

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
***DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL***

**Avaliação das propriedades física e mecânica de cimentos com a  
incorporação do pó de vidro**

**Arthur de Sousa Lima Vasconcelos**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de São Carlos como parte dos  
requisitos para a conclusão da  
graduação em Engenharia Civil

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Fernanda  
Giannotti da Silva Ferreira

São Carlos  
2022

## *DEDICATÓRIA*

---

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha família.  
Sem eles nada disso seria possível.

## AGRADECIMENTOS

---

Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida.

Aos meus pais Josenilto e Jeanette que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória e por todo esforço investido na minha educação. Aos meus pais do coração, Adelino (*in memoriam*) e Nazaré pelo apoio incondicional e recepção em São Carlos. À minha irmã Andressa, por sua sinceridade e demandas de última hora.

Meus sinceros agradecimentos ao grupo GNS e aos meus melhores amigos: André Pradebon, Douglas Henrique, Fábio Cartaxo, Gabriele Vilas, Mayumi Isabel e Murilo Maturana. Poder contar com o companheirismo e o conhecimento destas pessoas foi essencial para o meu êxito.

Agradeço à professora e orientadora Fernanda Giannotti da Silva Ferreira pela oportunidade e orientação do trabalho, sempre aconselhando e com exemplar serenidade.

Agradeço também ao pessoal do Laboratório de Materiais e Componentes em especial ao amigo e técnico José Roberto, pela ajuda, orientação e conselhos durante os ensaios e pela resenha durante o intervalo com o café do Zé. À Silvete Soares pela oportunidade de trabalhar na pandemia e pela amizade. À Gabi Dias pela motivação, amizade e companheirismo durante a IC. A todos os integrantes do GESEC.

Agradeço ao Professor Guilherme Parsekian e ao Ricardo Luiz Canato, que disponibilizaram o Laboratório de Sistemas Estruturais para que fossem realizados os ensaios mecânicos e pelas conversas no intervalo.

Aos meus amigos, técnicos e professores do Instituto Federal do Piauí – Campus Parnaíba do curso de Edificações, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

A todos os meus amigos do curso de graduação que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo.

Por último, quero agradecer os meus professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos pela excelência da qualidade técnica e experiência compartilhada por cada um.

## RESUMO

A utilização do pó de vidro na composição do cimento como material cimentício suplementar (MCS) é uma excelente alternativa para mitigar a quantidade de resíduo gerado pela própria indústria do vidro, assim como reduzir a quantidade utilizada de clínquer, principal matéria prima do cimento Portland (CP). Além disso, a incorporação do vidro pode trazer benefícios nas propriedades das matrizes cimentícias tanto no estado fresco quanto no endurecido. Para analisar as propriedades física e mecânica da incorporação do pó de vidro na composição do cimento e atender aos requisitos da NBR 16697, foram determinados os tempos de pega, consistência normal da pasta e resistência à compressão de matrizes de cimento Portland com incorporação de pó de vidro nos teores de 0%, 5%, 15% e 25%. No ensaio de resistência à compressão, foram rompidos corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 50x100mm em idades de 3, 7 e 28 dias para cada cimento. Os materiais utilizados neste estudo são: CP V-ARI, areia normal e o pó de vidro proveniente de garrafas de cor âmbar com tamanho de partículas passantes na peneira de malha #200. O aumento da incorporação do vidro moído nos cimentos analisados proporcionou um maior módulo de finura e tempo de pega inicial impactando diretamente na trabalhabilidade e diminuição da resistência mecânica inicial devido a pozolanicidade do vidro. Aos 28 dias, observou-se uma redução de 8,83%, 19,45%, e 26,72% para os cimentos com teor de 5%, 15% e 25% de pó de vidro, respectivamente, em relação a referência com resistência à compressão de 54,12 MPa. Ademais, a análise estatística da resistência mecânica apontou que não há diferença estatística entre as idades analisadas para o traço de referência e com 5% de pó de vidro. Dentre os ensaios realizados, foram atendidos os requisitos mínimos para todos os cimentos estudados, exceto para a resistência à compressão aos 7 dias de idade para o CP75PV25 obtendo o valor de 32,13 MPa. Assim, o traço que relaciona a maior incorporação de pó de vidro na composição do cimento e atende aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 16697 dos ensaios desenvolvidos, é o cimento com a incorporação de 15% de vidro moído como adição mineral.

*Palavras-chave:* cimento; pó de vidro; material cimentício suplementar; comportamento mecânico

## ABSTRACT

The use of glass powder in the cement composition as supplementary cementitious material (SCM) is an excellent alternative to mitigate the amount of waste generated by the glass industry itself, as well as reduce the amount used of clinker, the main raw material of Portland cement (PC). Moreover, the incorporation of glass can bring benefits in the properties of cementitious matrices both in the fresh and hardened states. To analyze the physical and mechanical properties of the incorporation of glass powder in the cement composition and meet the requirements of NBR 16697, the setting times, normal consistency of the paste and compressive strength of Portland cement matrices with incorporation of glass powder at 0%, 5%, 15% and 25% were determined. In the compressive strength test, 50x100mm cylindrical specimens were broken at ages of 3, 7 and 28 days for each cement. The materials used in this study are: CP V-ARI, normal sand and the glass powder from amber colored bottles with particle size passing the #200 mesh sieve. The increase in the incorporation of ground glass in the analyzed cements provided a higher fineness modulus and initial setting time directly impacting the workability and decrease in the initial mechanical strength due to the pozzolanicity of the glass. At 28 days, a reduction of 8.83%, 19.45%, and 26.72% was observed for cements with contents of 5%, 15% and 25% of glass powder, respectively, in relation to the reference with compressive strength of 54.12 MPa. Furthermore, the statistical analysis of the mechanical strength indicated that there is no statistical difference between the ages analyzed for the reference mixture and with 5% glass powder. Among the tests performed, the minimum requirements were met for all cements studied except for the compressive strength at 7 days of age for CP75PV25, which obtained the value of 32.13 MPa. Thus, the mix that relates the highest incorporation of glass powder in the composition of the cement and meets the minimum requirements established by NBR 16697 for the tests developed, is the cement with the incorporation of 15% ground glass as mineral addition.

*Key-words: cement; glass powder; supplementary cementitious material; mechanical behavior*

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1: Evolução da pega e do endurecimento no concreto.....	15
Figura 2: Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto. ....	16
Figura 3: Resistência à compressão do concreto em diferentes proporções de pó de vidro em substituição ao cimento (OPC-0%, 15GP-15%, 30GP-30%, 45GP-45% e 60GP-60%) .....	21
Figura 4: Etapas gerais do programa experimental.....	22
Figura 5: Materiais utilizados nos ensaios.....	23
Figura 6: a) Limpeza dos rótulos e lavagem das garrafas; b) Secagem ao ar das garrafas; c) Quebra das garrafas em cacos em uma betoneira com bolas de aço; d) Moagem final em moinho de bolas; e) Produto final obtido da moagem.....	24
Figura 7: (a) Peneiramento mecânico do pó de vidro utilizando peneiras de malha #200; (b) Vidro moído passante no fundo.....	24
Figura 8: Argamassadeira utilizada no procedimento de mistura dos materiais com capacidade total de 5 litros.....	25
Figura 9: Corpos de prova na câmara seca no período inicial de cura.....	26
Figura 10: (a) Tanque de cura; (b) Corpos de prova imersos no tanque.....	26
Figura 11: Etapa inicial - Conjunto utilizado no ensaio de módulo de finura do cimento.....	27
Figura 12: Etapa final - Pesagem do resíduo de cimento retido na peneira #200.....	28
Figura 13: Materiais necessários para o ensaio da consistência normal da pasta: água e cimento.....	29
Figura 14: Ensaio de consistência normal da pasta com o auxílio do aparelho de Vicat.....	30
Figura 15: Molde e placa base para o ensaio dos tempos de pega.....	30
Figura 16: (a) Recipiente para armazenamento das amostras utilizadas durante o ensaio dos tempos de pega; (b) Estrutura metálica contendo as amostras sob a água.....	31
Figura 17: Penetração da agulha no tempo de início de pega com o aparelho de Vicat.....	32
Figura 18: Penetração da agulha no tempo de fim de pega com o aparelho de Vicat.....	33
Figura 19: Execução do ensaio de resistência à compressão axial.....	33
Figura 20: Resultados correlacionado os cimentos estudados com os tempos de pega inicial e final.....	37
Figura 21: Comparação dos valores dos resultados à compressão axial dos compósitos cimentícios .....	40

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1: Designação do cimento Portland conforme sua composição (porcentagem de massa).....	12
Tabela 2: Requisitos químicos do cimento Portland (expresso em porcentagem de massa). .....	13
Tabela 3: Requisitos físicos e mecânicos. ....	13
Tabela 4: Critérios de conformidade para classe de resistência .....	17
Tabela 5: Pesquisas relacionadas a incorporação de pó de vidro em compósitos cimentícios. .....	18
Tabela 6: Compilação de trabalhos com pó de vidro incorporado em compósitos cimentícios .....	20
Tabela 7: Traço em massa para moldar os quatro corpos de prova para uma idade. ....	25
Tabela 8: Proporção de material para ensaio da determinação da pasta de consistência normal.....	28
Tabela 9: Módulo de finura obtido dos cimentos .....	35
Tabela 10: Determinação da consistência normal da pasta. ....	36
Tabela 11: Resultados dos tempos de início e fim de pega. ....	36
Tabela 12: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cimentos aos 3 dias. 38	
Tabela 13: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cimentos aos 7 dias. 38	
Tabela 14: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos cimentos aos 28 dias. .....	38
Tabela 15: Resumo dos resultados obtidos nos ensaios. ....	40

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	<b>10</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1 CIMENTO</b> .....	<b>12</b>
2.1.1 TEMPO DE PEGA.....	14
2.1.2 MÓDULO DE FINURA .....	15
2.1.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	15
<b>2.2 RESÍDUOS DE VIDRO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3 INCORPORAÇÃO DO PÓ DE VIDRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS</b>	<b>18</b>
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 MATERIAIS UTILIZADOS</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA</b> .....	<b>25</b>
<b>3.3 ENSAIOS REALIZADOS</b> .....	<b>27</b>
3.3.1 MÓDULO DE FINURA DOS CIMENTOS.....	27
3.3.2 CONSISTÊNCIA NORMAL DA PASTA.....	28
3.3.3 TEMPOS DE PEGA .....	30
3.3.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS.....	33
<b>3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA</b> .....	<b>34</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>35</b>
<b>4.1. MÓDULO DE FINURA DOS CIMENTOS</b> .....	<b>35</b>
<b>4.2. CONSISTÊNCIA NORMAL DA PASTA</b> .....	<b>35</b>
<b>4.3. TEMPOS DE PEGA</b> .....	<b>36</b>
<b>4.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO dos cimentos</b> .....	<b>38</b>
<b>4.5. RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS</b> .....	<b>40</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>43</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>46</b>
<b>A.1 ANÁLISE AOS 3 DIAS</b> .....	<b>46</b>
<b>A.2 ANÁLISE AOS 7 DIAS</b> .....	<b>47</b>
<b>A.3 ANÁLISE AOS 28 DIAS</b> .....	<b>48</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O cimento é um dos principais materiais utilizados na construção civil, especialmente, para a produção de argamassa e concreto. Todavia, o clínquer que é a principal matéria prima do cimento é oriundo de fontes não renováveis e durante o processo de produção, há também um alto consumo de energia com elevado potencial poluidor.

No contexto da construção civil, o interesse por materiais alternativos é uma demanda prioritária no âmbito da sustentabilidade, visto a necessidade de mitigação do uso de recursos naturais, redução na emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e economia de energia elétrica e térmica, devido aos grandes impactos ambientais desencadeados pela cadeia produtiva do setor que consome massivamente compósitos à base de cimento. Dessa forma, a utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma alternativa viável e pode trazer benefícios às propriedades da matriz cimentícia, além de diminuir a dependência do clínquer na composição do cimento. Nesse sentido, é importante garantir que tais materiais atendam aos requisitos químicos, físicos e mecânicos para serem utilizados na construção civil.

A incorporação do pó de vidro oriundo da reciclagem de garrafas como adição mineral na composição do cimento pode mitigar tais efeitos negativos gerados pela sua produção ao meio ambiente, diminuir o consumo do cimento, melhorar as características do produto final em relação a sua durabilidade assim como auxiliar no reaproveitamento da reciclagem do vidro (JIANG *et al.*, 2019).

O presente trabalho buscou avaliar a viabilidade técnica da incorporação do pó de vidro como adição mineral na composição do cimento, respeitando os requisitos mínimos especificados na norma NBR 16697 (ABNT, 2018). Assim, diferentes composições de cimento foram avaliadas tanto o estado fresco (consistência normal e tempos de pega da pasta) como o estado endurecido (resistência à compressão). Dessa forma, foram comparados os cimentos com incorporação do pó de vidro ao traço de referência para avaliar os resultados obtidos em relação aos ensaios e comparar com a literatura.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista o aumento da produção e consumo em escala mundial de cimento e a busca contínua por matéria prima para atender as demandas impostas, a utilização de materiais reciclados ou materiais suplementares incorporados ao cimento vem ganhando cada vez mais espaço. Segundo Maury e Blumenschein (2012), a matéria prima do cimento é oriunda de fontes não renováveis e durante o processo de produção, há também um alto consumo de energia com forte emissão de gases do efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono. Nesse sentido, a adição de materiais como o pó de vidro visa mitigar a alta emissão de CO<sub>2</sub> durante a fabricação do cimento e contribuir com a reutilização do vidro reciclável.

A indústria do vidro também apresenta aumentos substanciais a cada ano de produção e suas principais matérias primas são areia de sílica, sódio e cálcio. Ademais, outros materiais também podem ser utilizados na composição do vidro como o magnésio, o potássio, a alumina e o vidro triturado reutilizado. A produção anual no Brasil é de 980 mil toneladas de embalagens de vidro e apenas 45% da matéria prima advém da reciclagem na forma de cacos (ABRABE, 2020; CEMPRE, 2020). A reciclagem do vidro, por sua vez, consome menos energia, reduz a extração de matéria prima contribuindo para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera e também diminui o depósito dos resíduos de vidro (ABRABE, 2020).

As novas tecnologias inovadoras ganham impulso quando alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Organizações das Nações Unidas (ONU), adotadas em 2015: indústria, inovação e infraestrutura, consumo e produção sustentável e ação contra a mudança global do clima. Assim, o pó de vidro desponta como um material alternativo que pode ser incorporado ao 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; LEE *et al.*, 2018; JIANG *et al.*, 2019). Em vista disso, sua adição em proporções adequadas ao cimento pode contribuir de maneira sustentável para a indústria da Construção Civil.

## 1.2 OBJETIVOS

A pesquisa tem como objetivo principal avaliar propriedades física e mecânica de cimentos com e sem a incorporação de pó de vidro, bem como as implicações nas propriedades do material em relação ao cimento sem a incorporação de pó de vidro.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Analisar os requisitos exigidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), para que o pó de vidro possa ser incorporado ao cimento Portland como adição mineral.
- Determinar as propriedades no estado fresco (tempo de pega) e endurecido (resistência mecânica) de misturas com diferentes teores de incorporação de pó de vidro (0%, 5%, 15% e 25%).
- Realizar a análise estatística dos resultados obtidos.
- Determinar o melhor teor de incorporação de pó de vidro dentre os traços analisados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CIMENTO

Em 2016, o Brasil foi o sexto maior produtor e o oitavo maior consumidor de cimento no mundo (ROADMAP, 2019). Já, no primeiro semestre de 2019 o consumo aparente de cimento no país foi de aproximadamente 27,2 milhões de toneladas, sendo a região Sudeste responsável por 44,5% do consumo total. O setor em 2020 terminou com um total aproximado de 61,05 milhões de toneladas de cimento vendidas (SNIC, 2020).

Apesar de ser uma atividade de grande 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% de todo o gás carbônico de origem antrópica (ROADMAP, 2019). Em 2017 o Brasil emitiu 22,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na produção de cimento cinza e branco (GCCA, 2019).

Os cimentos Portland, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2022), podem ser classificados por seus tipos que correspondem a adições e propriedades especiais. Portanto, a sua composição está diretamente relacionada com sua designação e deve atender aos limites estabelecidos pela Tabela 1.

**Tabela 1: Designação, sigla e classe do cimento Portland.**

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CPI	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	RS <sup>a</sup> ou BC <sup>b</sup>
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI <sup>d</sup>	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	—
	Não estrutural	CPB	—	

Notas:

<sup>a</sup>O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

<sup>b</sup>O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

<sup>c</sup>As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de

idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.  
<sup>d</sup>Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018).

Além do seu uso contínuo na construção civil como aglomerante hidráulico, é de suma importância que o cimento apresente requisitos mínimos para a sua utilização. Dessa forma, a NBR 16697 (ABNT, 2018) especifica tanto os requisitos químicos como também os requisitos físicos e mecânicos para o cimento Portland. Nas Tabelas 2 e 3 estão apresentados os requisitos químicos e requisitos físicos e mecânicos, respectivamente.

**Tabela 2: Requisitos químicos do cimento Portland (expresso em porcentagem de massa).**

Sigla <sup>a</sup>	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )
CP I	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I-S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	–	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	–	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	–	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 6,5	–	≤ 4,5
CP IV	–	≤ 6,5	–	≤ 4,5
CP V <sup>b</sup>	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Estrutural	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não estrutural	≤ 7	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

Notas:

<sup>a</sup>Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

<sup>b</sup>No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivados do cimento tipo CPV, não há limitação para RI e MgO.

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018).

**Tabela 3: Requisitos físicos e mecânicos.**

Sigla <sup>a</sup>	Classe	Finura	Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)	Resistência à compressão (MPa)				Índice de brancura
		Resíduo na peneira 75 µm (%)			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP I	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	—	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	—
CP I-S	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	—	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
CP II-E									
CP II-F	40	≤ 10,0	≥ 60	≤ 5	—	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP II-Z									
CP III CP IV	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	—	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	—
	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	—	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	—
	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	—	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	—

Sigla <sup>a</sup>	Classe	Finura	Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)	Resistência à compressão (MPa)				Índice de brancura
		Resíduo na peneira 75 µm (%)			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP V	ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	—	—
CPB Estrutural	25	≤ 12 <sup>b</sup>	≥ 60	≤ 5	—	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 78
	32	≤ 12 <sup>b</sup>	≥ 60	≤ 5	—	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 12 <sup>b</sup>	≥ 60	≤ 5	—	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CPB Não estrutural	—	≤ 12,0 <sup>b</sup>	≥ 60	≤ 5	—	≥ 5,0	≥ 7,0	≥ 10,0	≥ 82

Notas:

<sup>a</sup>Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

<sup>b</sup>Resíduo na peneira 45 µm.

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018).

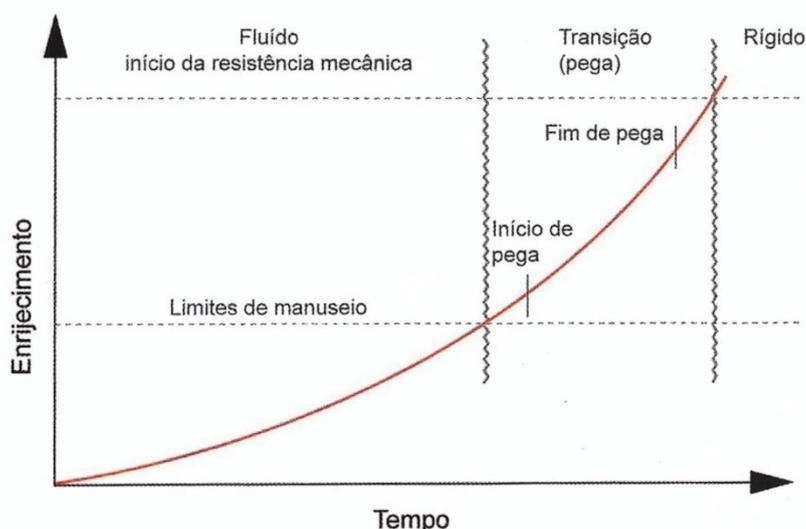
Neste trabalho foram estudadas algumas das propriedades físicas e mecânicas, que serão detalhadas a seguir.

### 2.1.1 TEMPO DE PEGA

O tempo de pega é o termo utilizado que se refere à solidificação da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Segundo Neville e Brooks (2013), a pega é causada principalmente pela hidratação do  $C_3A$  (aluminato tricálcico) e  $C_3S$  (silicato tricálcico) acompanhada pelo aumento da temperatura na pasta do cimento. O início da solidificação é chamado de início de pega e é caracterizado a partir do momento em que a pasta se torna não trabalhável. Já a expressão fim de pega se refere a solidificação completa da pasta do cimento. Para mensurar os tempos de início e fim de pega, utiliza-se o aparelho de Vicat, que mede a resistência de uma pasta de cimento de consistência padrão à penetração de uma agulha sob uma carga total de 300 g (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A importância de saber o tempo de início e fim de pega influencia diretamente na trabalhabilidade em situações de lançamento, compactação e acabamento do concreto. Na Figura 1 é possível perceber que o enrijecimento do concreto acontece com o tempo, sendo o material caracterizado, quando se inicia o processo de reação com a adição água, por ser uma substância fluída. Posteriormente, o tempo de início e fim de pega acontece dentro do período de transição e logo após o fim de pega, o concreto entra na fase rígida em que o mesmo há um maior ganho de resistência mecânica.

**Figura 1: Evolução da pega e do endurecimento no concreto.**



Fonte: Mehta e Monteiro (2014) *apud* Mindess e Young (1981).

### 2.1.2 MÓDULO DE FINURA

Segundo Neville e Brooks (2013), o módulo de finura do cimento atua diretamente na sua reatividade com a água começando na superfície das partículas do cimento. Quanto mais fino o cimento, sua reação ocorrerá de maneira mais rápida e, conseqüentemente, maior calor emitido durante a hidratação. Padronizou-se na indústria brasileira, para fins de controle de qualidade, a utilização de peneiras padrão como a de malha nº 200 ( $75\ \mu\text{m}$ ) e a de malha nº 325 ( $45\ \mu\text{m}$ ) para avaliar a finura do cimento a partir do material retido em pó nas mesmas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além da NBR 11579 (ABNT, 2013) que diz respeito sobre a determinação do índice de finura do cimento por meio da peneira  $75\ \mu\text{m}$ , podem ser utilizadas a NBR 16372 (ABNT, 2015) conhecida pelo método de Blaine em que é feita uma associação dos valores de finura em relação à área específica como também a NBR 12826 (ABNT, 2014) que estabelece um método para determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico.

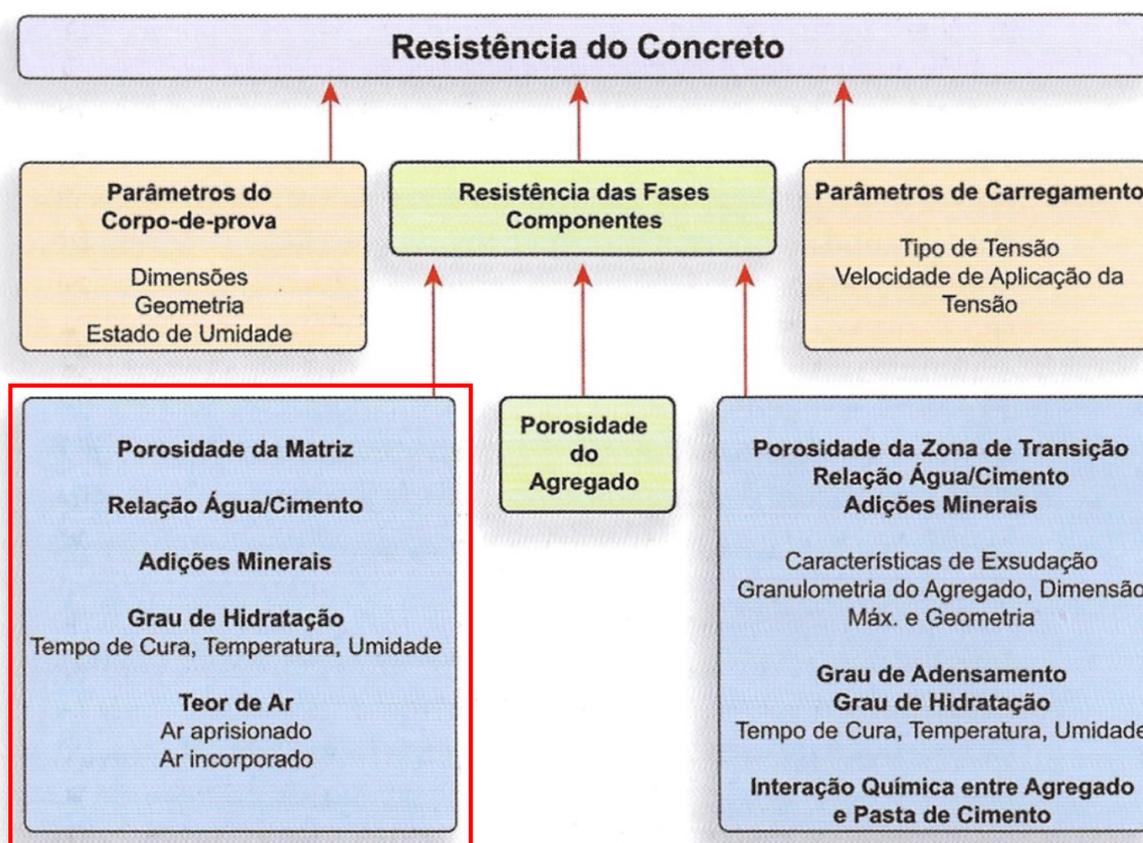
### 2.1.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A capacidade de um material para resistir à tensão sem que haja rompimento é chamada de resistência. A capacidade de resistência do concreto está diretamente associada a resistência do cimento utilizado. No concreto, a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura, sendo definida como a tensão máxima que a amostra de concreto pode suportar (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além da facilidade de se

ensaia a resistência do concreto em relação as outras propriedades, acredita-se que muitas das propriedades como módulo de elasticidade e resistência às intempéries podem ser correlacionadas a partir dos dados da resistência. A resistência à compressão axial do concreto é geralmente maior do que as outras variedades de resistência como a de tração.

Os principais fatores que atuam na resistência à compressão são a relação água/cimento e a porosidade. Além disso, outros fatores também atuam diretamente e muitas vezes são interdependentes como: características e proporções dos materiais, tipo de cimento, agregado, água de amassamento e aditivos e adições. Na Figura 2, em relação a matriz cimentícia, observa-se que as propriedades que atuam diretamente na resistência do concreto são: porosidade da matriz, relação água/cimento, adições minerais, grau de hidratação e teor de ar.

**Figura 2: Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto.**



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

O cimento pode ser classificado de acordo com a sua classe de resistência por meio da sua capacidade de resistência à compressão aos 28 dias. A NBR 16697 (ABNT, 2018) determina os limites inferiores e superiores para que um determinado cimento seja da classe de resistência 25, 32, 40 e ARI (alta resistência inicial) conforme demonstrado na Tabela 4.

**Tabela 4: Critérios de conformidade para classe de resistência**

Tipo de cimento	Classe de resistência	Resistência à compressão (MPa)		
		Limite inferior aos 7 dias	Limite inferior aos 28 dias	Limite superior aos 28 dias
CP I CP I-S CPII-E	25	—	25,0	42,0
CP II-F CP II-Z CP III	32	—	32,0	49,0
CP IV CPB Estrutural	40	—	40,0	—
CP V	ARI	34,0	—	—

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018).

## 2.2 RESÍDUOS DE VIDRO

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 exhibe uma transição vítrea. 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. 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). Em especial, o vidro soda-cal que é o tipo mais comum apresenta os seguintes componentes em sua estrutura: 70% SiO<sub>2</sub>, 12-17% Na<sub>2</sub>O e 5-10% de CaO (WILSON *et al.*, 2019; MEHTA; ASHISH, 2020).

Estima-se que em 2020 a indústria brasileira produziu em média 62 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.

Assim, existe uma expressiva geração de resíduos de vidro, e a correta destinação deste material, em especial as 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 resíduo coletado) entre os 1199 municípios que fazem parte do banco de dados (SNIS, 2021).

Ademais, 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. Todavia, o Brasil produz 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, e apenas 45% da matériaprima advém da reciclagem na forma de cacos (ABRABE, 2020; CEMPRE, 2020).

### 2.3 INCORPORAÇÃO DO PÓ DE VIDRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

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 (TAGNIT-HAMOU; SOLIMAN; OMRAN, 2016; WILSON *et al.*, 2019; MOSTOFINEJAD *et al.*, 2020; MEHTA; ASHISH, 2020). Na Tabela 5 estão apresentadas pesquisas relacionadas à utilização de pó de vidro em compósitos cimentícios.

**Tabela 5: Pesquisas relacionadas a incorporação de pó de vidro em compósitos cimentícios**

Referência	Objetivo
Soliman e Tagnit-Hamou(2016)	Desenvolver um concreto de ultra alto desempenho (CUAD) inovador de baixo custo e sustentável mediante a substituição do cimento e da areia de quartzo por pó de vidro.
Tagnit-Hamou; Soliman e Omran (2016)	Desenvolver um tipo de CUAD sustentável utilizando pó de vidro com granulometria diferente para a substituição de areia quartzosa, cimento, pó de quartzo, e sílica ativa.
Guignone (2017)	Avaliar o desempenho de concretos produzidos com resíduos da lapidação do vidro em substituição parcial do cimento.
Islam; Rahman e Kazi (2017)	Examinar o potencial dos resíduos de pó de vidro em substituição parcial ao cimento na produção de concretos e argamassas sustentáveis.
Mosaberpanah; Eren; Tarassoly (2018)	Aprimorar o desempenho do CUAD em termos de propriedades mecânicas, retração e reológico, tornando o material <i>eco-friendly</i> adicionando materiais pozolânicos e resíduos mediante redução o consumo de cimento.
Wilson <i>et al.</i> (2019)	Difundir as características da microestrutura do CUAD com pó de vidro, nas quais os constituintes podem ser parcialmente substituídos por pó de vidro sem afetar as propriedades em longo prazo.
Mostofinejad <i>et al.</i> (2020)	Avaliar a durabilidade de misturas de concreto contendo agregado miúdo e graúdo reciclado como substituição parcial (0% e 30%) de agregados (cascalho e areia) e pó de vidro como substituição parcial (0%, 20% e 30%) de cimento em misturas de concreto.
Matos <i>et al.</i> (2016)	Explorar a viabilidade do resíduo do pó de vidro em concreto autoadensável com a substituição de 50% do filer por pó de vidro avaliando as propriedades mecânicas e durabilidade do compósito cimentício.
Borges (2021)	Avaliar as propriedades física e mecânicas de argamassas com a incorporação de pó de vidro em substituição parcial do cimento Portland, buscando-se diferenciar os efeitos filer e pozolânico do material.

Referência	Objetivo
Soares (2021)	Avaliar a durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro em substituição ao cimento frente à ação de cloretos.

Fonte: Autor (2022).

O pó de vidro quando incorporado à matriz cimentícia apresenta duas ações características: atua no preenchimento dos vazios, ou seja, apresenta efeito fíler (VAITKEVIČIUS; ŠERELIS; HILBIG, 2014), e também exibe potencial de aplicação como material pozolânico desde que apresente granulometria adequada (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016; LEE *et al.*, 2018; JIANG *et al.*, 2019; BORGES, 2021). Quanto menor a granulometria do material, maior a reatividade.

Todavia, a utilização do vidro moído apresenta alta incidência da quantidade de álcalis, usualmente encontrada no material (12 a 17% de Na<sub>2</sub>O), que pode propiciar o surgimento da Reação Álcali-Agregado (RAA) em matrizes cimentícias. Tal desempenho observado do pó de vidro depende principalmente do tamanho das partículas (MEHTA; ASHISH, 2020).

Quanto às propriedades no estado fresco, Soliman; Tagnit-Hamou (2016), Islam; Rahman; Kazi (2017) e Mosaberpanah; Eren; Tarassoly (2019) constataram que quanto maior o teor de adição do pó de vidro em substituição parcial do cimento, há um ligeiro aumento na trabalhabilidade do concreto. Segundo os autores, essa melhora ocorreu devido às partículas de pó de vidro, que apresentam superfície lisa, ocasionando menor atrito entre as partículas, bem como a baixa absorção de água por parte das partículas de pó de vidro, propiciando maior disponibilidade de água para fluidificação da matriz cimentícia.

Em relação às propriedades mecânicas, 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 idades maiores ocorreu aumento significativo da resistência, pois os materiais pozolânicos, como o vidro e a sílica, possuem uma reação mais lenta e, conseqüentemente, menor velocidade de hidratação a depender da composição do concreto empregado.

No estudo de Jiang *et al.* (2019), foi feita uma revisão crítica do uso de resíduos em pó de vidro e sua utilização em materiais à base de cimento. Observou-se que nas pesquisas analisadas os teores de substituição de pó de vidro ao cimento variaram de 0 a 50% e o teor ótimo considerado foi de 20%. Nesta pesquisa serão analisados os cimentos com a incorporação do pó de vidro de 0% (referência), 5%, 15% e 25% para avaliar os impactos que cada teor proporciona nas suas propriedades.

A Tabela 6 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 resultados obtidos.

**Tabela 6: Compilação de trabalhos com pó de vidro incorporado em compósitos cimentícios**

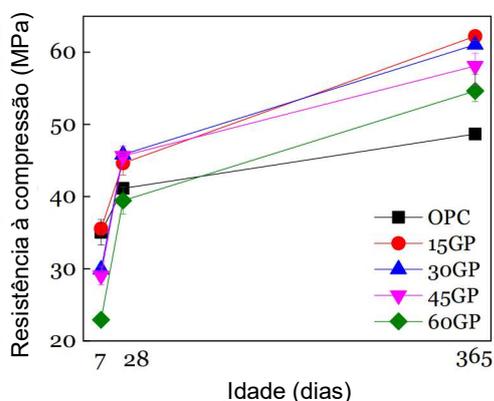
Referência	Substituição do cimento em massa	fc <sub>28</sub> respectivos aos teores de pó de vidro (MPa)	Consumo inicial de cimento* (kg/m <sup>3</sup> )	Relação a/agl	Pó de vidro em d50 (µm)	Composição química do vidro
Barros (2016)	0%, 10%, 15% e 20%	67, 65, 63 e 51	512	0,36	60	70,5% SiO <sub>2</sub> 13,5% CaO 12,4% Na <sub>2</sub> O
Islam; Rahman e Kazi (2016)	0%, 10%, 15%, 20% e 25%	43; 41; 38; 36; 35	300	0,49	-	68,1% SiO <sub>2</sub> 14,5% CaO 12,2% 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	73,0% SiO <sub>2</sub> 11,3% CaO 13,0% Na <sub>2</sub> O
Guignone (2017)	0%, 10% e 20%	37; 38; 37	302	0,60	10,3	64,8% SiO <sub>2</sub> 6,9% CaO 19,4% Na <sub>2</sub> O
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
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
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
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
Soares (2021)	0%; 10%; 20%; 30%/ 50%	115,6; 119,4; 113,6; 110,7; 88,4	1000	0,18	-	74% SiO <sub>2</sub> 9,1% CaO 11% Na <sub>2</sub> O

Nota: \* Consumo de cimento para o traço de referência (sem pó de vidro).

Fonte: Autor (2022).

Além disso, a incorporação de pó de vidro pode propiciar o aumento da resistência à compressão em idades avançadas conforme apresentado pelo trabalho de Du e Tan (2017) em que houve substituição ao cimento por pó de vidro nos teores de 15%, 30%, 45% e 60% apresentado na Figura 3. **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

**Figura 3: Resistência à compressão de concretos com diferentes proporções de pó de vidro em substituição ao cimento (OPC-0%, 15GP-15%, 30GP-30%, 45GP-45% e 60GP-60%)**



Fonte: Modificado de Du; Tan (2017).

Além disso, segundo Omran *et al.* (2018), a incorporação do pó de vidro além de reduzir emissões de CO<sub>2</sub> do concreto associado à produção do cimento, aumenta as suas características de durabilidade como absorção de água, resistência a penetração de cloretos, ciclos de descongelamento de gelo e diminuição da porosidade, assim como mitigar custos no processamento do descarte do vidro e também reduzir o preço do concreto.

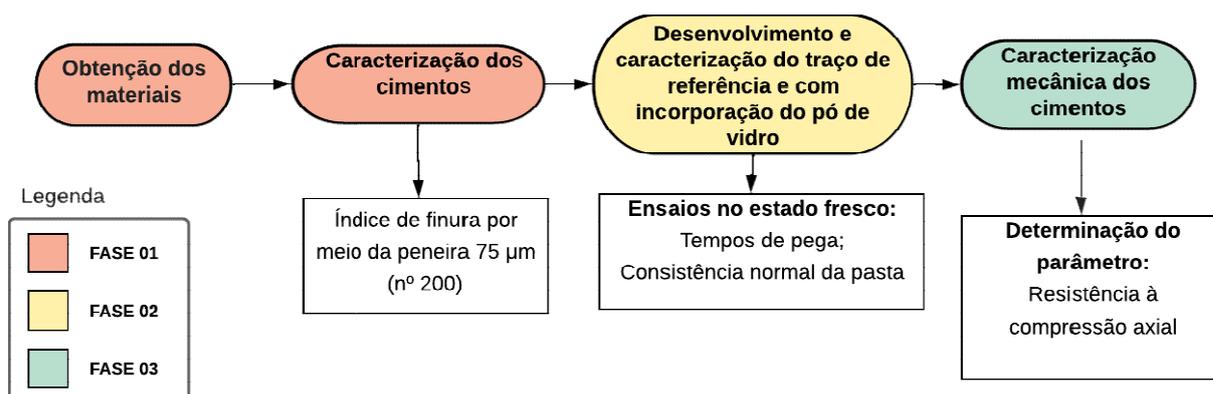
Portanto, a incorporação do pó de vidro a composição do cimento pode trazer benefícios à matriz cimentícia e diminuir a quantidade de clínquer, principal matéria prima utilizada na produção do cimento.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tendo em vista a necessidade de definir as dosagens da incorporação de pó de vidro na composição do cimento Portland, elaborou-se o programa experimental visando avaliar o seu comportamento mecânico, tempo de pega e consistência.

Para atingir os objetivos mencionados, a NBR 16697 (ABNT, 2018) foi utilizada a fim de determinar os requisitos mínimos tendo em vista a viabilidade técnica da incorporação do pó de vidro ao cimento. O fluxograma com etapas gerais do programa experimental está apresentado na Figura 4, seguindo a ordem cronológica.

**Figura 4: Etapas gerais do programa experimental**



Fonte: Autor (2022).

Em relação aos traços que foram desenvolvidos, as seguintes proporções foram adotadas:

- a) Traço 1: REF → cimento + areia normal + água;
- b) Traço 2: CP95VD5 → cimento (95%) + pó de vidro (5%) + areia normal + água;
- c) Traço 3: CP85VD15 → cimento (85%) + pó de vidro (15%) + areia normal + água;
- d) Traço 4: CP75VD25 → cimento (75%) + pó de vidro (25%) + areia normal + água.

Para a determinação de resistência à compressão, segundo a NBR 7215 (ABNT, 2019), foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de dimensão 50x100 mm para serem ensaiados nas idades de 3, 7, 28 para cada traço. O ensaio na idade de 1 dia não pôde realizado, pois, no dia, o laboratório estava em manutenção.

Resumidamente, foram desenvolvidos os seguintes ensaios:

- ABNT NBR 11579 (2013) – Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200);
- ABNT NBR 16607 (2018) – Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega;
- ABNT NBR 16606 (2018) – Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal;
- ABNT NBR 7215 (2019) – Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A obtenção e a caracterização dos materiais corresponderam à primeira etapa do programa experimental. Os materiais utilizados nos ensaios foram:

- Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI);
- Água do sistema de abastecimento da cidade de São Carlos/SP;
- Areia normal nº 16, 30, 50 e 100 (do IPT);
- Pó de vidro proveniente de garrafas de cor âmbar, com tamanho de partículas passantes na peneira de malha #200.

Na Figura 5 são apresentados os aglomerantes e agregados utilizados nos ensaios.

**Figura 5: Materiais utilizados nos ensaios**

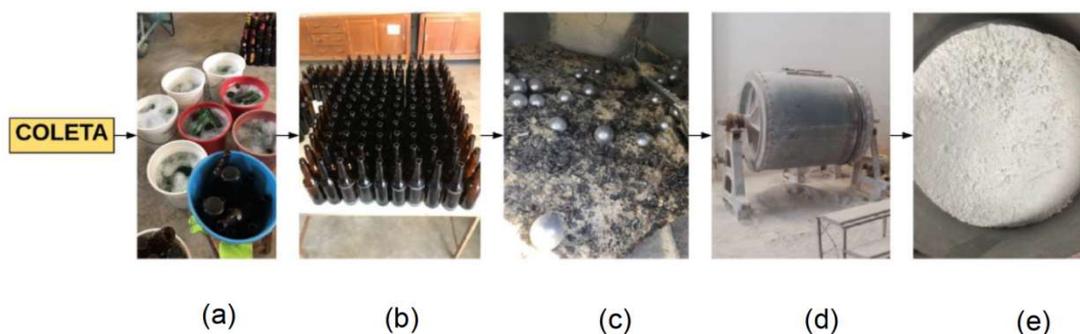


Fonte: Autor (2022).

Optou-se por utilizar o cimento CP V-ARI, isto é, cimento com alta resistência inicial, que possui em sua composição até 10% de material carbonático. Já para o pó de vidro

utilizado como adição mineral, utilizou-se o material obtido pelo grupo de pesquisa do Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana (GESEC/UFSCar), por meio do beneficiamento do vidro oriundo de garrafas na cor âmbar. O procedimento realizado que inclui a limpeza e lavagem, secagem e quebra das garrafas em cacos, moagem e obtenção do produto final pode ser observado na Figura 6.

**Figura 6: a) Limpeza dos rótulos e lavagem das garrafas; b) Secagem ao ar das garrafas; c) Quebra das garrafas em cacos em uma betoneira com bolas de aço; d) Moagem final em moinho de bolas; e) Produto final obtido da moagem.**



Fonte: Freitas (2019).

Para utilização do vidro moído que estava armazenado, foi necessário realizar o peneiramento mecânico do material, conforme demonstrado na Figura 7. Dessa maneira, somente o material passante na peneira de malha #200 foi utilizado nos ensaios.

**Figura 7: (a) Peneiramento mecânico do pó de vidro utilizando peneiras de malha #200; (b) Vidro moído passante pela peneira.**



Fonte: Autor (2022).

### 3.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A fase de moldagem dos corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão foi realizada de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019), seguindo as proporções dos traços previstos conforme a Tabela 7.

**Tabela 7: Traço em massa para moldar os quatro corpos de prova para uma idade.**

Descrição	Cimento (g)	Vidro (g)	Agregado miúdo (g)				Água (g)
			Fração grossa	Fração média grossa	Fração média fina	Fração fina	
<b>REF</b>	624,00	-	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00
<b>CP95VD5</b>	592,80	31,20	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00
<b>CP85VD15</b>	530,40	93,60	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00
<b>CP75VD25</b>	468,00	156,00	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00

Fonte: Autor (2022).

Para realizar as moldagens, utilizou-se a argamassadeira planetária da Solotest, com cuba em inox e capacidade para 5 litros, conforme Figura 8.

**Figura 8: Argamassadeira utilizada no procedimento de mistura dos materiais com capacidade total de 5 litros.**



Fonte: Autor (2022).

Para cada betonada anotou-se a umidade, temperatura, data e horário realizado. Ademais, para cada betonada foi feita a mistura em volume suficiente para 8 corpos de provas, 4 para cada idade. Os corpos de prova foram moldados nas dimensões 50x100mm e permaneceram por 24h em câmara seca, conforme Figura 9.

**Figura 9: Corpos de prova na câmara seca no período inicial de cura.**



Fonte: Autor (2022).

Posteriormente, após o término do período inicial de cura, as amostras foram colocadas no tanque de cura (apresentado na Figura 10a) e permaneceram imersos em água com cal (Figura 10b) até a idade de ensaio.

**Figura 10: (a) Tanque de cura; (b) Corpos de prova imersos em água com cal.**



Fonte: Autor (2022).

Ademais, os corpos de prova foram retificados, garantindo que o topo e a base estivessem planos e sem irregularidades para realização do ensaio de resistência à compressão.

Os ensaios realizados são descritos a seguir.

### 3.3 ENSAIOS REALIZADOS

#### 3.3.1 MÓDULO DE FINURA DOS CIMENTOS

O ensaio do módulo de finura foi feito de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2013). Determinou-se a massa inicial de cimento e o peneiramento foi feito a seco com o auxílio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200) em 3 etapas. Na etapa inicial, primeiramente foi adicionado o material na tela da peneira e preparou-se o conjunto composto pela tampa, peneira e fundo para o início do peneiramento, conforme mostrado na Figura 11.

**Figura 11: Etapa inicial - Conjunto utilizado no ensaio de módulo de finura do cimento**

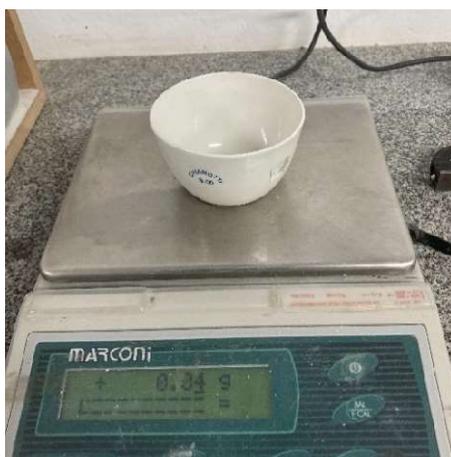


Fonte: Autor (2022).

Seguiu-se com o peneiramento da etapa intermediária por 20 minutos.

Na etapa final, peneirou-se por 1 minuto em uma velocidade de peneiramento mais rápida e foi pesado o material passante na peneira. Tal processo se repetiu por mais três vezes tendo em vista a limitação que a massa do material passante deve ser igual ou inferior a 0,05 g. Dessa maneira, utilizou-se o cimento retido na tela da peneira para pesagem (Figura 12) e determinação do resíduo de cimento.

**Figura 12: Etapa final - Pesagem do resíduo de cimento retido na peneira #200.**



Fonte: Autor (2022).

### 3.3.2 CONSISTÊNCIA NORMAL DA PASTA

O ensaio de determinação da pasta de consistência normal seguiu as diretrizes da NBR 16606 (ABNT, 2018). Para a preparação, pesou-se a massa de cimento para cada traço, conforme a Tabela 8, totalizando a massa de 500 g.

**Tabela 8: Proporção de material para ensaio da determinação da pasta de consistência normal.**

TRAÇO	Cimento (g)	Vidro(g)
REF	500,00	-
CP95VD5	475,00	25,00
CP85PV15	425,00	75,00
CP75PV25	375,00	125,00

Fonte: Autor (2022).

Posteriormente, adotou-se a relação água/cimento (a/c) de 0,30, equivalente a 150 g, e ajustou-se a massa da água com exatidão de 0,5g até atingir os requisitos para atingir a consistência normal. Na Figura 13 são apresentados os materiais necessários para o ensaio da consistência normal da pasta: água e cimento.

**Figura 13: Materiais necessários para o ensaio da consistência normal da pasta: cimento e água.**



Fonte: Autor (2022).

Para o procedimento da mistura, as seguintes etapas foram realizadas:

- Com o misturador parado, em posição de iniciar o ensaio, verteu-se a água na cuba, adicionando o cimento e deixando repousar por 30 s;
- Misturou-se durante 30 s em velocidade baixa;
- O misturador foi desligado por 60 s. Nos primeiros 30 s, foi feita a operação de raspagem das paredes internas da cuba com a espátula de borracha, fazendo com que toda pasta a elas aderida fosse retirada.
- Na sequência, misturou-se durante 60 s na velocidade alta.

Após a preparação da mistura, colocou-se o molde com sua base maior apoiada sobre a placa-base e, utilizando a espátula metálica, encheu-o rapidamente com a pasta preparada. Além disso, foi retirado o excesso de pasta e rasa o molde com a régua metálica.

Em seguida, o conjunto foi colocado sob o aparelho de Vicat onde o molde estava centrado sob a haste representado pela Figura 14. Primeiramente, a haste desceu até o extremo da sonda entrando em contato com a superfície da pasta e foi fixada nesta posição por meio do parafuso. Após 45 s do término da mistura, solta-se a haste. A pasta é considerada como tendo consistência normal quando a sonda se situar a uma distância de  $(6 \pm 1)$ mm da placa-base após 30 s do instante em que foi solta. Algumas pastas não atenderam a esse requisito e tiveram que ser preparadas novas pastas com variações na quantidade de água até atender ao resultado esperado.

Na Figura 14 pode ser observado o conjunto do molde no aparelho de Vicat.

**Figura 14: Ensaio de consistência normal da pasta com o auxílio do aparelho de Vicat.**



Fonte: Autor (2022).

### **3.3.3 TEMPOS DE PEGA**

O ensaio de determinação dos tempos de pega seguiu as diretrizes da NBR 16607 (ABNT, 2018). Para preparação da pasta, os mesmos parâmetros da NBR 16606 (ABNT, 2018) foram utilizados e a relação água/cimento adotada é oriunda do ensaio da consistência normal da pasta. Na Figura 15 é apresentado um exemplo de molde preenchido com a pasta sobre a placa base.

**Figura 15: Molde e placa base para o ensaio dos tempos de pega.**



Fonte: Autor (2022).

A fim de atender as demandas de armazenamento dos moldes, optou-se por um recipiente que simulou a câmara úmida onde as amostras ficaram suspensas sobre a água por meio de um pequeno apoio sobre a grade metálica, fechando o recipiente com o auxílio da tampa da caixa enquanto as amostras eram armazenadas entre as medições, conforme mostrado pela Figura 16. Ainda assim, os valores de umidade e temperatura ficaram um

pouco abaixo do valor mínimo estipulado pela norma de 90% e  $(23 \pm 2)$  °C, respectivamente.

**Figura 16: (a) Recipiente para armazenamento das amostras utilizadas durante o ensaio de tempo de pega; (b) Estrutura metálica contendo as amostras.**



Fonte: Autor (2022).

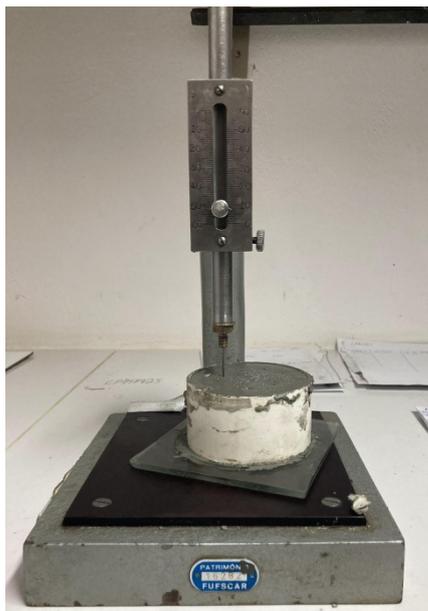
Para a determinação do tempo de início de pega, foi seguido o seguinte procedimento:

- Descer a agulha da haste móvel até que ela toque placa-base, fora do molde. Ajustar o indicador na marca zero da escala.
- Depois de um tempo mínimo de 30 min após o enchimento do molde, o molde foi colocado com a placa-base no aparelho de Vicat, situando-o sob a agulha. A agulha foi solta suavemente até que houvesse contato desta com a pasta. Aguardou 1 s a 2 s nesta posição, evitando qualquer ação sobre as partes móveis. Em seguida, as partes móveis foram soltas, permitindo que a agulha penetrasse verticalmente na pasta, sem choque e sem velocidade inicial. A leitura da indicação na escala foi feita 30 s após o instante em que a agulha foi solta;
- Anotou-se a leitura na escala e o tempo contado a partir do instante em que a água e o cimento entraram em contato (instante zero). O ensaio de penetração no mesmo corpo de prova foi repetido, em posições convenientemente separadas, que distassem em, no mínimo, 10 mm da borda do molde e entre elas, em intervalos de tempo convenientemente espaçados, de 10 min. Entre os ensaios de penetração, o molde contendo a pasta foi mantido na câmara úmida e a agulha de Vicat foi limpa imediatamente após cada penetração;

- Em seguida, os resultados foram anotados (de todas as penetrações) e respectivos tempos e, por interpolação, determinou-se o tempo em que a distância entre a agulha e a placa-base fosse de  $(6 \pm 2)$  mm.

Na Figura 17 segue um exemplo da coleta da medida da penetração da agulha de início de pega.

**Figura 17: Penetração da agulha no tempo de início de pega com o aparelho de Vicat.**



Fonte: Autor (2022).

Para a determinação do tempo de fim de pega, substituiu-se a agulha de Vicat (utilizada na determinação do tempo de início de pega), cujo acessório anular facilita a observação exata de penetrações pequenas. Todavia, como não havia tal acessório anular, utilizou-se somente a agulha.

Dando continuidade ao ensaio, para determinar o tempo de fim de pega foi seguido o seguinte procedimento:

- O molde com a amostra foi invertido sobre sua placa-base, de forma que os ensaios para a determinação do fim de pega fossem realizados na face oposta do corpo de prova, que estava originalmente em contato com a placa-base. Para a realização das medidas, foi utilizado o mesmo procedimento para o tempo de início de pega. Os intervalos de tempo entre ensaios de penetração foram ampliados para 20 minutos.
- Registrou-se, com aproximação de 15 min, o tempo transcorrido a partir do instante zero, até que a agulha penetrasse pela primeira vez apenas 0,5 mm na pasta, como tempo de fim de pega do cimento. A precisão do ensaio pode ser maior, reduzindo o intervalo de tempo entre penetrações próximas ao final da determinação e observando se os resultados de ensaios sucessivos não variam excessivamente.

Na Figura 18 é apresentada a penetração da agulha na pasta para determinação do tempo de fim de pega.

**Figura 18: Penetração da agulha no tempo de fim de pega com o aparelho de Vicat.**



Fonte: Autor (2022).

### **3.3.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS**

O ensaio de resistência à compressão seguiu a recomendação da NBR 7215 (ABNT, 2019). Os corpos de prova foram rompidos com o auxílio da Máquina Universal de Ensaio EMIC, com capacidade de carga de 600 kN, no Laboratório de Sistemas Estruturais – UFSCar, conforme Figura 19.

**Figura 19: Execução do ensaio de resistência à compressão axial**



Fonte: Autor (2022).

### 3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos dos ensaios foram analisados, utilizando-se a Análise de Variância (ANOVA) de fator único, metodologia utilizada para comparar três ou mais tratamentos. Os dados que apresentaram diferença significativa foram submetidos ao teste de Tukey, em que é feita a comparação das médias.

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

As hipóteses são as seguintes:

$H_0$  – Não há diferença estatisticamente significativa;

$H_1$  – Há pelo menos um valor estatisticamente diferente.

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

Se valor-p  $\geq \alpha$ , aceita-se  $H_0$ ;

Se valor-p  $< \alpha$ , rejeita-se  $H_0$ .

Para os casos onde  $H_0$  foi rejeitado, realizou-se o teste de Tukey no software *Past*®. Os resultados completos das análises estatísticas estão dispostos no Apêndice A.

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1. MÓDULO DE FINURA DOS CIMENTOS

Na Tabela 9 é apresentado o valor do módulo de finura obtido no ensaio e o respectivo limite exigido do cimento CP V - ARI pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

**Tabela 9: Módulo de finura dos cimentos**

CIMENTOS	Módulo de Finura	
	Resíduo retido na peneira 75 $\mu$ m (%)	NBR 16697*
REF (CP V)	0,96	$\leq 6\%$
CP95PV5	1,30	
CP85PV15	1,28	
CP75PV25	1,88	

Nota:

\* Requisito físico definido pela Tabela 4 apresentado na NBR 16697 (ABNT, 2018).

Fonte: Autor (2022).

A incorporação de pó de vidro nas proporções de 5%, 15% e 25% ao cimento aumentou a quantidade de resíduo retido na peneira de 75 $\mu$ m (n° 200) em relação ao traço de referência (somente o cimento Portland), porém, ainda ficou dentro dos limites estabelecidos.

A finura do cimento afeta a sua reatividade com a água e, conseqüentemente, quanto mais fino o cimento, mais rápida será sua reação e aumento da resistência mecânica por meio do processo de hidratação. Ademais, partículas maiores podem nunca hidratar-se completamente, impactando na menor resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

## 4.2. CONSISTÊNCIA NORMAL DA PASTA

Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros de umidade e temperatura do ambiente durante a moldagem, bem como a relação a/c e quantidade de água obtida no ensaio da determinação da pasta de consistência normal.

**Tabela 10: Determinação da consistência normal das pastas**

PASTAS	MOLDAGEM		NBR 16606	
	U (%)	T (°C)	a/c	A (%)
REF	58%	19,0	0,305	30,5%
CP95PV5	57%	19,0	0,305	30,5%
CP85PV15	58%	19,5	0,305	30,5%
CP75PV25	58%	19,1	0,308	30,8%

Fonte: Autor (2022).

Nas pastas de REF, CP95PV5 e CP85PV15 não houve diferenças significativas entre si em relação à quantidade de água. Somente na pasta CP75PV25 houve um aumento de 0,3% na quantidade de água necessária para obtenção da mesma consistência.

#### 4.3. TEMPOS DE PEGA

Na Tabela 11 são apresentados os parâmetros de umidade e temperatura da câmara úmida, assim como os resultados dos tempos de início e fim de pega e a diferença entre eles.

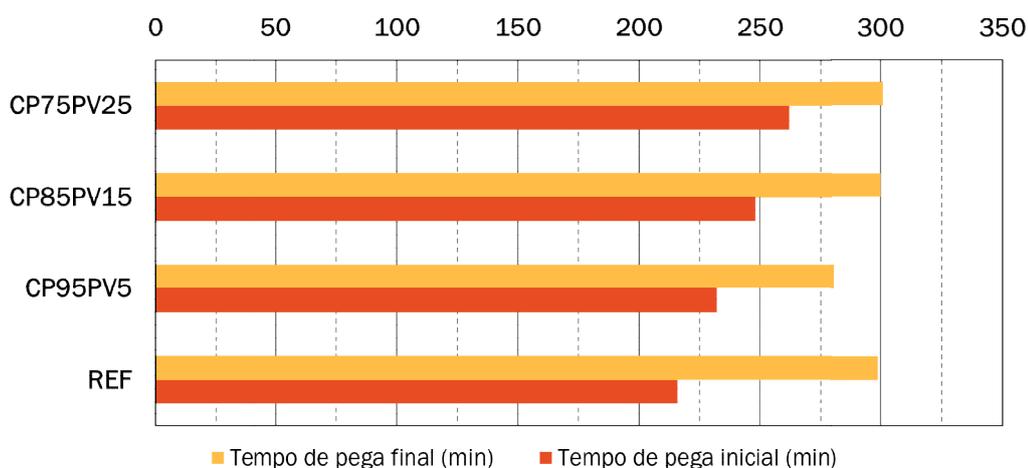
**Tabela 11: Resultados dos tempos de início e fim de pega**

PASTAS	CÂMARA ÚMIDA		NBR 16607		Intervalo entre o tempo de início de pega e fim de pega (min)
	U (%)	T (°C)	Tempo de pega inicial (min)	Tempo de pega final (min)	
REF	83%	19,6	216	299	83
CP95PV5			232	281	49
CP85PV15			248	300	52
CP75PV25			262	301	39

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Para melhor visualização, na Figura 20 é apresentado um gráfico com os tempos de início e fim de pega para os cimentos estudados.

**Figura 20: Tempos de pega inicial e final dos cimentos estudados**



Fonte: Autor (2022).

Observou-se que o tempo de pega inicial aumentou nos cimentos conforme o aumento do teor de pó de vidro incorporado. O cimento CP75PV25 apresentou um ganho de 17,55% (46 minutos) no tempo de pega inicial em relação ao traço de referência. O aumento do tempo de pega inicial observado nos cimentos com incorporação de pó de vidro está relacionado à sua hidratação mais lenta.

Analisando o tempo de pega final entre os cimentos, os traços obtiveram o tempo de fim de pega de, aproximadamente, 300 minutos, exceto para o teor de 5% de pó de vidro, em que o tempo foi de 281 minutos. Tal diferença entre os traços pode estar associada ao maior intervalo das medições quando comparado às medições do tempo de pega inicial.

Além disso, o intervalo entre o tempo de início e fim de pega diminuiu em relação ao traço de referência com a maior incorporação do pó de vidro, apresentando uma fase de transição mais rápida. Observou-se que os cimentos com teor de 5% e 15% de vidro moído obtiveram 49 minutos e 52 minutos, respectivamente. Já o cimento com teor de 25% de vidro moído apresentou um intervalo de 39 minutos.

No trabalho realizado por Soares (2021), o tempo de pega nas pastas de cimento de referência e com incorporação de 50% de pó de vidro passante na peneira de malha 200, apresentou comportamento similar ao observado, apresentando um aumento do tempo de pega inicial e diminuição do intervalo entre o tempo de pega inicial e final com a incorporação do pó de vidro.

No estudo de Sharifi, Afshoon e Firoozjaie (2015), em que houve a incorporação do pó de vidro como material cimentício em concreto autoadensável, observou-se que o aumento nos tempos de início e fim de pega pode estar associado ao aumento da água livre nos poros e baixa absorção de água pelo pó de vidro, assim como a superfície mais lisa do pó de vidro em relação ao cimento.

#### 4.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS

Nesta seção serão apresentados os dados obtidos no ensaio de resistência à compressão dos cimentos. A análise estatística para os dados da resistência à compressão em todas as idades avaliadas está apresentada no Apêndice A. Nas Tabelas 12 a 14 são apresentadas as resistências à compressão dos cimentos nas idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

**Tabela 12: Resultados de resistência à compressão dos cimentos aos 3 dias**

Traços	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	35,99	1,29	3,60	
CP95PV5	33,96	1,30	3,83	NÃO
CP85PV15	29,40	1,01	3,44	SIM
CP75PV25	27,48	1,19	4,32	SIM

Fonte: Autor (2022).

**Tabela 13: Resultados de resistência à compressão dos cimentos aos 7 dias**

Traços	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	42,11	1,90	4,50	
CP95PV5	40,39	1,25	3,08	NÃO
CP85PV15	36,04	1,21	3,35	SIM
CP75PV25	32,13	0,63	1,96	SIM

Fonte: Autor (2022).

**Tabela 14: Resultados de resistência à compressão dos cimentos aos 28 dias**

Traços	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Diferença significativa em relação ao REF
REF	54,12	1,55	2,86	
CP95PV5	49,34	1,93	3,91	NÃO
CP85PV15	43,59	2,45	5,62	SIM
CP75PV25	39,66	3,62	9,12	SIM

Fonte: Autor (2022).

Para as idades de 3, 7 e 28 dias, os traços CP85PV15 e CP75PV25, em que tiveram maior incorporação de vidro em substituição ao cimento, apresentaram diferença estatística em relação à referência, ou seja, a incorporação do pó de vidro nos teores de 15% e 25% impactou diretamente na diminuição da resistência à compressão e apresenta uma diferença substancial em relação ao cimento de referência. Já para o cimento com teor de 5% de pó de vidro, não houve diferença significativa, isto é, o seu resultado foi equivalente ao cimento de referência e não há diferença na escolha de ambos os cimentos do ponto de

vista estatístico. Assim, com o aumento da incorporação do pó de vidro nos cimentos observou-se a diminuição da resistência mecânica nas idades estudadas, fato que pode ser explicado pela ocorrência da atividade pozolânica do pó de vidro em idades mais avançadas.

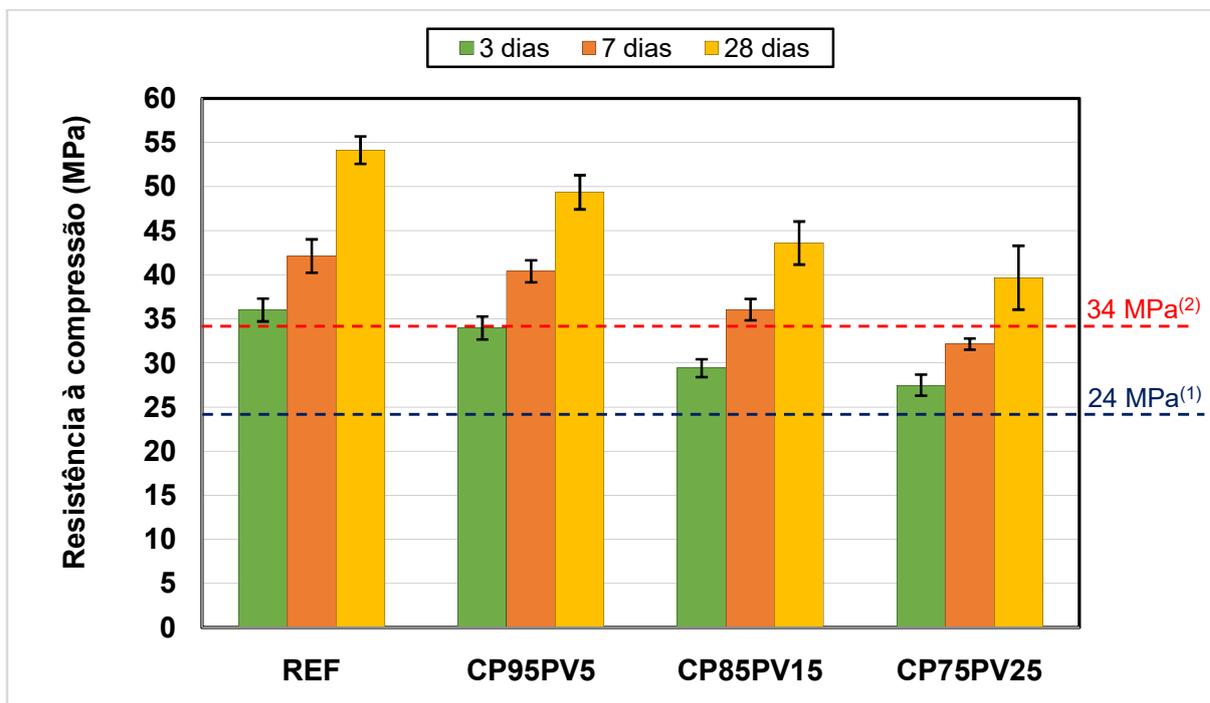
Para o cimento com a incorporação de 25% de pó de vidro, em comparação com cimento com teor de 15%, observou-se que não houve diferença significativa nas idades de 3 e 28 dias, conforme a Tabelas A.4 e A.12 do Apêndice A, respectivamente. Nesse sentido, comparando os cimentos somente nas idades de 3 e 28 dias, sugere-se que a utilização de ambos os cimentos não apresenta divergência em relação às suas características.

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento CP V deve apresentar valores de resistência à compressão nas idades de 3 e 7 dias de 24 e 34 MPa, respectivamente. Tal requisito foi atendido para os traços estudados, exceto para o CP75PV25, na idade de 7 dias, que ficou 5,5% abaixo do limite estabelecido.

Para a idade de 28 dias, observou-se que a resistência para o traço de maior incorporação de vidro (CP75PV25) reduziu em 26,72% em relação à referência, obtendo o valor de 39,66 MPa. A diminuição da resistência à compressão da pasta de cimento com pó de vidro pode ser explicada pelo efeito de diluição. Segundo Du *et al.* (2021) e Aliabdo *et al.* (2016), o efeito de diluição do pó de vidro reduz o teor de cimento e aumenta a relação água/cimento efetiva, que melhora a sua trabalhabilidade e, conseqüentemente, reduz resistência à compressão da pasta de cimento.

Na Figura 21 é apresentada a comparação dos resultados de compressão axial para as argamassas com e sem a incorporação do pó de vidro em todas as idades analisadas.

**Figura 21: Comparação dos valores dos resultados à compressão axial dos compósitos cimentícios**



Notas:

<sup>(1)</sup> Requisito mínimo à compressão axial para a idade de 3 dias da NBR 16697 (ABNT, 2018).

<sup>(2)</sup> Requisito mínimo à compressão axial para a idade de 7 dias da NBR 16697 (ABNT, 2018).

Fonte: Autor (2022)

#### 4.5. RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS

Na Tabela 15 são apresentados os resultados dos ensaios realizados e os requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

**Tabela 15: Resumo dos resultados obtidos nos ensaios**

Sigla	Finura Resíduo na peneira 75 µm (%)	Tempo de início de pega (min)	Tempo de fim de pega (min)	Resistência à compressão (MPa)		
				3 dias	7 dias	28 dias
CP V <sup>a</sup>	≤ 6,0	≥ 60	≤ 600,0	≥ 24,0	≥ 34,0	—
RESULTADOS						
REF	0,96	216	299	35,99	41,11	54,12
CP95PV5	1,30	232	281	33,96	40,39	49,34
CP85PV15	1,28	248	300	29,40	36,04	43,59
CP75PV25	1,88	262	301	27,48	32,13*	39,66

Notas:

<sup>a</sup> Requisitos mínimos de cada propriedade para o CP V conforme NBR 16697 (ABNT, 2018).

\* Limite inferior a resistência à compressão aos 7 dias de idade.

Fonte: Autor (2022)

## 5. CONCLUSÕES

A incorporação do pó de vidro nos teores de 0%, 5%, 15% e 25% na composição do cimento apresenta mudanças significativas nas suas propriedades física e mecânica. Dessa maneira, é importante que os cimentos estudados atendam aos requisitos estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), garantindo o seu desempenho mínimo.

Em relação ao módulo de finura, observou-se um aumento na quantidade de resíduo retido na peneira  $75\mu\text{m}$  nos cimentos com maior incorporação de vidro moído, chegando a valor de 1,88% para o CP75PV25. Ainda que o valor atenda ao requisito estabelecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018), o aumento do módulo de finura pode proporcionar uma melhor trabalhabilidade ao concreto fresco (com o aumento do tempo de pega inicial) e menor velocidade de hidratação, resultado em menor resistência mecânica inicial.

Em relação à consistência normal da pasta, observou-se que os cimentos de referência, 5% e 15% de incorporação de pó de vidro não apresentaram diferenças em relação ao fator água/cimento. Já o traço o CP75PV25 exibiu um pequeno aumento de 0,3% na quantidade de água necessária para obtenção da mesma consistência.

Em relação aos tempos de pega, o incremento da incorporação do pó de vidro nos cimentos impactou com o aumento do tempo de pega inicial e diminuição do intervalo entre o tempo de pega final e inicial em relação ao cimento de referência. No cimento CP75PV25, por exemplo, houve um aumento de 46 minutos em relação ao tempo de pega inicial do REF. O aumento do tempo de pega inicial confere uma melhor trabalhabilidade ao cimento. Já para o tempo de fim de pega, os cimentos estudados tiveram uma variação mínima, em torno de 300 minutos, exceto para o traço com 5% de pó de vidro que apresentou 281 minutos. Nesse sentido, tal divergência pode ser explicada pelo maior intervalo de tempo entre as medições. Ainda assim, ambos os tempos de pega inicial e final dos cimentos estudados estão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Em relação à resistência mecânica, para todas as três idades analisadas (3, 7 e 28 dias), observou-se que quanto maior a incorporação do pó de vidro, menor a sua resistência mecânica. Na idade de 28 dias, por exemplo, observou-se uma redução de 8,83%, 19,45%, e 26,72% para os cimentos com teor de 5%, 15% e 25% de pó de vidro, respectivamente, em relação à referência com resistência de 54,12 MPa. Na idade de 3 e 7 dias, todos os cimentos atenderam ao requisito da NBR 16697 em relação à resistência à compressão, exceto para o CP75PV25 na idade de 7 dias que obteve o valor de 32,13 MPa, inferior ao

limite estabelecido. A ocorrência do efeito pozolânico do pó de vidro em idades mais avançadas pode explicar a diminuição da resistência mecânica nas idades iniciais.

Em relação à análise estatística da resistência mecânica, pode-se observar que somente o cimento de referência e com 5% de pó de vidro nas idades de 3, 7 e 28 dias não apresentou diferenças significativas entre si conforme demonstrado nas Tabelas 12 a 14. Portanto, a utilização do CP95PV5 em relação ao cimento de referência é estatisticamente equivalente. Comparando o CP75PV25 ao CP85PV15, observou-se que não houve diferença significativa nas idades 3 e 28 dias, conforme apresentado nas Tabela A.4 e A.12 do Apêndice A, o que pode indicar uma possível aplicação de ambos os cimentos sem que haja prejuízo nas suas características mecânicas.

Além disso, foi observado que dentre os ensaios realizados no presente trabalho, foram atendidos aos requisitos mínimos para todos os cimentos exceto para a resistência à compressão aos 7 dias de idade para o CP75PV25. Dessa forma o CP85PV15, tendo em vista a maior incorporação do pó de vidro como adição mineral, é uma excelente alternativa para diminuir a quantidade de clínquer e garantindo os requisitos mínimos para o CP V.

Cabe destacar que para uma melhor análise da viabilidade técnica da incorporação do pó de vidro ao cimento, é importante que sejam investigados outros parâmetros relacionados aos requisitos químicos. Além disso, o custo gerado pelas etapas do beneficiamento do vidro deve ser levado em conta para que haja um melhor custo x benefício na utilização do vidro moído como adição mineral.

## REFERÊNCIAS

- ABRABE, A. B. B. **Glass is Good**. Disponível em: <<http://www.abrabe.org.br/glass-is-good/>>. Acesso em: 28 de abril de 2022.
- ABRAVIDRO. **Panorama Abravidros - O mercado vidreiro em números 2021**. Disponível em: <<https://abravidro.org.br/mercado/panorama-abravidro/>>. Acesso em: 28 de abril de 2022.
- ALIABDO, Ali A.; ABD ELMOATY, M.; ABOSHAMA, Ahmed Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 866-877, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (n° 200). Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12826**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **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 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- BARROS, L. M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado**. [s.l.] Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, 2016. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-31012017-163751/pt-br.php>>
- 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>>.
- BORGES, A. L. *et al.* Evaluation of the Pozzolanic Activity of Glass Powder in Three Maximum Grain Sizes. **Materials Research**, v. 24, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0496>.
- CARVALHO, E. L. B. DE. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro em substituição parcial ao cimento no concreto verde**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, p. 78, 2019. Disponível em: <<http://repositorio.ifpi.edu.br:8080/jspui/handle/123456789/1520>>.
- CEMPRE, C. E. R. **Fichas técnicas**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>>.
- DU, H.; TAN, K. Properties of high volume glass powder concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 75, p. 22-29, 2017.
- DU, Y. *et al.* Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder,

metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125018, 2021.

GCCA, G. C. GNR PROJECT Reporting CO<sub>2</sub>. Disponível em: <<https://gccassociation.org/gnr/>>. Acesso em: 03 de maio de 2022.

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

INTERGLAD. I. G. D. S. Disponível em: <[https://www.newglass.jp/interglad\\_n/gaiyo/info\\_e.html](https://www.newglass.jp/interglad_n/gaiyo/info_e.html)>. Acesso em: 03 de mar. de 2022.

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.

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.

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.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHEN, R. N. Produção de cimento: impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/12110>>. Acesso em: 05 de jun. de 2022.

MATOS, A. M. *et al.* Durability enhancement of SCC with waste glass powder. **Materials Research**, v. 19, p. 67-74, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 3<sup>a</sup> ed., 2014.

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

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.

NEVILLE A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2<sup>a</sup> ed., 2013.

OMRAN, A. *et al.* Performance of ground-glass pozzolan as a cementitious material - A Review. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 7, n. 1, p. 237-270, 2018.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Números da indústria: produção regional 2020. p. 1, 2020. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: 15 de maio de 2022.

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.

TAGNIT-HAMOU, A. *et al.* Novel ultra-high performance glass concrete. **Concrete**

**International**, v. 37, n. 3, p. 41-47, 2015.

TAGNIT-HAMOU, A.; SOLIMAN, N.; OMRAN, A. 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.

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

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

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.

# APÊNDICE A

No Apêndice A são apresentados dados complementares dos ensaios, valores obtidos por corpo de prova para cada propriedade, bem como, dados estatísticos descritivos das análises estatísticas e a descrição dos dados da ANOVA e do Teste de Tukey para resistência à compressão dos cimentos para as idades de 3, 7 e 28 dias.

## A.1 ANÁLISE AOS 3 DIAS

Na Tabela A.1 são apresentados os valores de resistência à compressão dos cimentos analisados com a idade de 3 dias.

**Tabela A.1: Resistência à compressão dos cimentos aos 3 dias de idade**

Resistência à compressão dos cimentos - 3 dias				
Nº CP	REF	CP95PV5	CP85PV15	CP75PV25
1	36,294	32,207	27,933	28,591
2	34,081	33,251	29,684	27,849
3	36,452	35,106	29,671	25,783
4	37,146	35,285	30,326	27,686

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela A.2 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos cimentos analisados com a idade de 3 dias.

**Tabela A.2: Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos cimentos aos 3 dias de idade**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
REF	4	143,97	35,99	1,76
CP95PV5	4	135,85	33,96	2,21
CP85PV15	4	117,61	29,40	1,06
CP75PV25	4	109,91	27,48	1,43

Fonte: Autor (2022).

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

**Tabela A.3: ANOVA para os cimentos da resistência à compressão aos 3 dias de idade**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	186,61	3	62,20	38,50	1,95E-06	3,49
Dentro dos grupos	19,39	12	1,62			
<b>Total</b>	<b>205,99</b>	<b>15</b>			<b>Conclusão: Rejeitar H0</b>	

Fonte: Autor (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 A.4.

**Tabela A.4: Teste de Tukey para os cimentos da resistência à compressão aos 3 dias**

Amostras	REF	CP95PV5	CP85PV15	CP75PV25
REF		Não	Sim	Sim
CP95PV5			Sim	Sim
CP85PV15				Não

OBS.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2022).

## A.2 ANÁLISE AOS 7 DIAS

Na Tabela A.5 são apresentados os valores de resistência à compressão dos cimentos analisados com a idade de 7 dias.

**Tabela A.5: Resistência à compressão dos cimentos aos 7 dias de idade**

Resistência à compressão dos cimentos - 7 dias				
Nº CP	REF	CP95PV5	CP85PV15	CP75PV25
1	41,266	42,092	35,573	31,359
2	39,429	40,480	34,497	31,594
3	43,917	39,143	36,726	32,718
4	43,838	39,858	37,354	32,850

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela A.6 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos cimentos analisados com a idade de 3 dias.

**Tabela A.6: Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos cimentos aos 7 dias de idade**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
REF	4	168,45	42,11	4,72
CP95PV5	4	161,57	40,39	1,58
CP85PV15	4	144,15	36,04	1,60
CP75PV25	4	128,52	32,13	0,58

Fonte: Autor (2022).

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

**Tabela A.7: ANOVA para os cimentos da resistência à compressão aos 7 dias de idade**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	242,02	3	80,67	38,05	2,08E-06	3,49
Dentro dos grupos	25,44	12	2,12			
<b>Total</b>	<b>267,46</b>	<b>15</b>			<b>Conclusão: Rejeitar H0</b>	

Fonte: Autor (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 A.8.

**Tabela A.8: Teste de Tukey para os cimentos da resistência à compressão aos 7 dias**

Amostras	REF	CP95PV5	CP85PV15	CP75PV25
REF		Não	Sim	Sim
CP95PV5			Sim	Sim
CP85PV15				Sim

OBS.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2022).

### A.3 ANÁLISE AOS 28 DIAS

Na Tabela A.9 são apresentados os valores de resistência à compressão dos cimentos analisados com a idade de 28 dias.

**Tabela A.9: Resistência à compressão dos cimentos aos 28 dias de idade**

Resistência à compressão dos cimentos - 28 dias				
Nº CP	REF	CP95PV5	CP85PV15	CP75PV25
1	54,030	50,459	43,314	39,670
2	54,641	51,950	44,347	34,822
3	55,739	47,590	46,247	43,387
4	52,078	47,376	40,451	40,772

Fonte: Autor (2022)

Na Tabela A.10 são apresentados os valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos cimentos analisados com a idade de 28 dias.

**Tabela A.10: Valores estatísticos descritivos da resistência à compressão dos cimentos aos 28 dias de idade**

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa <sup>2</sup> )
REF	4	168,45	42,11	4,72
CP95PV5	4	161,57	40,39	1,58
CP85PV15	4	144,15	36,04	1,60
CP75PV25	4	128,52	32,13	0,58

Fonte: Autor (2022).

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

**Tabela A.11: ANOVA para os cimentos da resistência à compressão aos 28 dias de idade**

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	242,02	3	80,67	38,05	2,08E-06	3,49
Dentro dos grupos	25,44	12	2,12			
<b>Total</b>	<b>267,46</b>	<b>15</b>			<b>Conclusão: Rejeitar H0</b>	

Fonte: Autor (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 A.12.

**Tabela A.12: Teste de Tukey para os cimentos da resistência à compressão aos 28 dias**

Amostras	REF	CP95PV5	CP85PV15	CP75PV25
REF		Não	Sim	Sim
CP95PV5			Sim	Sim
CP85PV15				Não

OBS.: NÃO = não há diferença significativa; SIM = há diferença significativa.

Fonte: Autor (2022).