
Óxido de sódio ( $Na_2O$ )	0,37
Dióxido de titânio ( $TiO_2$ )	0,35
Óxido de cálcio ( $CaO$ )	0,071
Óxido de Cromo ( $Cr_2O_3$ )	0,049
Dióxido de tório ( $ThO_2$ )	< 0,01
Uraninita ( $U_3O_8$ )	< 0,01

Fonte: Freitas (2019)

Encontra-se na Tabela B.11 a composição granulométrica aferida pelo percentual de material retido e acumulado, bem como a determinação da dimensão máxima ( $D_{máx}$ ) e o módulo de finura ( $MF$ ) do agregado miúdo.

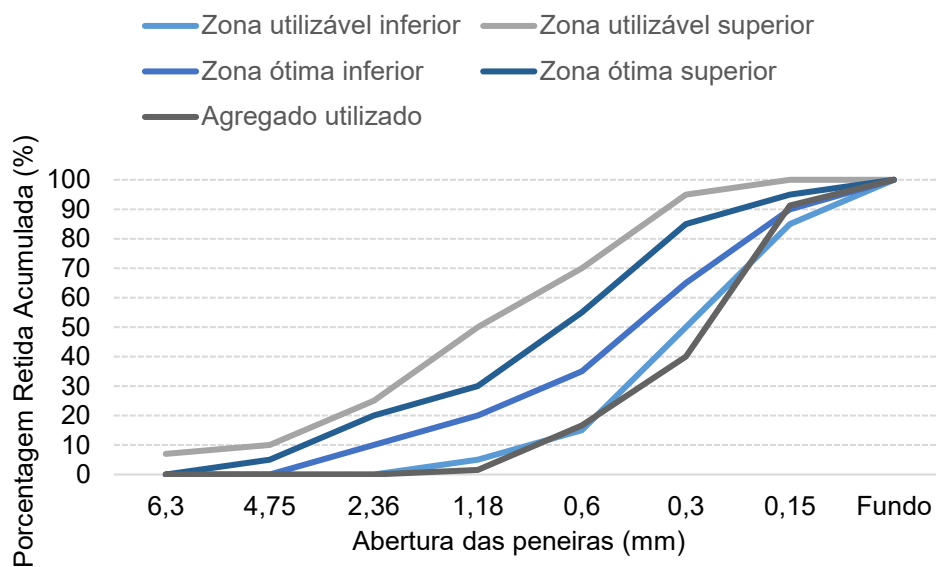
Tabela B.11 – Composição granulométrica do agregado utilizado.

Peneira (mm)	% Retida	% Acumulada
4,8	0	0
2,4	0	0
1,2	2	2
0,6	15	17
0,3	23	40
0,15	52	92
Fundo	8	100
	<i>MF</i>	1,49
	<i>D<sub>máx</sub></i>	1,2 mm

Fonte: Freitas (2019)

O gráfico de distribuição granulométrica do agregado miúdo analisado encontra-se na Figura B.8.

Figura B.8 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Freitas (2019)

Observa-se que a curva de distribuição granulométrica do agregado encontra-se próxima do limite inferior da zona utilizável, de acordo com a preconização da NBR 7211 (ABNT, 2009). Entretanto, particularmente os concretos de ultra-alto desempenho possuem uma quantidade elevada de finos, com a intenção de se obter um melhor empacotamento e uma melhor densificação do compósito.

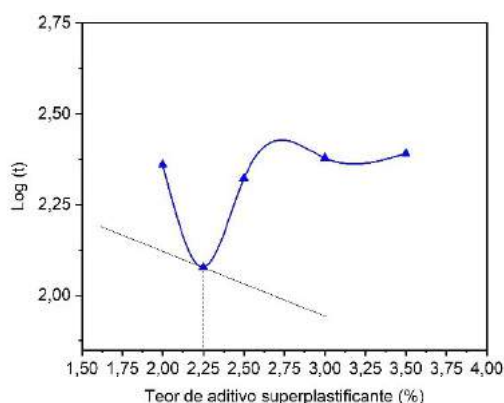


## B.2 ENSAIOS EM PASTA

### B.2.1 Cone de Marsh

A Figura B.9 apresenta a curva resultante do ensaio do cone de Marsh, considerando o teor do aditivo superplastificante (SP) entre 2,0% e 3,5%. Observa-se que mediante ensaio realizado, o conteúdo de SP de 2,25% foi considerado ideal.

**Figura B.9 – Teor ótimo de superplastificante.**



Fonte: Soares (2021)

Portanto, o teor de 2,25% de superplastificante foi utilizado em todos os traços avaliados (REF, PV20-F2, PV20-F3, PV50, PV50-F2 e PV50-F3).

### B.2.2 Miniabatimento

O ensaio de miniabatimento foi realizado nas pastas adotando o teor de 2,25% de SP especificado no ensaio do cone de Marsh. Para as pastas avaliadas (REF, PV20 e PV50), considerou-se o teor de sílica ativa de 8% em relação à massa de cimento. Foram determinadas as áreas de espalhamento aos 10 min, aos 30 min, aos 40 min e aos 60 min. Os resultados estão expostos na Tabela B.12.

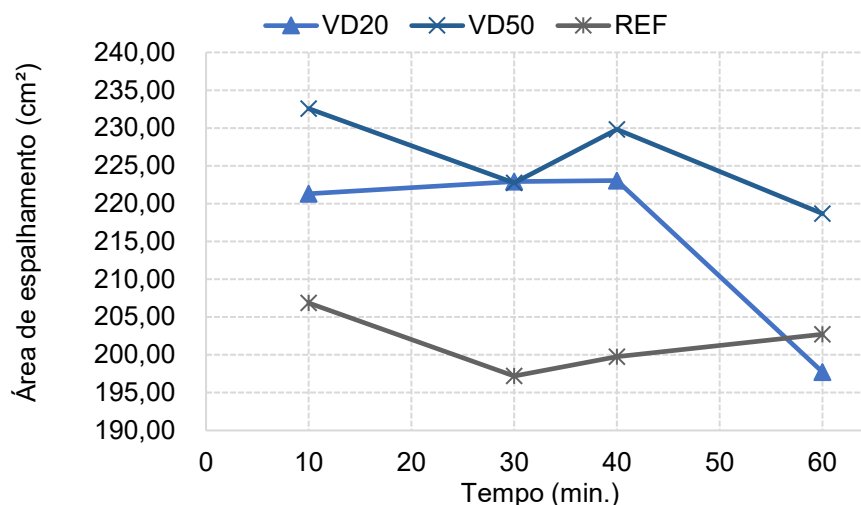
**Tabela B.12 – Miniabatimento dos traços com 2,25% de SP.**

Teores de SP (%)	Área de espalhamento (cm <sup>2</sup> )			
	10'	30'	40'	60'
REF	206,86	197,2	199,77	202,74
PV20	221,33	222,90	223,06	197,73
PV50	232,57	222,74	229,82	218,69

Fonte: Adaptado de Soares (2021)

A Figura B.10 exibe o gráfico com as curvas das áreas de espalhamento por tempo para cada pasta analisada.

Figura B.10 – Área de espalhamento das pastas (REF, PV20 e PV50) com teor de 2,25%.



Fonte: Adaptado de Soares (2021)

A pasta PV20 apresentou acréscimo de 0,70% na área de espalhamento nos primeiros 30 min. Em contrapartida, as pastas REF e PV50 obtiveram redução na área de espalhamento de 4,7% e 4,2%, respectivamente. Aos 30 min, as pastas PV20 e PV50 alcançaram a mesma área de espalhamento. Ao final do ensaio (60 min), as pastas REF, PV20 e PV50 apresentaram decréscimo de 2,0%, 10,6% e 5,9%, respectivamente. A incorporação do pó de vidro não interferiu na trabalhabilidade das pastas.

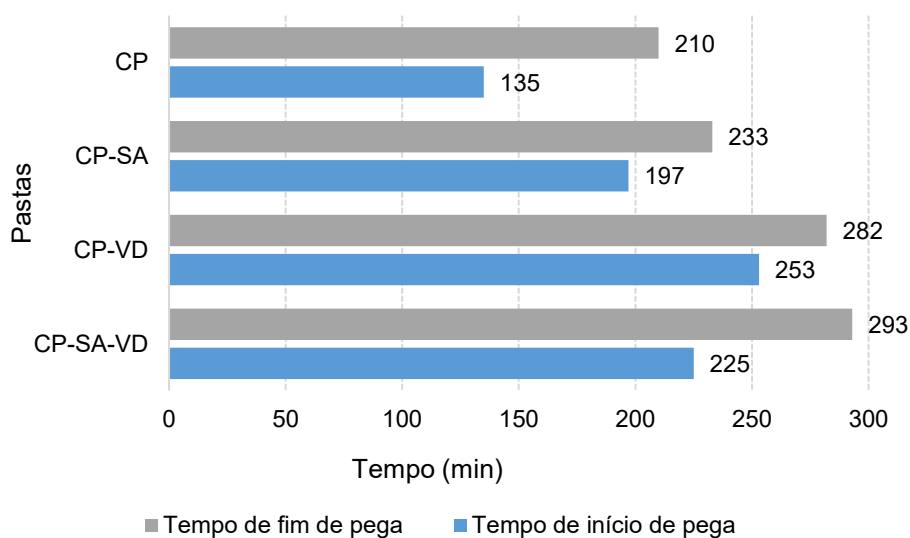
### B.2.3 Tempos de pega

O ensaio de determinação do tempo de pega foi realizado em quatro tipos de pastas. As nomenclaturas e composições das pastas avaliadas encontram-se na Tabela B.13. A Figura B.11 exibe os resultados do ensaio.

Tabela B.13 – Nomenclatura e composição das pastas.

Nomenclatura das pastas	Composição
CP	Cimento CP-V + água (30% consistência normal)
CP-SA	Cimento CP-V + 8% sílica ativa (massa) + água (30% consistência normal)
CP-VD	Cimento CP-V + 50% de vidro moído em substituição ao cimento (volume) + água (30% consistência normal)
CP-SA-VD	Cimento CP-V + 8% sílica ativa (massa) + 50% de vidro moído em substituição ao cimento (volume) + água (30% consistência normal)

Fonte: Soares (2021)

**Figura B.11 – Determinação dos tempos de início e fim de pega.**

Fonte: Soares (2021)

As pastas CP-SA, CP-VD e CP-SA-VD alcançaram tempos de início e de fim de pega maiores que a pasta CP. A pasta CP-VD apresentou maior tempo de início de pega (87,4%, ou seja, 118 min) em relação à pasta CP. Já a pasta CP-SA-VD obteve o maior tempo de final de pega (39,5%), totalizando um aumento de 83 min.

## APÊNDICE C

Neste apêndice, são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como dados estatísticos descritivos das análises estatísticas, além da descrição dos dados da ANOVA e do *Teste de Tukey* para resistência à compressão axial.

### C.1 ANÁLISE AOS 28 DIAS

Na Tabela C.1 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios analisados com a idade de 28 dias.

**Tabela C.1 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.**

Nº CP	REF (MPa)	PV20-F2 (MPa)	PV20-F3 (MPa)	PV50-F2 (MPa)	PV50-F3 (MPa)	PV50 (MPa)
1	141,36	151,77	150,47	126,82	126,40	118,00
2	139,10	149,41	150,49	120,32	131,07	102,93
3	150,10	140,12	147,28	126,37	136,79	140,35
4	148,61	122,85	142,73	127,17	130,74	127,43
5	138,52	152,44	141,03	132,35	132,82	135,22
6	158,05	140,55	143,25	134,36	135,48	103,15

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Na Tabela C.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

**Tabela C.2 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
REF	6	875,74	145,96	58,76
PV20-F2	6	857,13	142,86	125,48
PV20-F3	6	875,25	145,87	16,91
PV50-F2	6	767,39	127,90	24,62
PV50-F3	6	793,31	132,22	13,86
PV50	6	727,09	121,18	254,35

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

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

Tabela C.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 28 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	3258,82	5	651,76	7,92	7,50E-05	2,53
Dentro dos grupos	2469,94	30	82,33			
Total	5728,76	35			Conclusão: Rejeitar $H_0$	

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: deve-se rejeitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente divergentes foi realizado o teste de *Tukey*, os resultados podem ser observados na Tabela C.4.

Tabela C.4 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 28 dias.

Amostras	REF	PV20-F2	PV20-F3	PV50-F2	PV50-F3	PV50
REF		Não	Não	Sim	Não	Sim
PV20-F2			Não	Não	Não	Sim
PV20-F3				Sim	Não	Sim
PV50-F2					Não	Não
PV50-F3						Não

Nota: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

## C.2 ANÁLISE AOS 56 DIAS

Na Tabela C.5 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios analisados com a idade de 56 dias.

Tabela C.5 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 56 dias de idade.

Nº CP	REF (MPa)	PV20-F2 (MPa)	PV20-F3 (MPa)	PV50-F2 (MPa)	PV50-F3 (MPa)	PV50 (MPa)
1	116,73	123,24	133,39	109,89	122,26	132,28
2	114,89	135,76	138,14	120,73	129,79	133,79
3	133,72	142,62	137,82	122,58	120,12	131,40
4	132,23	134,28	138,40	120,37	109,06	125,71
5	132,48	121,96	132,63	121,37	123,70	136,02
6	129,40	129,86	132,73	112,67	122,82	132,63

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Na Tabela C.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 56 dias de idade.

**Tabela C.6 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 56 dias de idade.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
REF	6	759,46	126,58	71,86
PV20-F2	6	787,72	131,29	62,28
PV20-F3	6	813,12	135,52	8,23
PV50-F2	6	707,61	117,94	27,91
PV50-F3	6	727,76	121,29	46,46
PV50	6	791,83	131,97	11,96

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 56 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela C.7.

**Tabela C.7 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 56 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1376,94	5	275,39	7,22	1,53E-04	2,53
Dentro dos grupos	1143,49	30	38,12			
Total	2520,43	35			Conclusão: Rejeitar $H_0$	

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: deve-se rejeitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente divergentes foi realizado o teste de *Tukey*, os resultados podem ser observados na Tabela C.8.

**Tabela C.8 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 56 dias.**

Amostras	REF	PV20-F2	PV20-F3	PV50-F2	PV50-F3	PV50
REF		Não	Não	Não	Não	Não
PV20-F2			Não	Sim	Não	Não
PV20-F3				Sim	Sim	Não
PV50-F2					Não	Sim
PV50-F3						Não

Nota: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

### C.3 ANÁLISE AOS 91 DIAS

Na Tabela C.9 são apresentados os valores de resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios analisados com a idade de 91 dias.

**Tabela C.9 – Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.**

Nº CP	REF (MPa)	PV20-F2 (MPa)	PV20-F3 (MPa)	PV50-F2 (MPa)	PV50-F3 (MPa)	PV50 (MPa)
1	124,44	123,26	124,78	120,02	127,90	130,11
2	120,52	121,42	134,79	117,08	127,21	125,05
3	128,62	127,41	139,27	121,49	116,85	131,96
4	126,83	129,48	130,53	99,74	114,98	110,62
5	125,19	134,77	127,08	116,15	121,15	129,49
6	113,99	119,21	130,84	115,90	129,85	127,02

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Na Tabela C.10 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

**Tabela C.10 – Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
REF	6	739,60	123,27	28,02
PV20-F2	6	755,54	125,92	33,12
PV20-F3	6	787,29	131,21	27,34
PV50-F2	6	690,38	115,06	61,30
PV50-F3	6	737,94	122,99	38,85
PV50	6	754,25	125,71	60,55

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela C.11.

**Tabela C.11 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	840,55	5	168,11	4,05	6,31E-03	2,53
Dentro dos grupos	1245,92	30	41,53			
Total	2086,47	35			Conclusão: Rejeitar $H_0$	

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: deve-se rejeitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente divergentes foi realizado o teste de *Tukey*, os resultados podem ser observados na Tabela C.12.

**Tabela C.12 – Teste de Tukey para os compósitos cimentícios da resistência à compressão axial aos 91 dias.**

Amostras	REF	PV20-F2	PV20-F3	PV50-F2	PV50-F3	PV50
REF		Não	Não	Não	Não	Não
PV20-F2			Não	Não	Não	Não
PV20-F3				Sim	Não	Não
PV50-F2					Não	Não
PV50-F3						Não

Nota: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa

Fonte: Elaborado pela autora (2022)



## APÊNDICE D

Neste apêndice, são apresentados dados complementares do ensaio, valores detalhados por corpo de prova, dados estatísticos descritivos das análises dados da ANOVA para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade.

A Tabela D1 apresenta os valores de módulo de elasticidade estático e na Tabela D.2 são exibidos os valores estatísticos descritivos dos compósitos cimentícios aos 28 dias.

**Tabela D.1 – Valores obtidos de módulo de elasticidade estático dos compósitos cimentícios aos 28 dias.**

Nº CP	REF (GPa)	PV20-F2 (GPa)	PV20-F3 (GPa)	PV50-F2 (GPa)	PV50-F3 (GPa)	PV50 (GPa)
1	45,81	47,44	48,45	43,49	46,29	46,36
2	45,51	44,76	48,36	47,70	46,52	44,60
3	47,48	46,17	48,10	47,52	44,54	46,00

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

**Tabela D.2 – Valores estatísticos descritivos do módulo de elasticidade estático aos 28 dias de idade.**

Grupo	Contagem	Soma (GPa)	Média (GPa)	Variância (GPa <sup>2</sup> )
REF	3	138,80	46,27	1,13
PV20-F2	3	138,37	46,12	1,80
PV20-F3	3	144,91	48,30	0,03
PV50-F2	3	138,71	46,24	5,67
PV50-F3	3	137,35	45,78	1,17
PV50	3	136,96	45,65	0,86

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do módulo de elasticidade estático das amostras aos 28 dias de idade (Tabela D.3). Sendo assim, chegou-se à seguinte conclusão: que se deve aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois não há diferença significativa em relação as médias das populações.

**Tabela D.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios do módulo de elasticidade estático aos 28 dias.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	14,04	5	2,81	1,58	2,39E-01	3,11
Dentro dos grupos	21,32	12	1,78			
Total	35,36	17				
<b>Conclusão: Aprovar <math>H_0</math></b>						

Nota: Não foi necessário fazer o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

## APÊNDICE E

Neste apêndice, são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas, além da descrição dos dados da ANOVA para o ensaio de resistência à tração aos 28 dias de idade. Nas Tabelas E.1 e E.2 são apresentados os valores de resistência à tração por flexão e os resultados estatísticos descritivos dos compósitos cimentícios, respectivamente.

**Tabela E.1 – Resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios aos 28 dias.**

Nº CP	REF (MPa)	PV20-F2 (MPa)	PV20-F3 (MPa)	PV50-F2 (MPa)	PV50-F3 (MPa)
1	17,10	21,88	32,96	19,65	25,31
2	20,58	20,44	21,09	15,99	19,47
3	18,31	20,53	18,26	16,78	20,86
4	19,75	22,71	18,08	20,86	19,47
5	20,12	20,95	21,00	37,40	20,21
6	17,98	19,70	20,12	25,96	22,80

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

**Tabela E.2 – Valores estatísticos descritivos da resistência à tração por flexão dos compósitos cimentícios aos 28 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
REF	6	113,84	18,97	1,89
PV20-F2	6	126,21	21,04	1,18
PV20-F3	6	131,51	21,92	30,96
PV50-F2	6	136,64	22,77	63,89
PV50-F3	6	128,12	21,35	5,28

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

O resultado da ANOVA pode ser observado na Tabela E.3. Sendo assim, chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela E.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios da resistência à tração por flexão aos 28 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	48,00	4	12,00	0,58	6,79E-01	2,76
Dentro dos grupos	515,99	25	20,64			
Total	563,99	29			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

# APÊNDICE F

Neste apêndice, são apresentados dados complementares dos ensaios, valores detalhados por corpo de prova para cada propriedade, bem como dados estatísticos descritivos das análises estatísticas, além da descrição dos dados da ANOVA e do *Teste de Tukey* para o ensaio de duplo puncionamento.

## F.1 CARGA MÁXIMA ( $P_f$ )

### F.1.1 Análise aos 28 dias

Na Tabela F.1 são apresentados os valores de resistência à tração (carga máxima ( $P_f$ )) por duplo puncionamento (EDP) dos compósitos cimentícios avaliados aos 28 dias.

**Tabela F.1 – Valores obtidos da carga máxima ( $P_f$ ) dos compósitos cimentícios aos 28 dias.**

Nº CP	REF (kN)	PV20-F2 (kN)	PV20-F3 (kN)	PV50-F2 (kN)	PV50-F3 (kN)
1	121,98	120,79	122,33	125,83	113,20
2	136,61	135,37	133,90	106,93	158,50
3	134,99	118,81	131,63	117,05	120,42
4	142,01	137,50	129,89	112,47	157,38
5	128,92	121,66	126,49	130,62	145,18
6	135,54	120,83	130,90	125,42	119,01

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência à tração por EDP dos compósitos cimentícios aos 28 dias de idade.

**Tabela F.2 – Valores estatísticos descritivos da carga máxima ( $P_f$ ) aos 28 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (kN)	Média (kN)	Variância (kN <sup>2</sup> )
REF	6	800,05	133,34	48,40
PV20-F2	6	754,96	125,83	68,85
PV20-F3	6	775,14	129,19	17,18
PV50-F2	6	718,32	119,72	82,38
PV50-F3	6	813,69	135,62	419,59

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

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

**Tabela F.3 – ANOVA para os compósitos cimentícios da carga máxima ( $P_f$ ) aos 28 dias de idade.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	950,95	4	237,74	1,87	1,48E-01	2,76
Dentro dos grupos	3182,06	25	127,28			
Total	4133,01	29			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário fazer o teste de Tukey, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

### F.1.2 Análise aos 56 dias

Na Tabela F.4 são apresentados os valores de resistência à tração (carga máxima ( $P_f$ )) por duplo punção (EDP) dos compósitos cimentícios avaliados aos 56 dias.

**Tabela F.4 – Valores obtidos da carga máxima ( $P_f$ ) dos compósitos cimentícios aos 56 dias.**

Nº CP	REF (kN)	PV20-F2 (kN)	PV20-F3 (kN)	PV50-F2 (kN)	PV50-F3 (kN)
1	128,96	137,24	121,07	127,48	138,69
2	132,95	132,28	137,90	144,25	167,26
3	114,13	144,64	137,82	128,17	135,88
4	129,12	133,33	184,79	126,07	129,41
5	125,28	132,36	129,51	125,22	120,02
6	133,72	148,75	146,32	116,34	135,23

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.5 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência à tração por EDP dos compósitos cimentícios aos 56 dias de idade.

**Tabela F.5 – Valores estatísticos descritivos da carga máxima ( $P_f$ ) aos 56 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (kN)	Média (kN)	Variância (kN <sup>2</sup> )
REF	6	764,16	127,36	51,34
PV20-F2	6	828,60	138,10	49,30
PV20-F3	6	857,41	142,90	494,62
PV50-F2	6	767,53	127,92	82,35
PV50-F3	6	826,49	137,75	253,10

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados do módulo de elasticidade estático dos compósitos cimentícios aos 56 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela F.6.

**Tabela F.6 – ANOVA para os compósitos cimentícios da carga máxima ( $P_f$ ) aos 56 dias de idade.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1127,31	4	281,83	1,51	2,28E-01	2,76
Dentro dos grupos	4653,55	25	186,14			
Total	5780,86	29			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário fazer o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

### F.1.3 Análise aos 91 dias

Na Tabela F.7 são apresentados os valores de resistência à tração por duplo punção (EDP), ou seja, a carga máxima ( $P_f$ ) dos compósitos cimentícios estudados aos 91 dias de idade. Na Tabela F.8 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência à tração por EDP dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade.

**Tabela F.7 – Valores obtidos da carga máxima ( $P_f$ ) dos compósitos cimentícios aos 91 dias.**

Nº CP	REF (kN)	PV20-F2 (kN)	PV20-F3 (kN)	PV50-F2 (kN)	PV50-F3 (kN)
1	86,66	122,77	129,14	119,47	116,58
2	74,77	114,25	150,32	123,40	140,01
3	117,31	120,26	132,52	119,57	102,50
4	96,35	110,17	121,74	119,03	138,25
5	108,10	105,21	147,84	102,87	115,33
6	94,37	129,97	148,79	80,98	122,65

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

**Tabela F.8 – Valores estatísticos descritivos da carga máxima ( $P_f$ ) aos 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (kN)	Média (kN)	Variância (kN <sup>2</sup> )
REF	6	577,56	96,26	228,15
PV20-F2	6	702,63	117,11	81,06
PV20-F3	6	830,35	138,39	147,41
PV50-F2	6	665,32	110,89	266,11
PV50-F3	6	735,32	122,55	208,22

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de resistência à tração por EDP dos compósitos cimentícios aos 91 dias de idade. O resultado pode ser observado na Tabela F.9.

Tabela F.9 – ANOVA para os compósitos cimentícios da carga máxima ( $P_f$ ) aos 91 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	5735,78	4	1433,94	7,70	3,45E-04	2,76
Dentro dos grupos	4654,72	25	186,19			
Total	10390,50	29			Conclusão: Rejeitar $H_0$	

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: deve-se rejeitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente divergentes foi realizado o teste de *Tukey*, os resultados podem ser observados na Tabela F.10.

Tabela F.10 – Teste de Tukey dos compósitos cimentícios para resistência à tração por EDP aos 91 dias.

Amostras	REF	PV20-F2	PV20-F3	PV50-F2	PV50-F3
REF		Não	Sim	Não	Sim
PV20-F2			Não	Não	Não
PV20-F3				Sim	Não
PV50-F2					Não

Nota: NÃO = não há diferença significativa;  
SIM = há diferença significativa

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

## F.2 RESISTÊNCIA RESIDUAIS

### F.2.1 Carga ( $P_{0,5}$ )

#### F.2.1.1 PV20-F2

Na Tabela F.11 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Tabela F.11 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Nº CP	PV20-F2-28d (MPa)	PV20-F2-56d (MPa)	PV20-F2-91d (MPa)
1	2,67	2,21	3,29
2	6,22	2,23	4,21
3	3,32	3,47	3,72
4	3,18	4,13	3,68
5	3,03	3,00	3,94
6	3,37	2,47	5,10

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.12 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.12 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F2-28d	6	21,78	3,63	1,67
PV20-F2-56d	6	17,53	2,92	0,59
PV20-F2-91d	6	23,93	3,99	0,39

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.13

**Tabela F.13 – ANOVA da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,54	2	1,77	2,01	1,69E-01	3,68
Dentro dos grupos	13,24	15	0,88			
Total	16,78	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Notas: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

### F.2.1.2 PV20-F3

Na Tabela F.14 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo puncionamento (EDP) ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.14 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F3-28d (MPa)	PV20-F3-56d (MPa)	PV20-F3-91d (MPa)
1	4,99	2,90	6,96
2	5,35	5,42	9,23
3	4,58	5,08	5,99
4	4,71	9,78	7,36
5	4,26	9,30	7,87
6	5,17	4,15	9,63

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.15 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.15 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F3-28d	6	29,06	4,84	0,16
PV20-F3-56d	6	36,63	6,10	7,86
PV20-F3-91d	6	47,04	7,84	1,91

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.16.

**Tabela F.16 – ANOVA da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	27,16	2	13,58	4,10	3,80E-02	3,68
Dentro dos grupos	49,68	15	3,31			
Total	76,84	17			Conclusão: Rejeitar $H_0$	

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: deve-se rejeitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente divergentes foi realizado o teste de *Tukey*, os resultados podem ser observados na Tabela F.17.

**Tabela F.17 – Teste de Tukey da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Amostras	28 dias	56 dias	91 dias
28 dias		Não	Sim
56 dias			Não

Nota: NÃO = não há diferença significativa;  
SIM = há diferença significativa.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)



### F.2.1.3 PV50-F2

Na Tabela F.18 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.18 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), de PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F2-28d (MPa)	PV50-F2-56d (MPa)	PV50-F2-91d (MPa)
1	3,37	4,11	5,31
2	4,17	4,30	6,38
3	4,24	6,63	2,42
4	5,73	3,13	7,02
5	2,41	3,47	4,52
6	3,05	3,00	4,66

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.19 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.0.19 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F2-28d	6	22,98	3,83	1,35
PV50-F2-56d	6	24,64	4,11	1,80
PV50-F2-91d	6	30,32	5,05	2,62

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.20.

**Tabela F.0.20 – ANOVA da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	4,94	2	2,47	1,29	3,05E-01	3,68
Dentro dos grupos	28,82	15	1,92			
Total	33,76	17				

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

### F.2.1.4 PV50-F3

Na Tabela F.21 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.21 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), de PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F3-28d (MPa)	PV50-F3-56d (MPa)	PV50-F3-91d (MPa)
1	6,97	7,22	2,70
2	6,58	8,70	8,41
3	6,48	4,67	5,01
4	8,29	6,98	8,78
5	4,47	5,13	7,78
6	3,73	8,58	6,12

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.22 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.22 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F3-28d	6	36,53	6,09	2,85
PV50-F3-56d	6	41,28	6,88	2,85
PV50-F3-91d	6	38,81	6,47	5,46

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.23.

**Tabela F.23 – ANOVA da resistência residual ( $P_{0,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,88	2	0,94	0,25	7,80E-01	3,68
Dentro dos grupos	55,80	15	3,72			
Total	57,68	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

## F.2.2 Carga ( $P_{1,5}$ )

### F.2.2.1 PV20-F2

Na Tabela F.24 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo puncionamento (EDP) ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.24 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), de PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F2-28d (MPa)	PV20-F2-56d (MPa)	PV20-F2-91d (MPa)
1	1,89	1,41	2,45
2	3,55	1,81	2,49
3	2,49	2,77	2,86
4	2,27	2,81	3,08
5	2,15	2,68	2,81
6	2,47	1,77	3,79

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.25 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.25 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F2-28d	6	14,82	2,47	0,33
PV20-F2-56d	6	13,24	2,21	0,38
PV20-F2-91d	6	17,49	2,91	0,24

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.26. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela F.26 – ANOVA da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,54	2	0,77	2,43	1,22E-01	3,68
Dentro dos grupos	4,74	15	0,32			
Total	6,27	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

### F.2.2.2 PV20-F3

Na Tabela F.27 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.27 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), de PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F3-28d (MPa)	PV20-F3-56d (MPa)	PV20-F3-91d (MPa)
1	3,16	2,06	2,82
2	2,49	3,72	5,32
3	2,62	3,09	2,19
4	3,15	5,77	3,69
5	2,75	4,74	5,11
6	2,91	3,39	7,64

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.28 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.28 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F3-28d	6	17,09	2,85	0,08
PV20-F3-56d	6	22,77	3,79	1,69
PV20-F3-91d	6	26,77	4,46	3,94

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.29.

**Tabela F.29 – ANOVA da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,89	2	3,94	2,07	1,61E-01	3,68
Dentro dos grupos	28,56	15	1,90			
Total	36,44	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

### F.2.2.3 PV50-F2

Na Tabela F.30 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.30 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), de PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F2-28d (MPa)	PV50-F2-56d (MPa)	PV50-F2-91d (MPa)
1	3,05	2,56	3,29
2	2,63	3,25	3,81
3	2,52	3,66	1,90
4	2,99	2,02	4,38
5	1,88	2,36	3,19
6	2,67	2,09	1,70

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.31 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.31 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F2-28d	6	15,74	2,62	0,18
PV50-F2-56d	6	15,95	2,66	0,43
PV50-F2-91d	6	18,26	3,04	1,11

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.32.

**Tabela F.32 – ANOVA da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,65	2	0,33	0,57	5,78E-01	3,68
Dentro dos grupos	8,61	15	0,57			
Total	9,27	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

### F.2.2.4 PV50-F3

Na Tabela F.33 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.33 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), de PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F3-28d (MPa)	PV50-F3-56d (MPa)	PV50-F3-91d (MPa)
1	2,83	5,07	2,07
2	4,18	6,18	4,74
3	3,13	2,80	2,77
4	3,82	3,47	5,93
5	3,62	3,16	6,71
6	2,43	3,93	3,55

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.34 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.34 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F3-28d	6	20,01	3,34	0,43
PV50-F3-56d	6	24,63	4,10	1,65
PV50-F3-91d	6	25,77	4,29	3,32

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.35.

**Tabela F.35 – ANOVA da resistência residual ( $P_{1,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,10	2	1,55	0,86	4,43E-01	3,68
Dentro dos grupos	26,99	15	1,80			
Total	30,09	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

## F.2.3 Carga ( $P_{2,5}$ )

### F.2.3.1 PV20-F2

Na Tabela F.36 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo puncionamento (EDP) ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.36 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), de PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F2-28d (MPa)	PV20-F2-56d (MPa)	PV20-F2-91d (MPa)
1	1,55	1,03	1,66
2	2,93	1,49	1,83
3	2,02	2,14	2,18
4	1,84	1,86	2,31
5	1,69	2,15	2,33
6	1,86	1,44	2,56

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.37 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.37 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F2-28d	6	11,89	1,98	0,24
PV20-F2-56d	6	10,12	1,69	0,20
PV20-F2-91d	6	12,87	2,14	0,11

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.38. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela F.38 – ANOVA da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,65	2	0,32	1,76	2,06E-01	3,68
Dentro dos grupos	2,77	15	0,18			
Total	3,42	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Notas: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

### F.2.3.2 PV20-F3

Na Tabela F.39 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.39 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), de PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F3-28d (MPa)	PV20-F3-56d (MPa)	PV20-F3-91d (MPa)
1	2,28	1,56	2,82
2	1,94	2,98	5,32
3	1,76	2,50	2,19
4	2,58	4,18	3,69
5	2,13	3,36	5,11
6	1,95	2,63	7,64

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.40 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.40 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F3-28d	6	12,63	2,11	0,08
PV20-F3-56d	6	17,21	2,87	0,77
PV20-F3-91d	6	26,77	4,46	3,94

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.41.

**Tabela F.41 – ANOVA da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	17,33	2	8,66	5,42	1,70E-02	3,68
Dentro dos grupos	23,99	15	1,60			
Total	41,32	17			Conclusão: Rejeitar $H_0$	

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: deve-se rejeitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente divergentes foi realizado o teste de *Tukey*, os resultados podem ser observados na Tabela F.42.



**Tabela F.42 – Teste de Tukey da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Amostras	28 dias	56 dias	91 dias
28 dias		Não	Sim
56 dias			Não

Nota: NÃO = não há diferença significativa;  
SIM = há diferença significativa.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

### F.2.3.3 PV50-F2

Na Tabela F.43 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo puncionamento (EDP) ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.43 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), de PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F2-28d (MPa)	PV50-F2-56d (MPa)	PV50-F2-91d (MPa)
1	2,62	1,68	2,92
2	2,21	2,61	2,78
3	1,99	3,05	1,46
4	2,35	1,59	3,10
5	1,43	1,95	2,48
6	2,00	1,66	0,48

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.44 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.44 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F2-28d	6	12,60	2,10	0,16
PV50-F2-56d	6	12,54	2,09	0,36
PV50-F2-91d	6	13,23	2,20	1,05

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.45.

Tabela F.45 – ANOVA da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,05	2	0,02	0,05	9,55E-01	3,68
Dentro dos grupos	7,84	15	0,52			
Total	7,89	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

#### F.2.3.4 PV50-F3

Na Tabela F.46 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Tabela F.46 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), de PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Nº CP	PV50-F3-28d (MPa)	PV50-F3-56d (MPa)	PV50-F3-91d (MPa)
1	2,28	3,90	1,60
2	3,39	4,49	3,75
3	2,57	1,89	2,02
4	2,69	2,87	3,58
5	3,00	2,31	6,53
6	1,71	2,73	2,51

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.47 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Tabela F.47 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F3-28d	6	15,64	2,61	0,34
PV50-F3-56d	6	18,20	3,03	0,96
PV50-F3-91d	6	19,99	3,33	3,16

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.48.

**Tabela F.48 – ANOVA da resistência residual ( $P_{2,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,59	2	0,79	0,53	5,97E-01	3,68
Dentro dos grupos	22,31	15	1,49			
Total	23,89	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

## F.2.4 Carga ( $P_{3,5}$ )

### F.2.4.1 PV20-F2

Na Tabela F.49 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.49 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), de PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F2-28d (MPa)	PV20-F2-56d (MPa)	PV20-F2-91d (MPa)
1	1,26	0,68	1,11
2	2,48	1,10	1,37
3	1,52	1,55	1,53
4	1,40	1,41	1,91
5	1,26	1,78	1,85
6	1,39	1,14	2,05

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.50 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.50 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F2-28d	6	9,30	1,55	0,22
PV20-F2-56d	6	7,65	1,28	0,15
PV20-F2-91d	6	9,81	1,63	0,13

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.51.

**Tabela F.51 – ANOVA da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,42	2	0,21	1,27	3,08E-01	3,68
Dentro dos grupos	2,49	15	0,17			
Total	2,91	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

#### F.2.4.2 PV20-F3

Na Tabela F.52 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.52 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), de PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F3-28d (MPa)	PV20-F3-56d (MPa)	PV20-F3-91d (MPa)
1	1,65	1,19	2,09
2	1,55	2,22	2,60
3	1,34	1,96	0,43
4	2,06	3,22	2,61
5	1,64	2,43	3,07
6	1,32	1,94	3,10

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.53 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.53 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F3-28d	6	9,56	1,59	0,07
PV20-F3-56d	6	12,95	2,16	0,44
PV20-F3-91d	6	13,89	2,32	0,99

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.54.

**Tabela F.54 – ANOVA da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,73	2	0,87	1,72	2,12E-01	3,68
Dentro dos grupos	7,54	15	0,50			
Total	9,27	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

#### F.2.4.3 PV50-F2

Na Tabela F.55 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.55 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), de PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F2-28d (MPa)	PV50-F2-56d (MPa)	PV50-F2-91d (MPa)
1	2,19	1,31	2,38
2	2,15	1,95	2,11
3	1,55	2,51	1,16
4	1,83	1,24	2,59
5	1,03	1,69	1,93
6	1,55	1,34	-0,15

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.56 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.56 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F2-28d	6	10,31	1,72	0,19
PV50-F2-56d	6	10,04	1,67	0,24
PV50-F2-91d	6	10,03	1,67	1,04

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.57.

**Tabela F.57 – ANOVA da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,01	2	0,00	0,01	9,92E-01	3,68
Dentro dos grupos	7,35	15	0,49			
Total	7,36	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

#### F.2.4.5 PV50-F3

Na Tabela F.58 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.58 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), de PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F3-28d (MPa)	PV50-F3-56d (MPa)	PV50-F3-91d (MPa)
1	1,87	3,30	1,28
2	2,78	3,36	3,02
3	2,05	1,16	1,50
4	1,97	2,26	2,62
5	2,61	1,80	5,34
6	1,27	1,89	1,68

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.59 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.59 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F3-28d	6	12,55	2,09	0,30
PV50-F3-56d	6	13,76	2,29	0,77
PV50-F3-91d	6	15,44	2,57	2,30

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.60.

**Tabela F.60 – ANOVA da resistência residual ( $P_{3,5}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,70	2	0,35	0,31	7,35E-01	3,68
Dentro dos grupos	16,81	15	1,12			
Total	17,51	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

## F.2.5 Carga ( $P_{4,0}$ )

### F.2.5.1 PV20-F2

Na Tabela F.61 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.61 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), de PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F2-28d (MPa)	PV20-F2-56d (MPa)	PV20-F2-91d (MPa)
1	1,09	0,58	0,95
2	2,30	0,96	1,20
3	1,27	1,31	1,32
4	1,19	1,26	1,71
5	1,12	1,64	1,61
6	1,14	1,00	1,80

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.62 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.62 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F2-28d	6	8,11	1,35	0,22
PV20-F2-56d	6	6,75	1,12	0,13
PV20-F2-91d	6	8,60	1,43	0,11

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.63

**Tabela F.63 – ANOVA da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,31	2	0,15	1,00	3,92E-01	3,68
Dentro dos grupos	2,30	15	0,15			
Total	2,61	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

### F.2.5.2 PV20-F3

Na Tabela F.64 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.64 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), de PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F3-28d (MPa)	PV20-F3-56d (MPa)	PV20-F3-91d (MPa)
1	1,48	1,03	1,91
2	1,38	1,86	2,23
3	1,23	1,75	0,13
4	1,78	2,75	2,41
5	1,46	2,01	2,64
6	1,06	1,63	2,62

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.65 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.65 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV20-F3-28d	6	8,40	1,40	0,06
PV20-F3-56d	6	11,03	1,84	0,31
PV20-F3-91d	6	11,94	1,99	0,90

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.66. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte



conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela F.66 – ANOVA da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,13	2	0,56	1,32	2,96E-01	3,68
Dentro dos grupos	6,39	15	0,43			
Total	7,51	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

### F.2.5.3 PV50-F2

Na Tabela F.67 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo puncionamento (EDP) ( $P_{4,0}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.67 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), de PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F2-28d (MPa)	PV50-F2-56d (MPa)	PV50-F2-91d (MPa)
1	1,83	1,19	2,11
2	1,79	1,69	1,86
3	1,20	2,31	0,94
4	1,53	1,08	2,36
5	0,77	1,58	1,69
6	1,20	1,20	-0,37

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.68 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP ( $P_{4,0}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.68 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F2-28d	6	8,32	1,39	0,17
PV50-F2-56d	6	9,04	1,51	0,21
PV50-F2-91d	6	8,60	1,43	1,01

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{4,0}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.69.

**Tabela F.69 – ANOVA da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,04	2	0,02	0,05	9,53E-01	3,68
Dentro dos grupos	6,94	15	0,46			
Total	6,98	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

#### F.2.5.4 PV50-F3

Na Tabela F.70 são apresentados os valores de resistência residual à tração por duplo punção (EDP) ( $P_{4,0}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.70 – Valores obtidos da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), de PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F3-28d (MPa)	PV50-F3-56d (MPa)	PV50-F3-91d (MPa)
1	1,70	2,94	1,12
2	2,55	3,01	2,74
3	1,85	1,01	1,38
4	1,68	2,06	2,25
5	2,35	1,54	5,00
6	1,09	1,61	1,36

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.71 são apresentados os valores estatísticos descritivos de resistência residual à tração por EDP, do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.71 – Valores estatísticos descritivos da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
PV50-F3-28d	6	11,22	1,87	0,27
PV50-F3-56d	6	12,18	2,03	0,65
PV50-F3-91d	6	13,84	2,31	2,12

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados da resistência residual à tração por EDP ( $P_{4,0}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.72. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte

conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela F.72 – ANOVA da resistência residual ( $P_{4,0}$ ), do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,59	2	0,29	0,29	7,54E-01	3,68
Dentro dos grupos	15,23	15	1,02			
Total	15,82	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

## F.3 TENACIDADE

### F.3.1 PV20-F2

Na Tabela F.73 são apresentados os valores para o parâmetro tenacidade do traço PV20-F2 para deslocamento vertical igual a 4,0 mm nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.73 – Valores obtidos da tenacidade do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F2-28d (J)	PV20-F2-56d (J)	PV20-F2-91d (J)
1	140,80	100,18	167,19
2	267,28	132,27	181,03
3	184,00	187,50	194,02
4	162,50	188,94	207,20
5	152,20	189,70	207,98
6	178,31	126,79	246,67

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.74 são apresentados os valores estatísticos descritivos da tenacidade do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.74 – Valores estatísticos descritivos da tenacidade de PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (J)	Média (J)	Variância (J <sup>2</sup> )
PV20-F2-28d	6	1085,09	180,85	2049,63
PV20-F2-56d	6	925,37	154,23	1545,33
PV20-F2-91d	6	1204,09	200,68	752,59

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de tenacidade do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado

na Tabela F.75. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela F.75 – ANOVA da tenacidade do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	6519,66	2	3259,83	2,25	1,40E-01	3,68
Dentro dos grupos	21737,73	15	1449,18			
Total	28257,39	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

### F.3.2 PV20-F3

Na Tabela F.76 são apresentados os valores para o parâmetro tenacidade do traço PV20-F3 para deslocamento vertical igual a 4,0 mm nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.76 – Valores obtidos da tenacidade do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV20-F3-28d (J)	PV20-F3-56d (J)	PV20-F3-91d (J)
1	218,15	158,01	238,46
2	199,91	264,61	361,52
3	192,97	230,22	164,66
4	231,04	393,47	284,87
5	201,94	331,82	350,84
6	203,40	230,65	437,41

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.77 são apresentados os valores estatísticos descritivos da tenacidade do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.77 – Valores estatísticos descritivos da tenacidade do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (J)	Média (J)	Variância (J <sup>2</sup> )
PV20-F3-28d	6	1247,42	207,90	196,60
PV20-F3-56d	6	1608,77	268,13	6949,48
PV20-F3-91d	6	1837,77	306,29	9469,18

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de tenacidade do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.78. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela F.78 – ANOVA da tenacidade do traço PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	29529,52	2	14764,76	2,67	1,02E-01	3,68
Dentro dos grupos	83076,29	15	5538,42			
Total	112605,81	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

### F.3.3 PV50-F2

Na Tabela F.79 são apresentados os valores para o parâmetro tenacidade do traço PV50-F2 para deslocamento vertical igual a 4,0 mm nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.79 – Valores obtidos da tenacidade do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Nº CP	PV50-F2-28d (J)	PV50-F2-56d (J)	PV50-F2-91d (J)
1	221,06	174,63	247,46
2	199,49	223,99	261,98
3	191,80	272,37	127,27
4	227,97	152,90	300,93
5	126,58	177,64	216,97
6	183,50	153,10	106,99

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.80 são apresentados os valores estatísticos descritivos da tenacidade do traço PV20-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. Em seguida, realizou-se a ANOVA dos resultados de tenacidade do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias (Tabela F.81).

**Tabela F.80 – Valores estatísticos descritivos da tenacidade de PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (J)	Média (J)	Variância (J <sup>2</sup> )
PV50-F2-28d	6	1150,39	191,73	1309,07
PV50-F2-56d	6	1154,63	192,44	2206,39
PV50-F2-91d	6	1261,59	210,27	5974,75

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Em seguida, realizou-se a ANOVA dos resultados de tenacidade do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias (Tabela F.81).

Tabela F.81 – ANOVA da tenacidade do traço PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	1323,50	2	661,75	0,21	8,14E-01	3,68
Dentro dos grupos	47451,00	15	3163,40			
Total	48774,50	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois F calculado < F crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

### F.3.4 PV50-F3

Na Tabela F.82 são apresentados os valores para o parâmetro tenacidade do traço PV50-F3 para deslocamento vertical igual a 4,0 mm nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Tabela F.82 – Valores obtidos da tenacidade do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Nº CP	PV50-F3-28d (J)	PV50-F3-56d (J)	PV50-F3-91d (J)
1	225,48	343,92	144,12
2	312,38	405,74	340,57
3	241,24	192,71	198,09
4	285,40	270,93	364,01
5	254,59	219,60	466,00
6	179,06	296,23	241,70

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Na Tabela F.83 são apresentados os valores estatísticos descritivos da tenacidade do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Tabela F.83 – Valores estatísticos descritivos da tenacidade de PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Grupo	Contagem	Soma (J)	Média (J)	Variância (J <sup>2</sup> )
PV50-F3-28d	6	1498,15	249,69	2175,15
PV50-F3-56d	6	1729,13	288,19	6221,45
PV50-F3-91d	6	1754,50	292,42	14207,59

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de tenacidade do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.84. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela F.84 – ANOVA da tenacidade do traço PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	6650,83	2	3325,41	0,44	6,51E-01	3,68
Dentro dos grupos	113020,96	15	7534,73			
Total	119671,78	17			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

### F.3.5 PV20-F2 x PV20-F3

Na Tabela F.85 são apresentados os valores estatísticos descritivos da tenacidade dos traços PV20-F2 e PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.85 – Valores estatísticos descritivos da tenacidade dos traços PV20-F2 e PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (J)	Média (J)	Variância (J <sup>2</sup> )
PV20-F2-28d	6	1085,09	180,8484	2049,628
PV20-F2-56d	6	925,3745	154,2291	1545,328
PV20-F2-91d	6	1204,092	200,682	752,5898
PV20-F3-28d	6	1247,418	207,9031	196,6044
PV20-F3-56d	6	1608,773	268,1288	6949,477
PV20-F3-91d	6	1837,77	306,295	9469,177

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de tenacidade dos traços PV20-F2 e PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias (Tabela F.86).

**Tabela F.86 – ANOVA da tenacidade dos traços PV20-F2 e PV20-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	96844,67	5	19368,93	5,5438	0,000988	2,533555
Dentro dos grupos	104814	30	3493,801			
Total	201658,7	35			Conclusão: Rejeitar $H_0$	

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: deve-se rejeitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente diferentes. Para avaliar os valores estatisticamente divergentes foi realizado o teste de *Tukey*, os resultados podem ser observados na Tabela F.87.

Tabela F.87 – Teste de Tukey da tenacidade dos traços PV20-F2 e PV20-F3.

Amostras	PV20-F2-28d	PV20-F2-56d	PV20-F2-91d	PV20-F3-28d	PV20-F3-56d	PV20-F3-91d
PV20-F2-28d		Não	Não	Não	Não	Sim
PV20-F2-56d			Não	Não	Sim	Sim
PV20-F2-91d				Não	Não	Sim
PV20-F3-28d					Não	Não
PV20-F3-56d						Não

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

### F.3.6 PV50-F2 x PV50-F3

Na Tabela F.88 são apresentados os valores estatísticos descritivos da tenacidade dos traços P50-F2 e PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Tabela F.88 – Valores estatísticos descritivos da tenacidade dos traços PV50-F2 e PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Grupo	Contagem	Soma (J)	Média (J)	Variância (J <sup>2</sup> )
PV50-F2-28d	6	1150,395	191,7325	1309,066
PV50-F2-56d	6	1154,633	192,4388	2206,385
PV50-F2-91d	6	1261,592	210,2653	5974,75
PV50-F3-28d	6	1498,146	249,691	2175,147
PV50-F3-56d	6	1729,132	288,1887	6221,454
PV50-F3-91d	6	1754,499	292,4166	14207,59

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de tenacidade dos traços PV50-F2 e PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias (Tabela F.89). O resultado pode ser observado na Tabela F.84. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

Tabela F.89 – ANOVA da tenacidade dos traços PV50-F2 e PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	63604,13	5	12720,83	2,37814	0,062398	2,533555
Dentro dos grupos	160472	30	5349,065			
Total	224076,1	35				Conclusão: Aprovar $H_0$

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)



### F.3.7 PV20-F2 x PV50-F2

Na Tabela F.90 são apresentados os valores estatísticos descritivos da tenacidade dos traços P20-F2 e PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.90 – Valores estatísticos descritivos da tenacidade dos traços P20-F2 e PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (J)	Média (J)	Variância (J <sup>2</sup> )
PV20-F2-28d	6	1085,09	180,8484	2049,628
PV20-F2-56d	6	925,3745	154,2291	1545,328
PV20-F2-91d	6	1204,092	200,682	752,5898
PV50-F2-28d	6	1150,395	191,7325	1309,066
PV50-F2-56d	6	1154,633	192,4388	2206,385
PV50-F2-91d	6	1154,633	192,4388	2206,385

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de tenacidade dos traços PV20-F2 e PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.91. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela F.91 – ANOVA da tenacidade dos traços PV20-F2 e PV50-F2 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	11286,17	5	2257,233	0,978729	0,446784	2,533555
Dentro dos grupos	69188,73	30	2306,291			
Total	80474,9	35			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

### F.3.7 PV20-F3 x PV50-F3

Na Tabela F.92 são apresentados os valores estatísticos descritivos da tenacidade dos traços P20-F3 e PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.

**Tabela F.92 – Valores estatísticos descritivos da tenacidade dos traços P20-F3 e PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Grupo	Contagem	Soma (J)	Média (J)	Variância (J <sup>2</sup> )
PV20-F3-28d	6	1247,418	207,9031	196,6044
PV20-F3-56d	6	1608,773	268,1288	6949,477
PV20-F3-91d	6	1837,77	306,295	9469,177
PV50-F3-28	6	1498,146	249,691	2175,147
PV50-F3-56	6	1729,132	288,1887	6221,454
PV50-F3-91	6	1754,499	292,4166	14207,59

Fonte: Elaborada pela autora (2022)

A partir dos dados descritivos estatísticos realizou-se a ANOVA dos resultados de tenacidade dos traços PV20-F3 e PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias. O resultado pode ser observado na Tabela F.93. A partir da ANOVA chegou-se à seguinte conclusão: Aceitar  $H_0$ , ao nível de significância ( $p$ ) igual a 0,05, pois as médias das populações são significativamente iguais.

**Tabela F.93 – ANOVA da tenacidade dos traços PV20-F3 e PV50-F3 nas idades de 28, 56 e 91 dias.**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	38481,42	5	7696,284	1,177418	0,34335	2,533555
Dentro dos grupos	196097,2	30	6536,575			
Total	234578,7	35			Conclusão: Aprovar $H_0$	

Nota: Não foi necessário realizar o teste de Tukey, pois  $F$  calculado <  $F$  crítico.

Fonte: Elaborada pela autora (2022)