

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - MESTRADO

DAISE FERNANDA RUBIO DA SILVA BOTOLO

**ESTUDO DE CONCRETOS DE ULTRA ALTO
DESEMPENHO, COM INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO,
SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS: Análise do efeito
spalling e das propriedades residuais**

MARINGÁ
2025

DAISE FERNANDA RUBIO DA SILVA BOTOLO

**ESTUDO DE CONCRETOS DE ULTRA ALTO
DESEMPENHO, COM INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO,
SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS: Análise do efeito
spalling e das propriedades residuais**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Prof.^a Dra. Silvia Paula Sossai Altoé

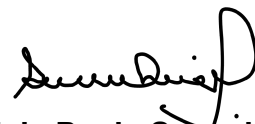
MARINGÁ
2025

DAISE FERNANDA RUBIO DA SILVA

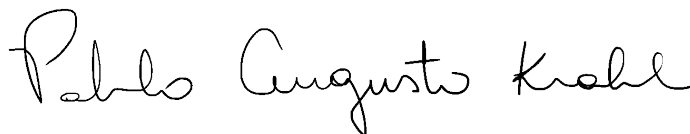
**ESTUDO DE CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO, COM
INCORPORAÇÃO DE PÓ DE VIDRO, SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS:
ANÁLISE DO EFEITO SPALLING E DAS PROPRIEDADES RESIDUAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 31/01/2025, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Silvia Paula Sossai Altoé
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professora Orientadora de Estudos



Prof. Dr. Pablo Augusto Krah
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá



Profa. Dra. Sarah Honorato Lopes da Silva Tamura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus pelo dom da vida, por guiar meus passos, renovar minhas forças e inspirar a minha jornada. Em cada desafio superado, pude sentir Sua presença.

À Universidade Estadual de Maringá pela excelência acadêmica, pela infraestrutura e pelas oportunidades que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Ao meu amado noivo Willian, agradeço pela ajuda, paciência e apoio incondicional em cada etapa. Obrigada por acreditar em mim, mesmo quando eu mesma duvidei, e por compartilhar comigo cada conquista como se fosse sua. TKS, soldado.

Aos meus pais, Eli e Edair; à minha irmã, Laisa; aos meus tios, Mônica e Júnior; às minhas primas, Luna e Luísa; e à minha avó, Maria; por serem minha fonte inesgotável de força e pelo amor incondicional.

À minha orientadora, professora Sílvia, por quem eu tenho profunda admiração e respeito. Este trabalho é, em grande parte, fruto de sua orientação e carinho, que sempre me impulsionaram a ir além.

Ao departamento de física da UEM, pela disponibilização de espaço e equipamentos.

Aos técnicos do COMCAP (Complexo de Centrais de Apoio a Pesquisa) pela disposição em ajudar.

Aos professores, pelos aprendizados e pelo meu crescimento acadêmico.

À Homrich Engenharia, pelo apoio e confiança. A flexibilidade com minha ausência e o incentivo ao meu desenvolvimento foram fundamentais para a concretização desse objetivo.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Há três caminhos para o sucesso: ensinar o que se sabe, praticar o que se ensina e perguntar o que se ignora.

Mário Sérgio Cortella

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

RESUMO

Além da resistência às solicitações mecânicas, os sistemas estruturais devem oferecer durabilidade e segurança aos usuários diante de ocorrências de alta periculosidade, como situações de incêndio. No meio técnico, prevalece a teoria de que as altas temperaturas são mais perigosas em compósitos densos, de baixíssima permeabilidade, como os concretos de ultra alto desempenho (UHPC), pois são mais suscetíveis ao lascamento explosivo – conhecido como efeito *spalling*. Estudos revelam que, além da densidade do concreto, a fragmentação explosiva também pode ser correlacionada com o fluxo de calor, que depende da taxa de aquecimento e duração da alta temperatura; e com a distribuição de temperatura no interior do elemento, que depende do tipo do cimento, agregados e adições, da geometria, da massa específica, do teor de umidade, da idade de hidratação, da relação água/cimento e da porosidade do material. Como o UHPC vem sendo amplamente estudado com a incorporação de resíduos que possuem potencial pozzolânico, seu comportamento pode ser ainda mais complexo sob altas temperaturas. Este trabalho busca investigar a ocorrência do efeito *spalling* e as propriedades residuais de UHPC com resíduo pó de vidro (PDV), quando submetidos a altas temperaturas. Para um traço pré-definido de UHPC, o cimento foi substituído por PDV - que possuem partículas menores do que $300\mu\text{m}$ - nas porcentagens de 0, 5, 10, 15 e 20%. Suas propriedades no estado fresco e endurecido em temperatura ambiente foram determinadas. O teor de 10% de PDV, se apresentou viável para utilização, considerando que não diminuiu bruscamente a fluidez da mistura e proporcionou resistência superior à mistura referência aos 70 dias. Para os ensaios em altas temperaturas, o traço referência (V0) e o traço com 10% de PDV (V10) foram confeccionados em corpos de prova (CPs) cilíndricos de 5x10cm. Para avaliar a ocorrência do efeito *spalling*, aos 70 dias de idade, os CPs das misturas V0 e V10 foram aquecidos até a temperatura de fragmentação, variando a taxa de aquecimento (1, 5 e 15°C/min) e o teor de umidade. Além disso, os CPs também foram avaliados quanto a resistência ao choque térmico ao serem retirados imediatamente do forno aos 300°C. Para avaliar as propriedades mecânicas residuais, os CPs das misturas de UHPC V0 e V10 foram submetidos a temperaturas de 100, 200, 300 e 400°C, aos 70 dias, a uma taxa fixa de aquecimento de 5°C/min. Verificou-se que os CPs da mistura com PDV não apresentaram efeito *spalling* sob a taxa de aquecimento de 15°C/min, diferentemente da mistura sem PDV, que apresentou intensa explosão. Para a taxa de aquecimento de 1°C/min, a mistura com PDV apresentou efeito *spalling* a uma temperatura de 480°C, enquanto a mistura sem PDV não chegou aos 400°C. Para os CPs de ambos os traços, a uma taxa de 5°C/min, o alto teor de umidade adiantou a ocorrência do efeito *spalling*, se comparado aos CPs secos. Nenhum dos traços apresentou resistência ao choque térmico. Quanto às propriedades residuais, todos os CPs de ambos os traços de UHPC (com e sem PDV) apresentaram resistência à compressão axial superior às misturas ensaiadas em temperatura ambiente.

Palavras-chave: pó de vidro, ultra alto desempenho, elevadas temperaturas, efeito *spalling*.

ABSTRACT

In addition to resistance to mechanical stress, structural systems must offer durability and safety to users in the face of highly hazardous situations, such as fires. In the technical field, the prevailing theory is that high temperatures are more dangerous in dense composites with very low permeability, such as ultra-high-performance concrete (UHPC), as they are more susceptible to explosive spalling – known as the spalling effect. Studies show that, in addition to the density of the concrete, explosive spalling can also be correlated with the heat flow, which depends on the heating rate and duration of the high temperature; and with the temperature distribution inside the element, which depends on the type of cement, aggregates and additions, geometry, specific mass, moisture content, hydration age, water/cement ratio and porosity of the material. Since UHPC has been widely studied with the incorporation of waste that has pozzolanic potential, its behavior can be even more complex under high temperatures. This work aims to investigate the occurrence of the spalling effect and the residual properties of UHPC with glass powder residue (GP) when subjected to high temperatures. For a predefined UHPC mix, the cement was replaced by GP - which has particles smaller than $300\mu\text{m}$ - in percentages of 0, 5, 10, 15 and 20%. Its properties in the fresh and hardened state at room temperature were determined. The 10% GP content was viable for use, considering that it did not abruptly decrease the fluidity of the mix and provided superior strength to the reference mix at 28 and 70 days. For the tests at high temperatures, the reference mix (V0) and the mix with 10% GP (V10) were prepared in cylindrical test specimens (TSs) of $5\times 10\text{cm}$. To evaluate the occurrence of the spalling effect, at 70 days of age, the TSs of the V0 and V10 mixtures were heated to the fragmentation temperature, varying the heating rate (1 , 5 and $15^\circ\text{C}/\text{min}$) and the moisture content. In addition, the TSs were also evaluated for thermal shock resistance when immediately removed from the oven at 300°C . To evaluate the residual mechanical properties, the TSs of the UHPC mixtures V0 and V10 were subjected to temperatures of 100 , 200 , 300 and 400°C , at 70 days, at a fixed heating rate of $5^\circ\text{C}/\text{min}$. It was found that the TSs of the mixture with GP did not present a spalling effect under the heating rate of $15^\circ\text{C}/\text{min}$, unlike the mixture without GP, which presented intense explosion. For a heating rate of $1^\circ\text{C}/\text{min}$, the mixture with GP showed a spalling effect at a temperature of 480°C , while the mixture without GP did not reach 400°C . For the TSs of both mixes, at a rate of $5^\circ\text{C}/\text{min}$, the high moisture content accelerated the occurrence of the spalling effect, when compared to the dry TSs. None of the mixes showed resistance to thermal shock. Regarding the residual properties, all TSs of both UHPC mixes (with and without GP) showed superior axial compression resistance than the mixes tested at room temperature.

Key-words: glass powder, ultra high performance, high temperatures, spalling effect

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Passarela para pedestres em Sherbrooke, Quebec, 1997.....	25
Figura 2 – Ponte Mars Hill nos Estados Unidos.....	25
Figura 3 – Peças pré-fabricadas, montagem e detalhamento da concepção da ponte	26
Figura 4 – Fachada em UHPC do Ministério das Relações Exteriores em São Paulo.	27
Figura 5 – Fachada de UHPC na Casa do Japão em São Paulo.	27
Figura 6 – Unidade habitacional confeccionada em painéis com UHPC.....	28
Figura 7 – Matriz do concreto convencional (CC), concreto de alto desempenho (CAD) e UHPC sem fibras e com fibras	29
Figura 8 – Comparação entre possíveis proporções dos constituintes de um UHPC e um CC	29
Figura 9 – Traço unitário das misturas desenvolvidas pelo método de dosagem proposto por Christ	30
Figura 10 – Processo físico-químico do concreto em situações de incêndio	34
Figura 11 – Produtos de hidratação (Portlandita, etringita e monossulfato) em diferentes idades	37
Figura 12 – Esquematização do programa experimental.....	39
Figura 13 – Decantação da mistura de PDV e água na empresa	48
Figura 14 – Blocos de lama seca do resíduo de vidro	48
Figura 15 – Blocos menores de resíduo após 10 minutos de moagem.....	49
Figura 16 – Pó de vidro após 30 minutos de moagem.	49
Figura 17 – Microscopia Eletrônica por Varredura do pó de vidro. Ampliações de 50, 10, 5 e 2µm.....	52
Figura 18 – Misturador planetário de bancada (argamassadeira).....	55
Figura 19 – Misturador envolto com saco plástico	56
Figura 20 – Utilização de saco de confeiteiro para moldagem dos CPs.....	56
Figura 21 – Dimensões do mini cone para mini <i>slump</i>	58
Figura 22 – CPs com bases retificadas	59
Figura 23 – Medidas da base e altura dos CPs com auxílio de um paquímetro.	59
Figura 24 – Prensa hidráulica durante o ensaio de resistência à compressão axial e diametral.	60
Figura 25 – Equipamento utilizado para Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)	62
Figura 26 – Ensaio no estado endurecido à temperatura ambiente.....	62
Figura 27 – Forno EDG 3000.....	63

Figura 28 – Ensaio dos CPs no forno	63
Figura 29 – Gradiente de temperatura dentro do forno (vista frontal)	64
Figura 30 – Esquematização dos ensaios realizados para análise do efeito <i>spalling</i> o UHPC com e sem PDV	66
Figura 31 – Ensaio das fases 05 e 06 para o UHPC com e sem PDV.....	68
Figura 32 – CP de UHPC durante o ensaio de resistência à compressão axial.	76
Figura 33 – CP de UHPC após o ensaio de resistência à compressão diametral.	82
Figura 34 – Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)	82
Figura 35 – Ensaio de módulo de elasticidade em UHPC.....	84
Figura 36 – MEV do UHPC com 10% de PDV (V10) aos 70 dias – Ampliação de 2000x	88
Figura 37 – MEV do UHPC com 10% de PDV (V10) aos 70 dias – Ampliação de 2000x	88
Figura 38 – CPs de UHPC sem PDV (V0) antes e após serem aquecidos a uma taxa de 15°C/min	90
Figura 39 – CPs de UHPC sem PDV (V0) após serem aquecidos a uma taxa de 5°C/min.....	91
Figura 40 – Três dos CPs de UHPC sem PDV (V0) após serem aquecidos a uma taxa de 1°C/min	91
Figura 41 – CPs de UHPC com PDV (V10) após serem aquecidos a uma taxa de 15°C/min .	92
Figura 42 – CPs de UHPC com PDV (V10) após serem aquecidos a uma taxa de 5°C/min ...	93
Figura 43 - CPs de UHPC com PDV (V10) após serem aquecidos a uma taxa de 1°C/min....	93
Figura 44 – Sequência de imagens de um vídeo realizado no momento que os CPs explodem na bancada devido ao choque térmico	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetros do cimento obtidos no ensaio de granulometria a laser	42
Tabela 2 – Diâmetros da areia obtidos no ensaio de granulometria a laser.....	44
Tabela 3 – Análise química da areia.....	44
Tabela 4 – Diâmetros do Pó de Quartzo obtidos no ensaio de granulometria a laser	45
Tabela 5 – Análise química do Pó de Quartzo	45
Tabela 6 – Diâmetros da Sílica Ativa obtidos no ensaio de granulometria a laser	46
Tabela 7 – Análise química da Sílica Ativa	46
Tabela 8 – Diâmetros do Pó de Vidro obtidos no ensaio de granulometria a laser.....	50
Tabela 9 – Análise química do Pó de Vidro	51
Tabela 10 – Traço do UHPC referência	53
Tabela 11 – Traço das misturas de UHPC com substituição de cimento por PDV.....	55
Tabela 12 – Quantidades em massa para seis corpos de prova 5x10cm	72
Tabela 13 – Resultados do ensaio de mini abatimento.....	73
Tabela 14 – Resistência à compressão axial aos 7 dias.....	77
Tabela 15 – Resistência à compressão axial aos 70 dias.....	78
Tabela 16 – Evolução da resistência à compressão axial dos 7 aos 70 dias.....	78
Tabela 17 – Resistência à compressão axial aos 28 e 70 dias das misturas V0 e V10.....	79
Tabela 18 – Resistência à compressão axial aos 28 e 70 dias das misturas V0 e V10.....	81
Tabela 19 – Velocidade de pulso ultrassônico aos 28 e 70 dias das misturas V0 e V10	83
Tabela 20 – Módulo de elasticidade dinâmico estimado aos 70 dias das misturas V0 e V10 ..	84
Tabela 21 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade estático aos 28 das misturas V0 e V10	85
Tabela 22 – Velocidade de pulso ultrassônico aos 28 e 70 dias das misturas V0 e V10	85
Tabela 23 – Absorção das misturas V0 e V10 aos 70 dias.....	86
Tabela 24 – Resistência à compressão axial aos 70 dias dos CPs de UHPC com e sem PDV, após serem submetidas à temperatura de 200°C.....	100
Tabela 25 – Resistência à compressão axial aos 70 dias dos CPs de UHPC com e sem PDV, após serem submetidas à temperatura de 300°C.....	101
Tabela 26 – Resistência à compressão axial aos 70 dias dos CPs de UHPC com e sem PDV, após serem submetidas à temperatura de 300°C.....	102
Tabela 27 – Resistência à compressão axial aos 70 dias dos CPs de UHPC com e sem PDV, após serem submetidas à temperatura de 100°C.....	102

Tabela 28 – Resistência à compressão axial aos 70 dias das misturas V0 e V10, após serem submetidos à temperatura de 200°C	104
Tabela 29 – Resistência à compressão axial aos 70 dias das misturas V0 e V10, após serem submetidos à temperatura de 300°C	104
Tabela 30 – Resistência à compressão axial aos 70 dias das misturas V0 e V10, após serem submetidos à temperatura de 400°C	105
Tabela 31 – Resistência à compressão axial aos 70 dias das misturas V0 e V10, após serem submetidos à temperatura de 100°C	105
Tabela 32 – Velocidade de pulso ultrassônico aos 70 dias das misturas V0 e V10 pós-forno	106
Tabela 33 – Módulo de elasticidade aos 70 dias das misturas V0 e V10, após o ensaio a elevadas temperaturas.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo de contribuições de autores que utilizaram PDV no UHPC.....	32
Quadro 2 - Propriedades físico-químicas do cimento Portland.....	41
Quadro 3 – Especificações do aditivo superplastificante	43
Quadro 4 – Aspecto visual do ensaio de mini abatimento	74
Quadro 5 – Índices estimativos da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica	83
Quadro 6 – MEV do UHPC com e sem PDV aos 28 dias.....	87
Quadro 7 – Resultados da análise de <i>spalling</i> no UHPC sem PDV (V0) variando a taxa de aquecimento.....	92
Quadro 8 – Resultados da análise de <i>spalling</i> dos traços de UHPC (V0 e V10) variando a taxa de aquecimento	94
Quadro 9 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0, V5, V10, V15 e V20 aos 7 e 70 dias	122
Quadro 10 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 28 e 70 dias a temperatura ambiente	123
Quadro 11 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 70 dias após ensaio no forno a 200°C a uma taxa de 5°C/min	124
Quadro 12 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 70 dias após ensaio no forno a 300°C a uma taxa de 5°C/min	125
Quadro 13 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 70 dias após ensaio no forno a 400°C a uma taxa de 1°C/min	125
Quadro 14 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 70 dias após permanecer na estufa por 6 dias 100°C.....	126
Quadro 15 – Equações utilizadas para o cálculo de resistência à compressão axial	126
Quadro 16 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão diametral das misturas V0 e V10, aos 28 e 70 dias a temperatura ambiente	127
Quadro 17 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão diametral das misturas V0 e V10, aos 70 dias após serem submetidos a temperatura de 200°C (taxa de 5°C/min).....	128
Quadro 18 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão diametral das misturas V0 e V10, aos 70 dias após serem submetidos a temperatura de 300°C (taxa de 5°C/min).....	129
Quadro 19 – Equações utilizadas para o cálculo de resistência à compressão diametral.....	129
Quadro 20 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V0 aos 28 dias.....	130

Quadro 21 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V0 aos 70 dias.....	130
Quadro 22 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V10 aos 28 dias.....	131
Quadro 23 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V10 aos 70 dias.....	131
Quadro 24 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V0 aos 70 dias pós-forno	131
Quadro 25 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V10 aos 70 dias pós-forno	132

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição Granulométrica do Cimento Portland.....	42
Gráfico 2 – Difratoograma do Cimento Portland	42
Gráfico 3 – Distribuição Granulométrica da Areia	43
Gráfico 4 – Distribuição Granulométrica do Psó de Quartzo.....	44
Gráfico 5 – Difratoograma do Pó de Quartzo.....	45
Gráfico 6 – Distribuição Granulométrica da Sílica Ativa	46
Gráfico 7 – Difratoograma da Sílica Ativa.....	47
Gráfico 8 – Distribuição Granulométrica do Pó de Vidro.....	50
Gráfico 9 – Difratoograma do Pó de Vidro (PDV).	51
Gráfico 10 – Termogravimetria do Pó de Vidro.....	52
Gráfico 11 – Distribuição granulométrica dos materiais.....	53
Gráfico 12 – Porcentagem retida dos materiais.....	54
Gráfico 13 – Difratoograma da Sílica Ativa e do Pó de Vidro	71
Gráfico 14 – Relação entre o percentual de substituição de cimento por PDV com o índice de deformabilidade das misturas	73
Gráfico 15 – Evolução das resistências à compressão axial do UHPC com e sem PDV (V0 e V10).	80
Gráfico 16 - Evolução das resistências à tração indireta do UHPC com e sem PDV.	81
Gráfico 17 – Temperatura de <i>spalling</i> dos traços de UHPC (V0 e V10) secos variando a taxa de aquecimento	94
Gráfico 18 - Temperatura de <i>spalling</i> dos traços de UHPC (V0 e V10) saturados a taxa de aquecimento de 5°C/min	96
Gráfico 19 – Configuração do ensaio a 200°C para determinação das propriedades residuais do UHPC.	99
Gráfico 20 – Configuração do ensaio a 300°C para determinação das propriedades residuais do UHPC	100
Gráfico 21 – Configuração do ensaio a 400°C para determinação das propriedades residuais do UHPC	101
Gráfico 22 – Resistência à compressão residual dos CPs de UHPC à temperatura ambiente e submetidos a temperaturas de 100, 200, 300 e 400°C.....	103

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/aglomerante ou água/cimento
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ARI	Alta Resistência Inicial
CAA	Concreto autoadensável
CAD	Concreto de Alto Desempenho
Ca(OH)₂	Hidróxido de cálcio ou portlandita
CAR	Concreto de Alta Resistência
CUAD	Concreto de Ultra Alto Desempenho
CP V ARI	Cimento Portland Tipo V de Alta Resistência Inicial
CPs	Corpos de prova
CPR	Concreto de pós reativos
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difração de raios-x
f_{c28}	Resistência à compressão aos 28 dias
f_{cj}	Resistência à compressão aos “j” dias
MCS	Material Cimentício Suplementar
MEV	Microscopia Eletrônica por Varredura
NBR	Norma Brasileira
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>
PDV	Pó de vidro
V0	UHPC com 0% de PDV em substituição ao cimento
V5	UHPC com 5% de PDV em substituição ao cimento
V10	UHPC com 10% de PDV em substituição ao cimento
V15	UHPC com 15% de PDV em substituição ao cimento
V20	UHPC com 20% de PDV em substituição ao cimento
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA.....	21
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivo geral	23
1.2.2	Objetivos específicos.....	23
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1	CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO (UHPC).....	24
2.1.1	Definição do UHPC.....	24
2.1.2	Aplicações do UHPC.....	24
2.1.3	Composição e propriedades do UHPC	28
2.1.4	Utilização de pó de vidro no UHPC	31
2.2	UHPC SUBMETIDO A ELEVADAS TEMPERATURAS	33
2.2.1	Efeito <i>spalling</i>	35
2.2.2	Efeito do PDV no UHPC sob altas temperaturas	36
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1	MATERIAIS	40
3.1.1	Cimento	41
3.1.2	Água	43
3.1.3	Aditivo.....	43
3.1.4	Areia	43
3.1.5	Pó de quartzo (PDQ)	44
3.1.6	Sílica ativa (SA)	45
3.1.7	Pó de vidro (PDV).....	47
3.2	MISTURA E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE UHPC	53
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO UHPC NO ESTADO FRESCO	57
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO UHPC NO ESTADO ENDURECIDO	59
3.4.1	Ensaio do UHPC à temperatura ambiente	59
3.4.2	Ensaio do UHPC sob elevadas temperaturas	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1	ANÁLISE DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO PDV	69
4.2	DEFINIÇÃO DO TEOR DE PDV NO UHPC	72
4.2.1	Estado fresco	72
4.2.2	Estado endurecido	76
4.3	UHPC EM TEMPERATURA AMBIENTE.....	79

4.3.1	Resistência à compressão axial	79
4.3.2	Resistência à tração indireta por compressão diametral.....	80
4.3.3	Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)	82
4.3.4	Módulo de elasticidade dinâmico.....	83
4.3.5	Módulo de elasticidade estático	84
4.3.6	Absorção de água por imersão	86
4.3.7	Microscopia eletrônica por varredura (MEV)	87
4.3.8	Síntese dos resultados.....	88
4.4	UHPC SOB ALTAS TEMPERATURAS.....	89
4.4.1	Análise do efeito <i>spalling</i>	89
4.4.2	Propriedades residuais.....	98
5	CONCLUSÃO	109
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
	REFERÊNCIAS	112
	APÊNDICE A – Dados dos ensaios de compressão axial	122
	APÊNDICE B – Dados dos ensaios de compressão diametral	127
	APÊNDICE C – Dados do ensaio de ultrassom.....	130
	APÊNDICE D – Cálculo da massa específica e módulo de elasticidade.....	133
	ANEXO A – Dados dos ensaios de granulometria a laser	136

1 INTRODUÇÃO

A medida em que as propriedades mecânicas entre concreto e aço são estudadas, novas tecnologias e possibilidades surgem. Um exemplo é o desenvolvimento de concretos especiais que, aliado à evolução computacional, permite aos projetistas a especificação de estruturas cada vez mais esbeltas. Isso é possível porque os concretos especiais possuem propriedades de resistência e durabilidade superiores aos concretos convencionais (CC ou em inglês *OPC Ordinary Portland Concrete*), como os chamados os Concretos de Alto Desempenho (CAD ou em inglês *HPC High Performance Concrete*) e Concretos de Ultra Alto Desempenho (CUAD ou em inglês *UHPC Ultra-high Performance Concrete*) (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

Os concretos de alto desempenho (CAD) foram criados para desempenhar funções em que, muitas vezes, os concretos convencionais não são aplicáveis. O concreto autoadensável (CAA), por exemplo, é um tipo de CAD que pode ter a mesma resistência de um concreto convencional, mas é capaz de preencher vazios e conferir excelente acabamento dos elementos estruturais sem a necessidade de vibrações no estado fresco. Portanto, o termo “desempenho” deve ser atribuído a uma necessidade específica a ser desempenhada, e não somente a elevação da resistência mecânica. (Christi; Tutikian; Helene, 2022).

Por outro lado, o concreto de ultra alto desempenho (UHPC do inglês *Ultra-high Performance Concrete*) é um material que necessariamente apresenta alta resistência mecânica (>130 MPa), excelente trabalhabilidade, elevada durabilidade e comportamento dúctil para os compósitos reforçados com fibras (Christi; Tutikian; Helene, 2022).

Os materiais utilizados no CAD são basicamente os mesmos do concreto convencional (CC) – aglomerantes, agregados miúdos e graúdos, água, com o incremento de aditivos químicos e adições minerais – porém em uma dosagem diferente e mais eficiente, dependendo do objetivo que se pretende alcançar (Tutikian; Dal Molin, 2021).

Já os concretos de ultra alto desempenho (UHPC) são constituídos apenas por materiais de granulometria muito fina (geralmente menores do que 3 mm), sem a presença de agregados graúdos, o que diminui os vazios do arranjo granular e proporciona maior compacidade à mistura (Lerch *et al.*, 2018).

Na dosagem do UHPC, alguns materiais podem ser empregados a fim beneficiar suas propriedades resistentes e reológicas, assim como suas características econômicas e sustentáveis.

A incorporação de microfibras metálicas na mistura, por exemplo, confere ductilidade ao material, uma elevada resistência à compressão do concreto e proporciona resistência à

tração superior a 10% da resistência à compressão, valor geralmente considerado para concretos convencionais (Yu; Spiesz; Brouwers, 2014).

Já a adição ou substituição parcial do cimento por materiais pozzolânicos, como a sílica ativa, a escória granulada de alto forno e a cinza volante, se apresentam como alternativas econômicas e sustentáveis para a fabricação de concretos, principalmente em compósitos com altas proporções de aglomerante, como o UHPC.

Esses materiais pozzolânicos são muito finos, e, se bem dosados, proporcionam um bom desempenho à mistura tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, principalmente devido ao empacotamento das partículas e às reações químicas que ocorrem entre os componentes em idades tardias (Torregrosa, 2013).

Além disso, a utilização de resíduos com características de pozolanas em substituição parcial ao cimento pode baratear a produção do UHPC e diminuir a quantidade de gás carbônico (CO₂) emitido por metro cúbico de concreto produzido. Isso explica o motivo pelo qual resíduos de vidro vem sendo estudados e testados como materiais cimentícios suplementares (MCS).

Atualmente, o pó de vidro (PDV) predominante amorfo e com alto teor de sílica, que provém de vidros reciclados moídos ou de laminação de peças vítreas, é um resíduo que vem sendo alvo de diversos estudos relacionados à concretos.

O pó de vidro, quando utilizado nos concretos em geral, pode apresentar duas ações características: o efeito fíler, quando o material atua no refinamento dos poros, situação em que os resultados podem ser verificados já nas primeiras idades; e a atividade pozzolânica, cujo resultado é evidenciado em idades tardias pela formação de compostos resistentes em reações lentas (Soliman; Tagnithamou, 2016; Lee *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2019; Borges, 2021; Soares, 2021).

Entretanto, além da resistência às solicitações mecânicas, os sistemas estruturais devem oferecer durabilidade e segurança aos usuários diante de ocorrências de alta periculosidade, como situações de incêndio, por exemplo.

Corrêa (2024), ao realizar buscas em bases de dados públicas e junto aos Corpos de Bombeiros dos estados brasileiros, verificou um crescimento no número geral de incêndios atendidos no Brasil, nas proporções de 7% e 15% comparando 2018 e 2019 com o ano de 2017. Ainda, de acordo com o monitoramento de notícias do Instituto Sprinkler Brasil (2023), houve um aumento de 8%, aproximadamente, no número de ocorrências de incêndios estruturais noticiadas pela imprensa, comparando o ano de 2023 com 2022. Diante do número significativo de ocorrências de incêndios em edificações, os materiais aplicados na execução de sistemas

estruturais devem ser amplamente estudados e analisados sob altas temperaturas, com destaque para o concreto, devido sua utilização em larga escala na construção civil.

Em geral, o concreto possui boas propriedades quanto à resistência ao fogo: é um material incombustível, com baixa difusividade térmica e não emite gases tóxicos. Mas, o que se busca, de fato, é que a estrutura resista à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, a depender das características de cada edificação, conforme preconiza a NBR 14432 (ABNT, 2001), o que é uma especificação diferente de ser resistente ao fogo (Neville, 2016).

No meio técnico, prevalece a teoria de que as altas temperaturas são mais perigosas em compósitos densos, de baixíssima permeabilidade, como os concretos de alto e ultra alto desempenho, pois estão mais suscetíveis ao lascamento explosivo – conhecido como efeito *spalling*. Porém, este ainda é um ponto conflitante entre pesquisadores, visto que outros aspectos podem influenciar no comportamento do UHPC em situações de incêndio, como: velocidade de elevação da temperatura, teor de umidade do concreto e presença de materiais pozolânicos no compósito (Tutikian; Isaia; Helene, 2011; Neville, 2016).

Diante disso, mais estudos se fazem necessários acerca do comportamento do UHPC sob altas temperaturas e da influência que os materiais pozolânicos, como o pó de vidro, podem oferecer aos concretos de ultra alto desempenho em situações de incêndio, por exemplo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Embora as propriedades dos concretos convencionais submetidos à elevadas temperaturas sejam conhecidas, existem poucos dados de testes sobre o comportamento do UHPC em situações similares (Kodur; Banerji, 2021).

Uma das ressalvas quanto à utilização do UHPC, se dá pela ocorrência de lascamentos explosivos (efeito *spalling*) em situações de incêndio, induzidos pelas altas temperaturas. É por esse motivo que os mecanismos que contribuem para o *spalling* têm sido estudados extensivamente há muitas décadas (Zhang; Dasari; Tan, 2018).

Nassar *et al.* (2024), destacam que a ocorrência do efeito *spalling* no UHPC é geralmente governada pela combinação de mecanismos como:

- aumento da pressão nos poros internos do concreto no processo de evaporação da água presente do material;
- tensões térmicas geradas pelos gradientes de temperatura entre superfície e núcleo dos elementos.

Os mesmos autores explicam que ambos mecanismos são influenciados pelo teor de umidade da mistura e pela taxa de aquecimento da temperatura. Além disso, a composição do UHPC também pode influenciar no seu comportamento em situações de incêndio.

Além dos materiais básicos já conhecidos (cimento e areia), atualmente, é comum utilizar materiais pozzolânicos como materiais cimentícios suplementares em concretos, principalmente em misturas de UHPC que demandam alto teor de aglomerantes. No Brasil, são emitidos cerca de 610 kg de gás carbônico para a produção de 1 (uma) tonelada de cimento (Escola politécnica, 2024). Portanto, substituir parcialmente o cimento do UHPC por resíduos mantendo suas propriedades resistentes, diminui a emissão de gases potencializadores do efeito estufa e reduz a quantidade de resíduos em aterros sanitários, além de proporcionar maior compacidade e evolução da resistência aos compósitos em idades mais avançadas.

Estudos recentes apontam que o pó de vidro é um material com potencial pozzolânico, e que além de todos os benefícios ecológicos que promove na produção de concretos, também pode oferecer vantagens ao UHPC submetido a altas temperaturas.

Pan *et al.* (2017) verificaram que em temperaturas até 500°C, o concreto convencional com substituição de 20% de cimento por pó de vidro (PDV) apresentou menor perda de resistência mecânica do que o concreto sem PDV. Os autores citam que para explicar esse resultado, mais estudos devem ser realizados.

Luo, Deng e Luo (2022) estudaram diversas granulometrias de pós de vidro em misturas de UHPC e verificaram que o lascamento explosivo diminuiu com a diminuição do tamanho da partícula de pó de vidro utilizado, não sendo verificada a ocorrência de spalling nas amostras com pó de vidro que possuíam tamanho da partícula menores do que 80 μ m (0,08 mm). Os autores atribuíram o resultado obtido ao efeito pozzolânico que é mais acentuado em pós de vidro mais finos, que aumentou a resistência mecânica frente às elevadas temperaturas, fortalecendo a resistência ao estresse interno causado pela evaporação de água do concreto.

Ling *et al.* (2012), estudaram o desempenho de CAD com pó de vidro sob diversas temperaturas (300, 500, 600 e 800°C) e verificaram que o resíduo beneficiou as propriedades do concreto após a exposição a temperaturas acima de 600°C. Os autores explicam o resultado do estudo à fusão e ressolidificação do pó de vidro na microestrutura do concreto.

Diante disso, o estudo da influência do pó de vidro em misturas de UHPC sob altas temperaturas (100-1000°C) se torna indispensável para entender como as estruturas com esses materiais se comportam em situações de incêndio. Além disso, variáveis como taxa de aquecimento, teor de umidade e resistência ao choque térmico também devem ser avaliadas, a

fim de verificar se possuem influência na ocorrência de efeitos explosivos do concreto diante do calor intenso.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas de concretos de ultra alto desempenho com e sem a substituição de cimento por pó de vidro. Foram avaliadas as propriedades em temperatura ambiente e as propriedades residuais após os corpos de prova dos concretos serem submetidos a altas temperaturas.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar o pó de vidro, subproduto da laminação de peças vítreas, física e quimicamente;
- b) Avaliar os efeitos que o pó de vidro proporciona às propriedades mecânicas do UHPC;
- c) Analisar a influência do pó de vidro nas propriedades residuais do UHPC frente a exposição à altas temperaturas;
- d) Avaliar os efeitos do teor de saturação, da taxa de aquecimento, do choque térmico e do pó de vidro na ocorrência do efeito *spalling* no UHPC.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO (UHPC)

A busca por um material tão resistente e durável quanto uma rocha, mas capaz de ser moldável em qualquer forma e dimensão, motivou a criação e o desenvolvimento dos concretos de ultra alto desempenho (CUAD) ou do inglês *Ultra-high Performance Concrete* (UHPC). Pode-se considerar que o UHPC, chamado primordialmente de concreto de pós reativos (CPR), é uma evolução do concreto de alto desempenho (CAD), assim como este é uma evolução dos concretos convencionais (CC) (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

2.1.1 Definição do UHPC

O UHPC foi definido pelo ACI 239 (2013) como um concreto com resistência à compressão mínima de 150 MPa e elevada ductilidade com a presença de fibras na mistura.

Já a Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC), define o UHPC como uma matriz cimentícia reforçada com fibras de aço, que possui resistência à compressão entre 150 e 250 MPa e resistência à tração superior a 7 MPa aos 28 dias, além de excelentes propriedades reológicas no estado fresco (AFGC, 2013). Por outro lado, a French Standard NF P 18-710, define a resistência à compressão mínima de 130 MPa para o UHPC.

A ASTM C1856M (2017) define que o UHPC deve possuir no mínimo 120 MPa de resistência à compressão. A Chinese Standard GB/T31387 (2015) estipula um limite de 100 MPa para compressão e 12 MPa para tração.

Segundo Christ, Tutikian e Helene (2022), o Comité Técnico CT303 IBRACON/ABECE prevê que a resistência à compressão do UHPC seja de, no mínimo, 130 MPa. Segundos os autores, o UHPC apresenta elevadas resistências à compressão e à tração, comportamento dúctil e elevada durabilidade. Apresenta baixo consumo de água, excelente fluidez devido à utilização de aditivos superplastificantes e um excelente empacotamento granular. Além disso, o UHPC geralmente é fabricado com materiais que possuem diâmetros menores do que três milímetros, sem agregados graúdos.

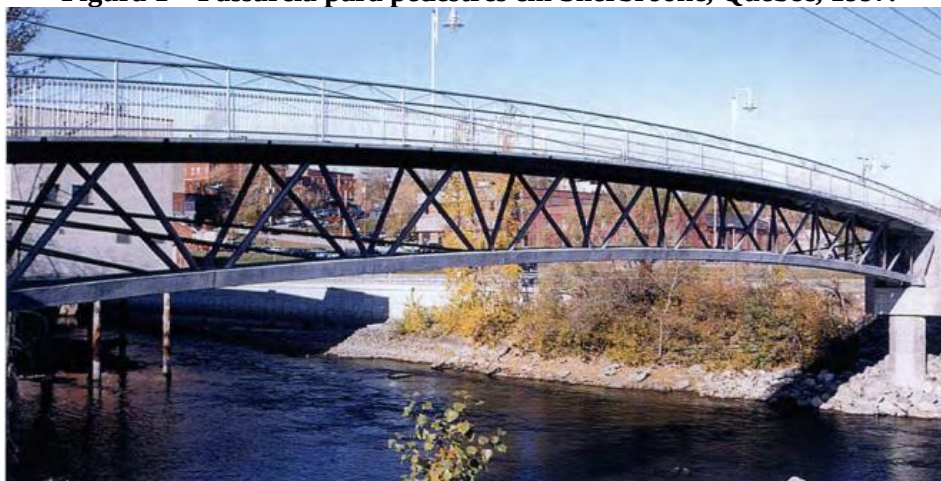
2.1.2 Aplicações do UHPC

O estudo do UHPC teve início por volta da década de 1990, conduzido pelos pesquisadores François De Larrard, Thierry Sedran, Pierre Ricard e Marcel Cheyrezy. Nas primeiras investigações e artigos científicos sobre o UHPC, o material era chamado de concreto de pós-reativos (*reactive power concrete* - CPR). Essa denominação foi amplamente utilizada, sendo que o termo "pós" se refere à significativa quantidade de partículas finas no material,

enquanto "reativos" diz respeito à interação química desses pós com os produtos resultantes da hidratação do cimento. Os pesquisadores conseguiram desenvolver concretos com resistências variando entre 230 MPa e 810 MPa utilizando curas em elevada temperatura e pressão (Aitcin, 1998 *apud* Christ; Tutikian; Helene, 2022).

A primeira construção do mundo utilizando UHPC foi a ponte Sherbrooke, localizada em Sherbrooke, Quebec, no Canadá (Figura 1), de 60 metros de extensão. Inaugurada em 1997, a ponte foi construída utilizando UHPC de 200 MPa de resistência à compressão e foi destinada somente para uso de pedestres. Essa ponte demonstrou o potencial do UHPC em aplicações estruturais devido à sua alta resistência, durabilidade e capacidade de suportar grandes cargas com seções transversais menores em comparação com o concreto convencional (Blais; Couture, 1999).

Figura 1 – Passarela para pedestres em Sherbrooke, Quebec, 1997.



Fonte: Blais e Couture (1999)

A primeira ponte rodoviária, executada em UHPC foi a ponte do Condado de Wapello Mars Hill (Figura 2) com 33,5 metros de comprimento, em 2006, nos Estados Unidos (Akhnoukh; Buckhalter, 2021).

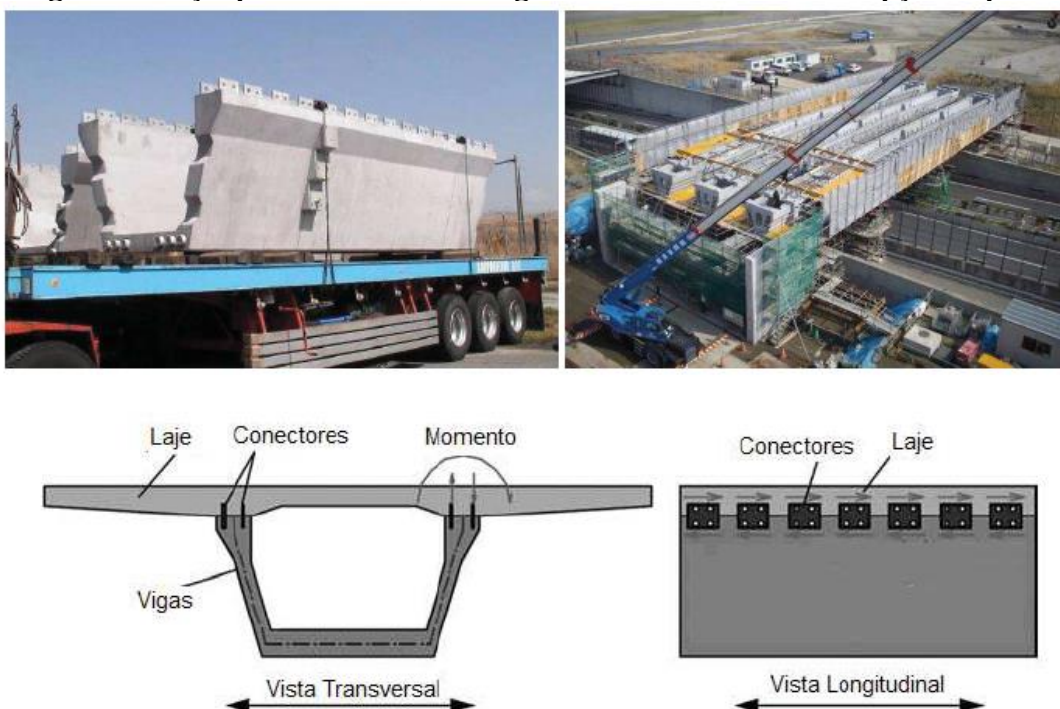
Figura 2 – Ponte Mars Hill nos Estados Unidos.



Fonte: Akhnoukh e Buckhalter (2021)

Outro exemplo da utilização do UHPC é na ponte do aeroporto de Tóquio, para o trânsito de aeronaves. A ponte possui 46 metros de extensão, 16 metros de largura. Sua carga de projeto é de 125 kN por eixo e possui estrutura formadas por vigas “U” na parte superior, que se apoiam em placas. As vigas e placas são de UHPC de 180 MPa (Toutlemonde; Resplendino, 2013 *apud* Christ, 2019).

Figura 3 – Peças pré-fabricadas, montagem e detalhamento da concepção da ponte



Fonte: Toutlemonde e Resplendino (2013) *apud* Christ (2019)

Outras passarelas, pontes de pequeno e alto tráfego, paredes portantes, painéis balísticos, escadas e obras de arte diversas foram executadas em UHPC pelo mundo, como no Japão, na Coreia do Sul, nos Estados Unidos, na França e na Alemanha (Christ, 2019).

Entretanto, o emprego do UHPC não se limita apenas a estruturas complexas. Suas características mecânicas e elevada durabilidade possibilitam uma ampla variedade de usos na engenharia em aplicações arquitetônicas, como abrigos de ônibus, móveis de rua em grandes centros, painéis de fachadas, etc. (Acker; Behloul, 2004 *apud* Christ, 2019)

Em 2016, foi realizada a primeira obra no Brasil com UHPC. Idealizado pelo Escritório de Arquitetura FGMEF, o projeto revitalizou a fachada do prédio do Ministério das Relações Exteriores, que deveria ser resistente e leveza para evitar reforços. O UHPC permitiu a criação de um painel arquitetônico vazado com 40% de vazios, composto por 8 placas de 2,5m x 4,5m

e 3cm de espessura (Figura 4). O painel final, com 90m², reduziu o peso em cerca de 7 toneladas comparado ao concreto convencional, eliminando a necessidade de reforço estrutural.

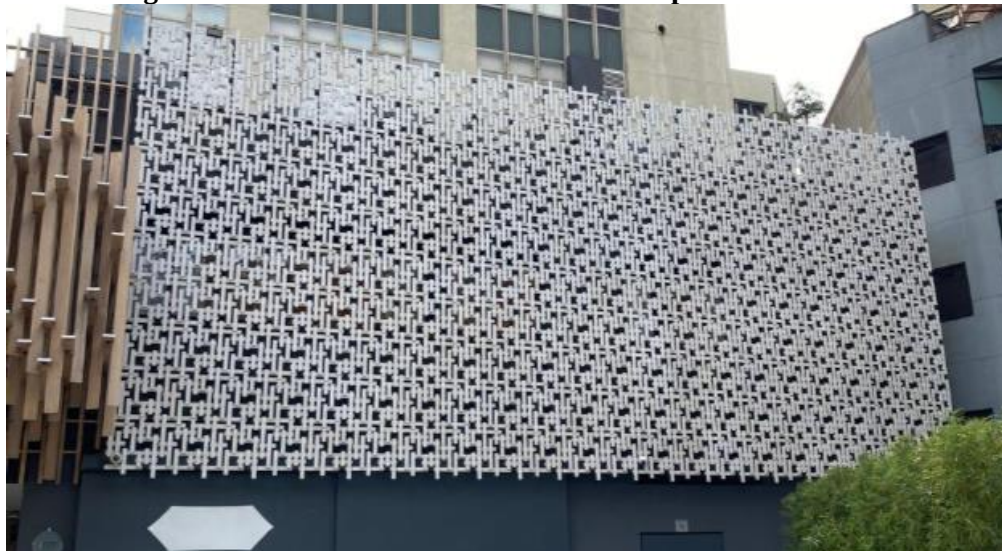
Figura 4 – Fachada em UHPC do Ministério das Relações Exteriores em São Paulo.



Fonte: Muller, Koelle e Almeida (2017)

Posteriormente, em 2017, foi inaugurada a Casa Japão na Avenida Paulista, em São Paulo. Projetada pelo arquiteto Kengo Kuma e pelo escritório FGMEF, a fachada (Figura 5) conta com um painel vazado de 116 m² composto por 220 placas de UHPC, medindo 70 cm x 80 cm e 2 cm de espessura. O UHPC branco sem pigmentos foi escolhido por sua durabilidade, estética refinada e capacidade de realizar o design delicado e rígido idealizado pelos arquitetos, antes possível apenas com aço cortado a laser (Muller; Koelle; Almeida, 2017).

Figura 5 – Fachada de UHPC na Casa do Japão em São Paulo.



Fonte: Autora (2024)

Em 2019, a empresa New House, localizada em São Paulo, utilizou UHPC na construção de casas pré-fabricadas (Figura 6). As residências foram projetadas com uma estrutura metálica interna e revestidas com painéis tipo sanduíche de UHPC, sem juntas, preenchidos com material termorrígido para aprimorar o isolamento térmico e acústico.

Figura 6 – Unidade habitacional confeccionada em painéis com UHPC.



Fonte: Muller, Koelle e Almeida (2017)

Diante do breve histórico de aplicações apresentado, é possível perceber que o UHPC no Brasil ainda é um material pouco consumido pela indústria. Apesar de suas inúmeras vantagens frente aos concretos convencionais, existe uma grande dificuldade em tornar essa opção viável economicamente para obras do cotidiano (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

Isso ocorre porque a dosagem do UHPC, normalmente, é realizada com altos consumos de cimento, da ordem de 1100 kg/m^3 . Entretanto, já existem métodos de dosagem que otimizam o uso de cimento de acordo com o empacotamento máximo entre as partículas, como o Método UNISINOS de dosagem de UHPC desenvolvido por Christ (2019).

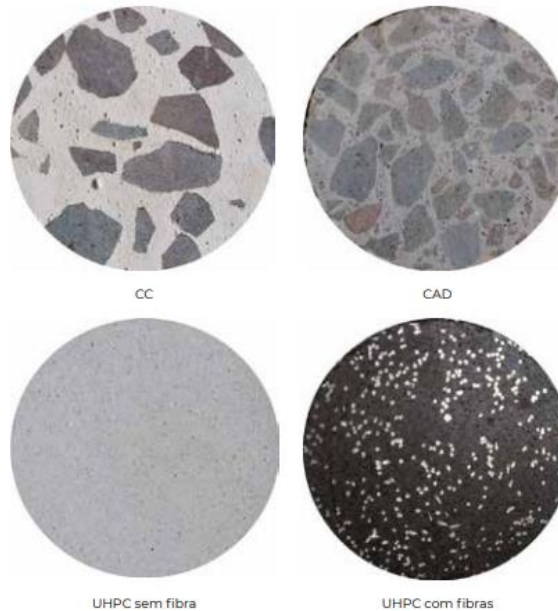
2.1.3 Composição e propriedades do UHPC

De acordo com Aitcin (2008), a formulação do UHPC tem como base o aumento da homogeneidade do material devido à eliminação de agregados graúdos, melhoria nas propriedades mecânicas da pasta de cimento hidratada e eliminação da zona de transição nas interfaces pasta/agregado graúdo.

A Figura 7 apresenta a matriz de um CC, de um CAD e de dois UHPC, um sem fibras e um com fibras, em que é possível notar a significativa diferença entre os esqueletos granulares das misturas. No CC e no CAD, é possível perceber a zona de transição na interface pasta/agregado. Essa região possui muitos poros e uma maior relação água/cimento, o que torna este o local mais frágil da amostra, onde geralmente ocorrem as rupturas do elemento. Na matriz do UHPC, a zona de transição é praticamente extinta devido a não utilização de agregados graúdos e a presença de materiais muito finos no compósito, deixando de ser fator limitante para a resistência do concreto.

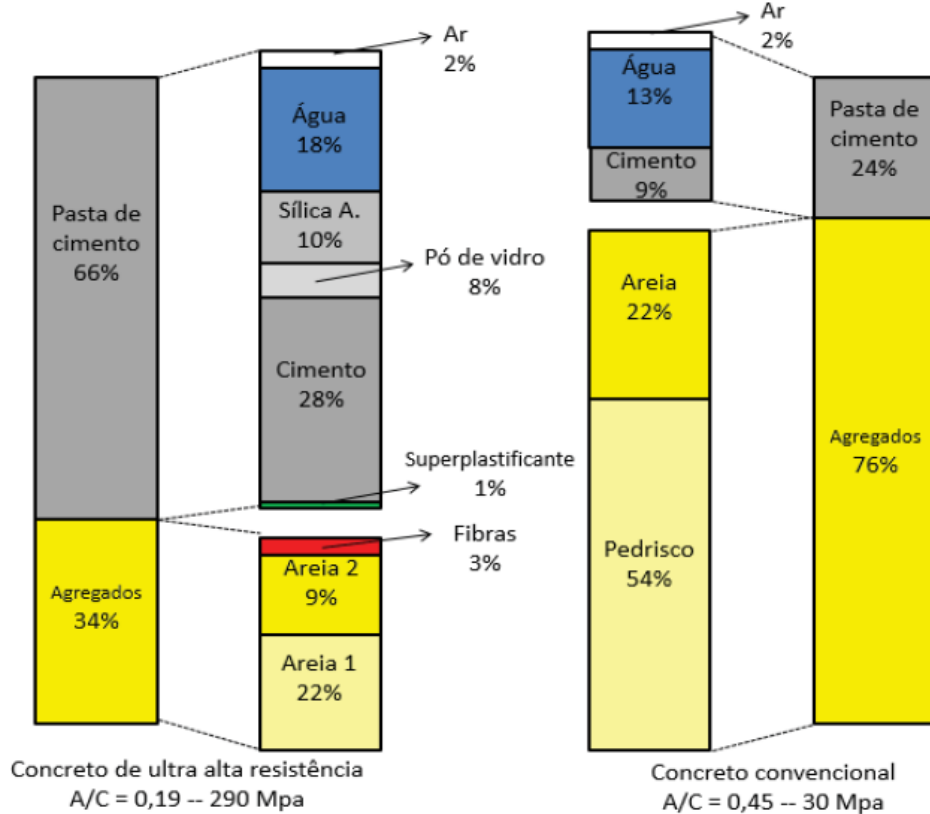
Ao comparar a composição do UHPC com o CC, nota-se uma grande diferença em relação às proporções de cada componente nas misturas, como ilustra a Figura 8.

Figura 7 – Matriz do concreto convencional (CC), concreto de alto desempenho (CAD) e UHPC sem fibras e com fibras



Fonte: Christ, Tutikian e Helene (2022)

Figura 8 – Comparação entre possíveis proporções dos constituintes de um UHPC e um CC



Fonte: Naaman e Wille (2012) *apud* Christ (2019)

Pela Figura 8, é possível perceber que o UHPC possui alto teor de aglomerante se comparado ao CC. Seu consumo de cimento varia entre 700 e 1100 kg/m³ (Torregrosa, 2013).

A alta demanda de cimento do UHPC não altera somente os custos de produção dos concretos, mas também afeta de forma negativa o meio ambiente devido às altas taxas de emissão de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas à fabricação do cimento, que contribuem para o agravamento do efeito estufa (Soliman; Tagnit-Hamou, 2016; Wille; Naaman; Parra-Montesinos, 2011).

Entretanto, algumas pesquisas mostram que há viabilidade em se produzir UHPC com consumos de cimento próximos de 300 kg/m³, por meio da otimização do empacotamento granular e utilizando materiais pozolânicos como materiais cimentícios suplementares (Yunsheng *et al.*, 2008; Christ, 2019).

Christ (2019), otimizando o empacotamento de partículas, utiliza diversos materiais pozolânicos e inertes, na produção do UHPC, capazes de reduzir significativamente o consumo de cimento devido ao efeito fíler e pozolânico que oferecem às misturas. Nos traços propostos pelo autor, percebe-se um consumo de cimento de 493,5 kg/m³ de concreto, valor relativamente baixo para a produção de UHPC que, mais comumente, é de 700 kg/m³, mas pode chegar até 1100 kg/m³, como mostrado nas pesquisas de Torregrosa (2013).

Figura 9 – Traço unitário das misturas desenvolvidas pelo método de dosagem proposto por Christ

Materiais	IDE 87		IDE 98		IDE 118		IDE 133	
	Unit.	Kg/m ³	Unit.	Kg/m ³	Unit.	Kg/m ³	Unit.	Kg/m ³
Cimento	1	493,5	1	493,5	1	493,5	1	493,5
Sílica	0,198	97,7	0,223	109,98	0,537	256,1	0,576	284,1
Cinza Volante	0,436	215,3	0,688	339,34	---	---	0,871	430,0
Pó de Quartzo	---	---	---	---	0,939	463,19	---	---
Carbonato de cálcio	0,683	337,2	0,726	358,38	---	---	---	---
Areia 1	2,444	1206,3	---	---	2,286	1128,2	2,315	1142,3
Areia 2	----	---	2,125	1048,8	---	---	---	---
Água/aglomerante (%)	0,23	185,5	0,25	276,53	0,26	230,6	0,23	241,5
Superplastificante (%)	3	24,20	3	18,86	3	22,76	3	36,23
Modificador de viscosidade (%)	1	16,13	1	24,23	1	15,17	1	24,15

Fonte: Christ (2019)

2.1.4 Utilização de pó de vidro no UHPC

Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), materiais pozolânicos são materiais silicosos ou solicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente moídos e na presença de água, reagem com a portlandita (hidróxido de cálcio Ca(OH)_2) à temperatura ambiente e formam compostos com propriedades ligantes e resistentes, como o silicato hidratado de cálcio (C-S-H).

O pó de vidro pode ser considerado como um material que possui potencial pozolânico (Pan *et al.*, 2017).

De acordo com Aitcin (2008), a utilização de materiais pozolânicos como substitutos parciais do cimento nos concretos, em geral, oferecem vantagens:

- Econômicas, ao diminuir o preço unitário do compósito;
- Ecológicas, ao agregar valor a determinados subprodutos industriais e diminuir a emissão de gases de efeito estufa;
- Socioeconômicas, por meio da implementação de uma política de desenvolvimento sustentável;
- Técnicas, ao modificar determinadas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

Como já mencionado, um dos maiores desafios é tornar o UHPC viável economicamente para ser utilizado, em maior escala, nas obras do Brasil (Tutikian; Isaia; Helene, 2011). Além disso, também existe a preocupação ecológica quanto a produção deste material, pois o UHPC pode apresentar altos consumos de cimento se comparado à concretos convencionais.

No Brasil, são emitidos cerca de 610 kg de gás carbônico para a produção de 1 (uma) tonelada de cimento. Estudos mostram que, no futuro, as indústrias cimenteiras serão responsáveis por cerca de 20% do total de CO_2 emitido na atmosfera. Hoje, estima-se que o setor já emita 5% do total de CO_2 (Escola politécnica, 2024).

Uma opção viável econômica e ecologicamente para a produção de UHPC, é realizar a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, que também exercem a função de aglomerante nas misturas. Entretanto, a escolha do material pozolânico deve ser baseada em diversos critérios. Quando se pensa em economia e desenvolvimento sustentável, uma das premissas fundamentais é que o material seja obtido na mesma região que o concreto será produzido (Alsalman *et al.*, 2020).

O pó de vidro é um exemplo de material com potencial pozzolânico e que pode ser produzido para comercialização em todas as regiões do Brasil, devido a vasta disponibilidade de vidros em aterros sanitários.

O pó de vidro pode ser obtido por meio da reciclagem, moagem e peneiramento dos vidros descartados. Além disso, durante o corte de peças vítreas em fábricas de vidro, um resíduo de pó de vidro e água é gerado. Esse resíduo, em consistência de lama, é descartado pelas fábricas e pode ser coletado para secagem, moagem e peneiramento.

Portanto, substituir parcialmente o cimento por pó de vidro pode ser mostrar de extrema relevância para o desenvolvimento sustentável e para a viabilidade econômica da fabricação do material, especialmente para misturas com alta consumo de cimento, como o UHPC.

O Quadro 1 mostra alguns resultados de estudos que utilizaram PDV em misturas de UHPC.

Quadro 1 – Resumo de contribuições de autores que utilizaram PDV no UHPC.

(continua)

Autor(es)	Tipo de concreto / Tipo de PDV / Tamanho das partículas	Percentual de substituição / material substituído	Resultados	
			Estado fresco	Estado endurecido
Zhao <i>et al.</i> (2024)	UHPC / Vidro reciclado moído / >75µm	30% / cimento	A mistura com PDV apresentou maior fluidez	Em 2 dias de cura, os CPs com PDV apresentaram resistência inferior à mistura referência sem PDV. A resistência em idades avançadas não foi verificada.
Wang <i>et al.</i> (2023)	UHPC / Vidro reciclado moído / d ₅₀ =316 nm (ultrafino)	0, 20, 40, 60 e 80% / sílica ativa	Como o PDV era mais fino do que a sílica ativa, quanto maior o teor de PDV menor o espalhamento	O UHPC com PDV ultrafino apresentou maior resistência à compressão do que o UHPC de referência em todas as idades de cura (3, 7 e 28 dias), indicando que o PDV ultrafino foi mais favorável para a resistência do UHPC do que a sílica ativa.
Soares <i>et al.</i> (2019)	UHPC / Vidro de garrafa da cor âmbar moído / >75µm	0, 10, 20, 30, 50% / cimento	Todos os espalhamentos apresentaram espalhamento semelhante	2 dias: resistência dos UHPC diminuiu com o aumento do teor de PDV. 7 dias: resistência dos UHPC semelhantes, exceto para a mistura com teor de 50% que apresentou resistência inferior. 28 dias: resistências semelhantes entre as misturas, exceto o UHPC com 20% de PDV que apresentou valor superior aos demais

(conclusão)

Autor(es)	Tipo de concreto / Tipo de PDV / Tamanho das partículas	Percentual de substituição / material substituído	Resultados	
			Estado fresco	Estado endurecido
Pan <i>et al.</i> (2017)	UHPC / Pó de vidro industrializado (provém da reciclagem) / >100µm	0, 5, 10 e 20% / cimento	Redução do espalhamento com o aumento de PDV na mistura. Redução brusca dos 10 para os 20%	Aos 3 dias, as resistências de todos os compostos com PDV apresentaram resistência inferior ao referência. Aos 7 dias, a mistura com 5% se assemelhou à resistência da mistura referência, enquanto as outras ainda eram inferiores. Aos 28, a mistura com 5% ultrapassou a resistência do referência, enquanto as outras se mantiveram inferiores.
Soliman e Tagnit-Hamou (2016)	UHPC / Vidro reciclado moído / >100µm	0, 10, 20, 30, 40, 50% / cimento	O maior teor de pó de vidro conferiu maior espalhamento à mistura de UHPC	Em 1 e 7 dias, quanto menor o teor de PDV, maior a resistência das misturas. Aos 28 dias as misturas apresentaram resistências semelhantes, exceto para as misturas com 40 e 50% de PDV que apresentaram resistências inferiores. Todas as misturas com PDV apresentaram evolução da resistência em idades avançadas. A substituição ótima de cimento por pó de vidro foi de 20%, que apresentou maior valor de resistência aos 56 e 91 dias.

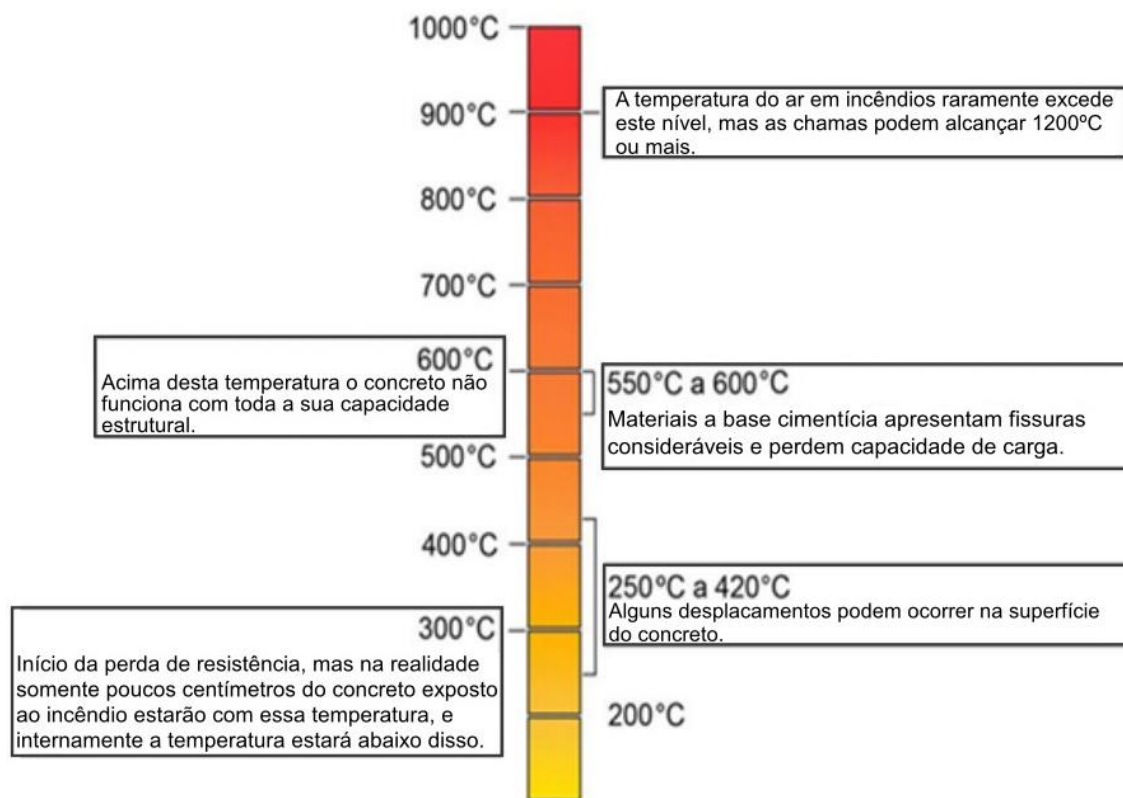
Fonte: Autora (2024)

2.2 UHPC SUBMETIDO A ELEVADAS TEMPERATURAS

O concreto, quando submetido a elevadas temperaturas, pode apresentar comportamento satisfatório, devido às suas características de incombustibilidade e baixa difusividade térmica. Entretanto, essa exposição também pode promover deteriorações no material, como redução de suas propriedades mecânicas, fissuras, deslocamentos e fluência transiente (Fernandes *et al.*, 2017).

A deterioração de estruturas de concreto em situações de incêndio pode ser atrelada a três fatores: alterações físico-químicas na pasta de cimento, nos agregados e a incompatibilidade térmica entre ambos (Fernandes *et al.*, 2017). De modo geral, o comportamento físico-químico que ocorre no concreto em situações de incêndio pode ser simplificado conforme a Figura 10.

Figura 10 – Processo físico-químico do concreto em situações de incêndio



Fonte: Adaptado e traduzido de Jacobs (2007) *apud* Britez, Carvalho e Helene (2020)

Especificamente na pasta de cimento hidratada, ocorrem algumas modificações físico-químicas no material dependendo da temperatura a que está submetida. De forma aproximada:

- Acima de 80°C: ocorre a decomposição da etringita (Hager, 2013; Ingham, 2009; Castellote, *et al.*, 2004);
- Acima de 100°C: ocorre a evaporação da água livre do compósito, das águas lamelares e adsorvidas e da água quimicamente combinada aos cristais de CSH (silicato de cálcio hidratado) (Hager, 2013; *fib* Bulletin 38, 2007; Bolina, 2016);
- Acima de 420°C: ocorre decomposição da portlandita – Ca(OH)_2 – em CaO e água; (Castellote *et al.*, 2004);
- Acima de 650°C: ocorre a descarbonatação do carbonato de cálcio – CaCO_3 – em CaO e CO_2 ; (*fib* Bulletin 38, 2007; Castellote *et al.*, 2004);
- Acima de 700°C: ocorre a decomposição do CSH; (Hager, 2013; *fib* Bulletin 38, 2007; Bolina, 2016; Castellote *et al.*, 2004);
- Acima de 1200°C: ocorre o derretimento da pasta de cimento Portland (Khoury, 2000).

Como visto na Figura 10, entre 250 e 420°C, é possível que os concretos apresentem lascamentos explosivos. Esse é efeito conhecido como efeito *spalling*.

2.2.1 Efeito *spalling*

Existe uma relação inversamente proporcional entre porosidade e resistência nos compósitos cimentícios (Mehta; Monteiro, 2008). O UHPC é um exemplo de concreto com baixíssima porosidade e elevada resistência. Esse aspecto é excelente do ponto de vista mecânico. Entretanto, pode se tornar um problema sob situações de incêndio.

De forma geral, pode-se considerar que, quanto menor a permeabilidade do concreto e maior a velocidade de elevação da temperatura, maior será o risco de ocorrência de lascamento explosivo ou efeito *spalling*.

Hertz (1992) *apud* Neville (2016) observou lascamentos explosivos em concretos com relação água/cimento de 0,26, ou seja, em compósitos densos, com baixa permeabilidade, a temperaturas acima e próximas de 300°C. Esse comportamento foi verificado pelo autor mesmo com a temperatura de 1°C/min ou 60°C/hora, que é uma ordem de grandeza muito menor do que nos casos reais de incêndio.

Outra observação relacionada à ocorrência do efeito *spalling* é que a redução de resistência em temperaturas elevadas é maior em concretos saturados do que em concretos secos. Segundo estudos, a umidade excessiva do material no momento de aplicação do fogo é a principal causa do lascamento (Neville, 2016).

Quando o concreto é submetido à elevadas temperaturas e atinge o ponto de ebulição da água (100°C à pressão atmosférica ao nível do mar), inicia-se o processo de desidratação do compósito. Como o UHPC possui uma estrutura muito densa, a evaporação da água contida no material é dificultada, gerando pressões internas no elemento para expulsar a água evaporada. Essa pressão interna aliada aos gradientes térmicos que surgem entre superfície-núcleo do material, devido à baixa condutividade térmica dos concretos, pode provocar deslocamentos explosivos do material em situações de incêndio (Duarte, 2023).

Essa teoria desconsidera a resistência à tração dos concretos, como ocorre atualmente nos cálculos estruturais. Entretanto, em concretos de alto e ultra alto desempenho, essas resistências podem chegar a mais de 8 MPa, capazes de absorver tensões de tração que surgem nos concretos, tanto pelas retrações no estado fresco, por exemplo, quanto por pressões exercidas para expulsão do vapor de água sob altas temperaturas, no estado endurecido (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

Além disso, muitas pesquisas que estudam o efeito *spalling* utilizam corpos de prova de laboratório, de pequenas dimensões, em idades prematuras de hidratação, e deixam de considerar fatores como dimensões reais da estrutura, presença de armaduras de aço e ação de carregamentos simultâneos à exposição ao fogo (Britez, 2011).

Britez (2011) cita que os problemas de redução de resistência, deformações térmicas excessivas e ocorrência de deslocamentos explosivos nos concretos submetidos à situações de incêndio, podem ser correlacionados:

- com o fluxo de calor, que depende da taxa de aquecimento e da duração da alta temperatura; e
- com a distribuição de temperatura no interior do elemento, que depende do tipo do cimento, agregados e adições, da geometria, da massa específica, do teor de umidade, da idade de hidratação, da relação água/cimento e da porosidade do material.

Assim, pode-se perceber que diversos fatores podem influenciar no comportamento do UHPC sob elevadas temperaturas, principalmente quando outros materiais são incluídos no compósito para melhorar alguma característica do material, como os materiais pozolânicos, por exemplo.

Devido a isso, para cada novo traço proposto de UHPC, novas pesquisas devem ser realizadas a fim de entender seu comportamento sob situações reais de uso, como diante de situações de incêndio.

2.2.2 Efeito do PDV no UHPC sob altas temperaturas

Estudos recentes apontam que o PDV pode reduzir a degradação da matriz cimentícia sob altas temperaturas. (Zheng, 2016; Higuchi *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2022; Kameche; Djelil; Dahmani, 2023; Matos; Oliveira; Pimentel, 2024).

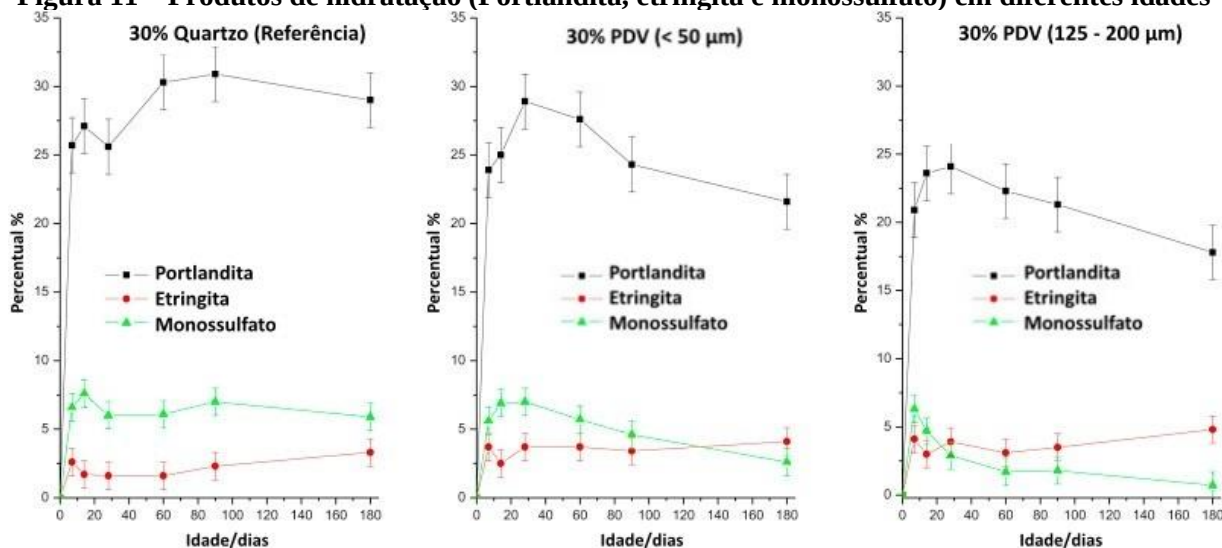
Na matriz do concreto, as pozalanas reagem lentamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 ou CH) e com a água disponível, formando compostos resistentes de C-S-H em idades avançadas (SOARES, 2021). Portanto, devido à reação pozolânica, os concretos com esses materiais apresentam menor quantidade de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e mais C-S-H na mistura.

O Ca(OH)_2 , conhecido como portlandita, é um produto menos estável na pasta endurecida pois, quando submetido à altas temperaturas, dissocia-se a cerca de 400°C , gerando a cal livre (CaO). Por outro lado, o C-S-H dissocia-se apenas a 720°C (Klingsch, 2014; Hertz, 2005). Isso sugere que o pó de vidro beneficia os concretos sob altas temperaturas, inclusive os

concretos de ultra alto desempenho que possuem elevado consumo de cimento e, consequentemente, significativa proporção de portlandita no compósito.

A Figura 11 mostra as quantidades de portlandita, etringita e monossulfato nos concretos em diferentes idades, verificadas no estudo de Zheng (2016). O autor comparou a mistura referência com substituição de 30% do cimento por pó de quartzo (material inerte) com as misturas com substituição de 30% de cimento por pó de vidro grosso e por pó de vidro fino, respectivamente. Como já esperado, o teor de portlandita nos compostos com pó de vidro diminuiu significativamente comparando com a mistura referência nas mesmas idades de hidratação.

Figura 11 – Produtos de hidratação (Portlandita, etringita e monossulfato) em diferentes idades



Fonte: Adaptado e traduzido de Zheng (2016)

Pan *et al.* (2017) verificaram que em temperaturas até 500°C, o concreto com PDV apresentou menor perda de resistência mecânica do que o concreto sem PDV. Por outro lado, constataram que em temperaturas entre 500°C e 800°C, o concreto com PDV teve maior perda de resistência do que o concreto sem PDV.

Bayraktar (2021) investigou as propriedades mecânicas residuais de compostos cimentícios com PDV após submissão à elevadas temperaturas. Como resultado, destaca-se que a resistência residual à flexão do concreto com PDV foi maior do que do concreto referência e seus resultados aumentaram proporcionalmente com o aumento da porcentagem de utilização de PDV na mistura. O autor destaca que esse aumento da resistência residual à flexão em compostos com PDV diminui os possíveis lascamentos explosivos do concreto em situações de incêndio, aumentando a durabilidade e segurança das estruturas.

Ling *et al.* (2012) analisaram que a incorporação de PDV no concreto poderia auxiliar o compósito a manter sua integridade resistente após exposição a altas temperaturas, devido ao derretimento e à ressolidificação do PDV na matriz do concreto.

Jiang *et al.* (2022), verificaram que a resistência à compressão residual dos concretos com PDV, após a exposição a 800°C, foram superiores à resistência do concreto referência. Por outro lado, constatou que após a exposição a 1000°C, as resistências aumentaram significativamente e decaíram bruscamente após 1200°C. O autor defende a teoria de que o aumento da resistência dos compostos com PDV à 1000°C se deu devido ao derretimento do resíduo, preenchimento dos vazios e ressolidificação, o que provocou maior densidade à matriz do concreto.

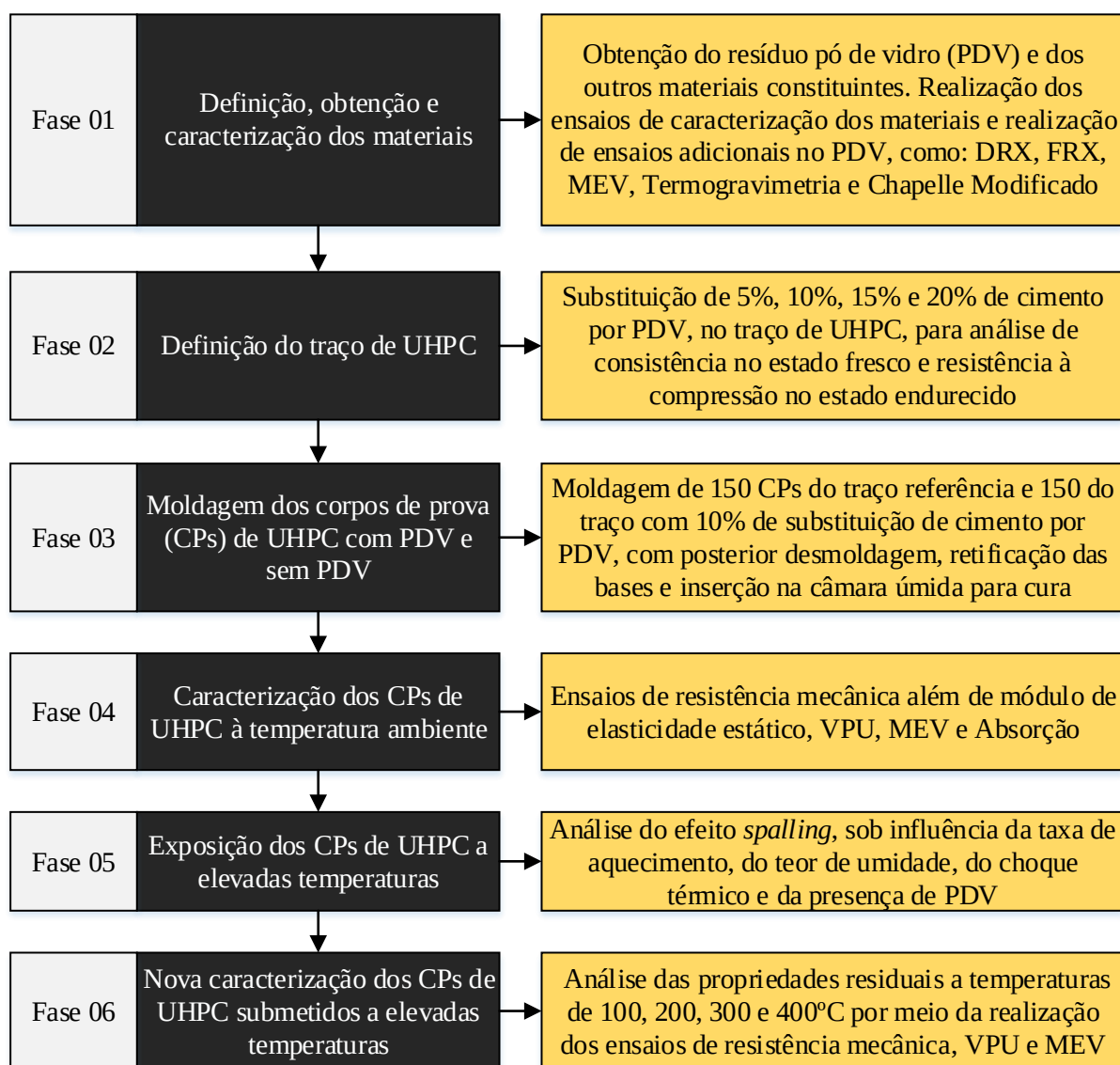
Além dos diversos fatores que influenciam nas propriedades residuais e na ocorrência do efeito *spalling* no UHPC após a exposição a elevadas temperaturas, a incorporação de pó de vidro na mistura torna o comportamento ainda mais complexo. Entretanto, diante dos estudos mencionados, é inegável o potencial latente que esse resíduo possui para ser aplicado como material cimentício suplementar nos concretos, o que justifica a viabilidade de pesquisas acerca sobre o tema.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta seção, serão abordados os materiais e métodos empregados neste estudo, objetivando a reprodutibilidade do programa experimental, bem como o avanço do conhecimento no tema proposto.

A Figura 12 ilustra os procedimentos realizados neste programa experimental.

Figura 12 – Esquematização do programa experimental



Fonte: Autora (2024)

A fase 01 consistiu na obtenção do PDV na empresa vidraceira, com posterior secagem, moagem e peneiramento do resíduo. Além disso, nessa fase, os materiais utilizados nos concretos passaram pelo ensaio de granulometria a laser e o pó de vidro foi submetido a ensaios adicionais, como DRX (Difração de Raios-X), FRX (Fluorescência de Raios-X), MEV

(Microscopia Eletrônica de Varredura), Termogravimetria e índice de atividade pozolânica pelo método Chapelle Modificado.

Na fase 02, no traço referência de UHPC, foram reproduzidos traços com as substituições de 5, 10, 15 e 20% de cimento por pó de vidro. Em todas as misturas produzidas, foram analisadas a consistência no estado fresco e a resistência à compressão no estado endurecido. Assim, definiu-se que o traço de UHPC com 10% de substituição de cimento por pó de vidro seria reproduzido para as próximas etapas da pesquisa, devido a melhor combinação de resultados verificados no estado fresco e endurecido.

Na fase 03, 150 corpos de prova de UHPC sem PDV e 150 corpos de prova com PDV foram moldados e curados em câmara úmida até as idades de ensaio. Todos os CPs tiveram suas bases retificadas para garantir planicidade e suas dimensões foram medidas para controle geométrico.

Na fase 04, a fim de caracterizar os compósitos em temperatura ambiente, para os dois traços de UHPC (com e sem pó de vidro), 12 CPs foram ensaiados quanto à resistência à compressão e 12 quanto à resistência à compressão diametral, aos 28 e 70 dias de idade. Aos 28 dias, três CPs de cada traço foram submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade estático. Aos 70 dias, em três CPs de cada traço foi realizado o ensaio de absorção de água. No mínimo cinco CPs, dos dois traços de UHPC, passaram por ensaios não destrutivos de VPU (Velocidade de pulso-ultrassônico). Fragmentos de corpos de prova dos dois traços, na idade de 28 dias, foram analisados na Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV). Fragmentos dos corpos de prova do traço com pó de vidro foram analisados também aos 70 dias.

Na fase 05, foram realizados os ensaios para verificação da ocorrência de spalling nos traços de UHPC, com e sem PDV, sob a influência de diferentes taxas de aquecimento (1, 5, 15°C/min), do teor de umidade (secos e saturados) e do choque térmico. Além disso, os concretos foram submetidos a temperaturas de 100, 200, 300 e 400°C, por no mínimo 60 minutos constantes, a fim de verificar suas propriedades residuais pós-forno.

Na fase 06, após a exposição dos CPs às temperaturas citadas, os CPs íntegros foram submetidos aos ensaios de compressão axial, compressão diametral, VPU e MEV.

3.1 MATERIAIS

Neste item, foram descritos e caracterizados os materiais empregados nesta pesquisa.

3.1.1 Cimento

Para a escolha do cimento, buscou-se o tipo mais puro disponível comercialmente. Portanto, utilizou-se o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI) da Marca CAUE.

As exigências físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland utilizado, foram fornecidas pelo fabricante e apresentadas no Quadro 2, em conformidade com as exigências da NBR 16697 (ABNT, 2018).

Quadro 2 - Propriedades físico-químicas do cimento Portland

Exigências				Limites da norma
Químicas	Teores	Perda ao fogo	5,30%	≤ 6,50%
		MgO	3,80%	≤ 6,50%
		SO ₃	2,90%	≤ 4,50%
		Resíduo Insolúvel	-	-
Físicas e Mecânicas	Finura	#200	0,10%	≤ 6,00%
		#325	0,80%	-
	Área Superficial <i>Blaine</i>		4649 cm ² /g	-
	Tempo de pega	Início	222 min	≥ 60 min
		Fim	271 min	≤ 600 min
	Resistência à compressão	1 dia	21,7 MPa	≥ 14,0 MPa
		3 dias	35,7 MPa	≥ 24,0 MPa
		7 dias	40,7 MPa	≥ 34,0 MPa
		28 dias	45,7 MPa	-

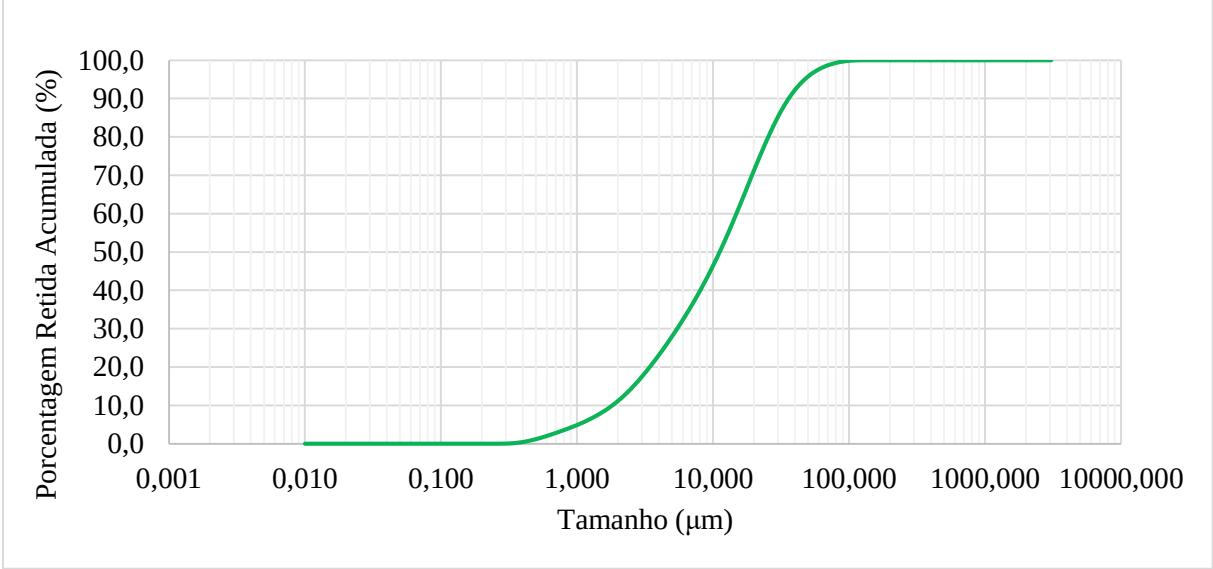
Fonte: Fabricante (2023)

Por meio do ensaio de granulometria a laser, realizado no Laboratório de Sedimentologia, Pedologia e Palinologia da Universidade Estadual de Maringá, obteve-se a curva granulométrica do cimento Portland utilizado nesta pesquisa, como pode ser verificado no Gráfico 1.

Obteve-se também o diâmetro médio das partículas (D50), assim como os diâmetros D03, D10, D90 e D97 em que 3%, 10%, 90% e 97% das partículas, respectivamente, são menores do que o valor obtido. Os valores para os diâmetros citados constam na Tabela 1.

Por meio do ensaio de Difração de Raios-X (DRX), realizado na Central de Análises Avançadas de Materiais (CAM-COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), foi possível obter o difratograma do cimento Portland, apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 1 – Distribuição Granulométrica do Cimento Portland



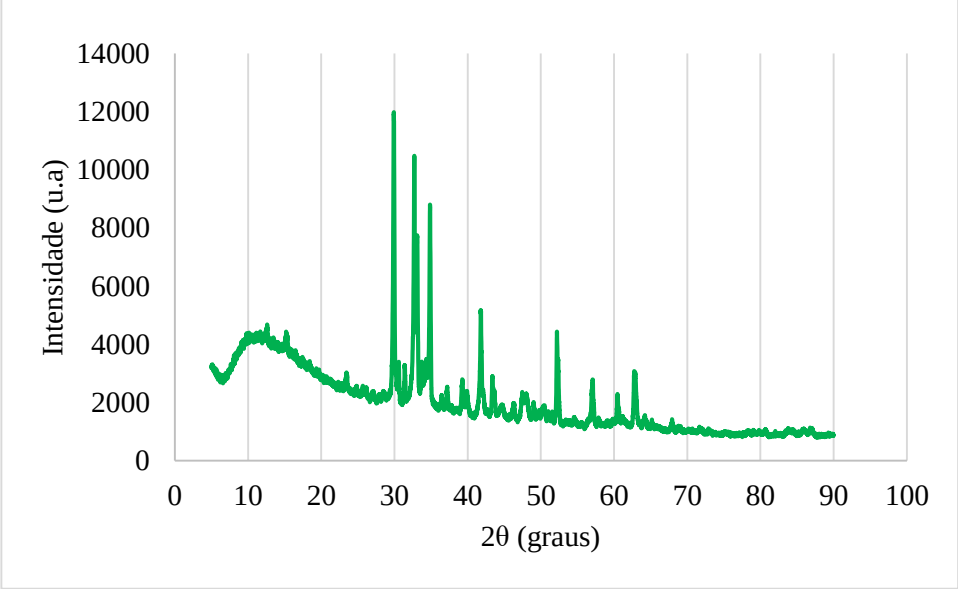
Fonte: Autora (2024)

Tabela 1 – Diâmetros do cimento obtidos no ensaio de granulometria a laser

Material	D03	D10	D50	D90	D97
Cimento Portland	0,827 μm	2,079 μm	12,79 μm	41,26 μm	63,81 μm

Fonte: Autora (2024)

Gráfico 2 – Difratoograma do Cimento Portland



Fonte: Autora (2024)

3.1.2 Água

Toda a água potável utilizada nesta pesquisa foi proveniente da rede de abastecimento de água da cidade de Maringá, coletada no laboratório da UEM, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR.

3.1.3 Aditivo

Nesta pesquisa, utilizou-se um aditivo superplastificante à base de policarboxilato, cujas especificações foram fornecidas pelo fabricante e apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Especificações do aditivo superplastificante

Identificação	ADVA 458
Base química	Éter policarboxilato
Aspecto	Líquido
Cor	Alaranjada
Ph	4 – 6
Densidade	1,075 – 1,115 g/cm ³
Sólidos	45,13 – 49,88 %

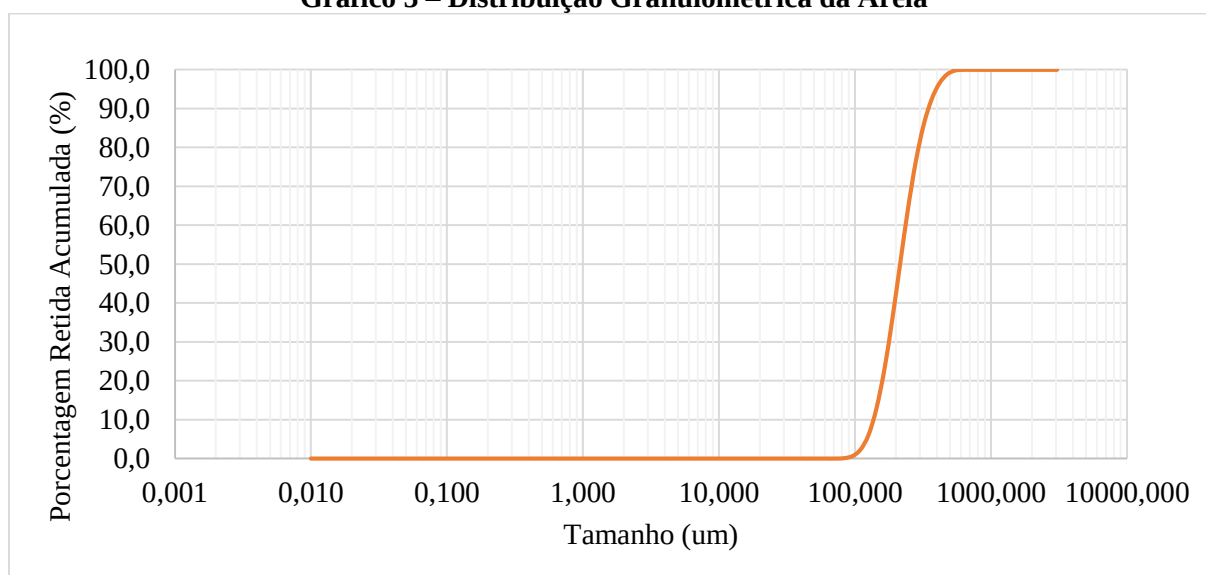
Fonte: Fabricante (2024)

3.1.4 Areia

Utilizou-se areia quartzosa, classificada como muito fina.

Por meio do ensaio de granulometria a laser, realizado no Laboratório de Sedimentologia, Pedologia e Palinologia da Universidade Estadual de Maringá, obteve-se a curva granulométrica da areia utilizada nesta pesquisa, como pode ser verificado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Distribuição Granulométrica da Areia



Fonte: Autora (2024)

Obteve-se também o diâmetro médio das partículas (D50), assim como os diâmetros D03, D10, D90 e D97 em que 3%, 10%, 90% e 97% das partículas, respectivamente, são menores do que o valor obtido. Os valores para os diâmetros citados constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Diâmetros da areia obtidos no ensaio de granulometria a laser

Material	D03	D10	D50	D90	D97
Areia	129,26 µm	156,13 µm	245,13 µm	397,06 µm	489,80 µm

Fonte: Autora (2024)

A análise química da areia foi fornecida pela fabricante e apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise química da areia

%SiO ₂	pH	% Perda ao fogo
99,500	6,500	0,060

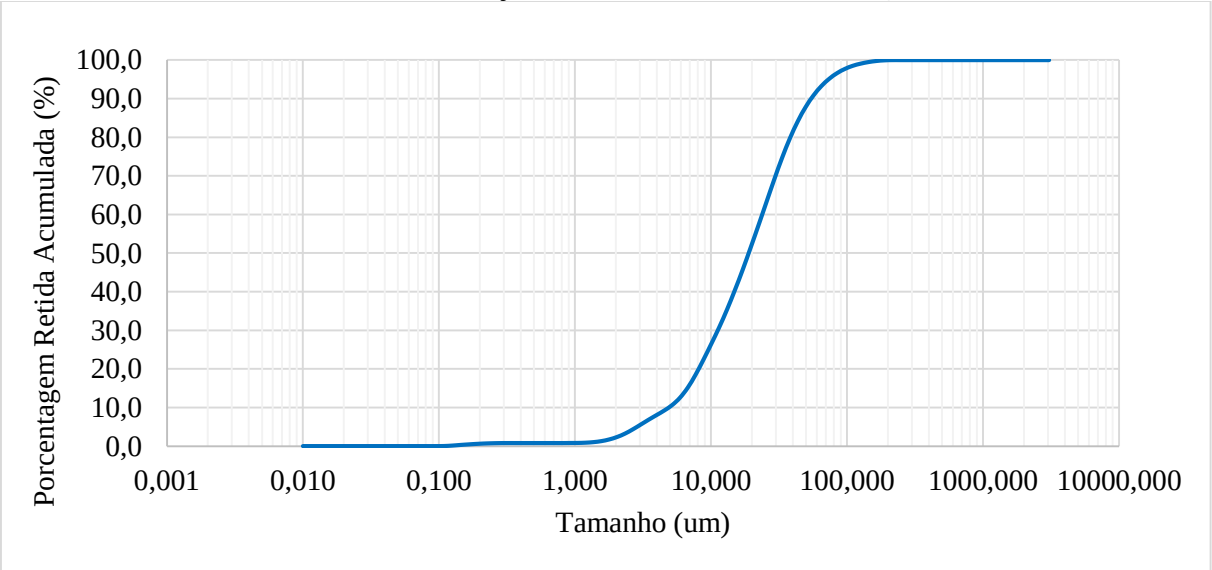
Fonte: Fabricante (2023)

3.1.5 Pó de quartzo (PDQ)

O pó de quartzo utilizado nesta pesquisa é comercializado com o nome Sílica Moída #325 – E35.

Por meio do ensaio de granulometria a laser, realizado no Laboratório de Sedimentologia, Pedologia e Palinologia da Universidade Estadual de Maringá, obteve-se a curva granulométrica do Pó de Quartzo utilizada nesta pesquisa, como pode ser verificado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Distribuição Granulométrica do Pó de Quartzo



Fonte: Autora (2024)

Obteve-se também o diâmetro médio das partículas (D50), assim como os diâmetros D03, D10, D90 e D97 em que 3%, 10%, 90% e 97% das partículas, respectivamente, são menores do que o valor obtido. Os valores para os diâmetros citados constam na Tabela 4.

Tabela 4 – Diâmetros do Pó de Quartzo obtidos no ensaio de granulometria a laser					
Material	D03	D10	D50	D90	D97
Pó de Quartzo	2,574 µm	5,607 µm	21,633 µm	61,973 µm	100,253 µm

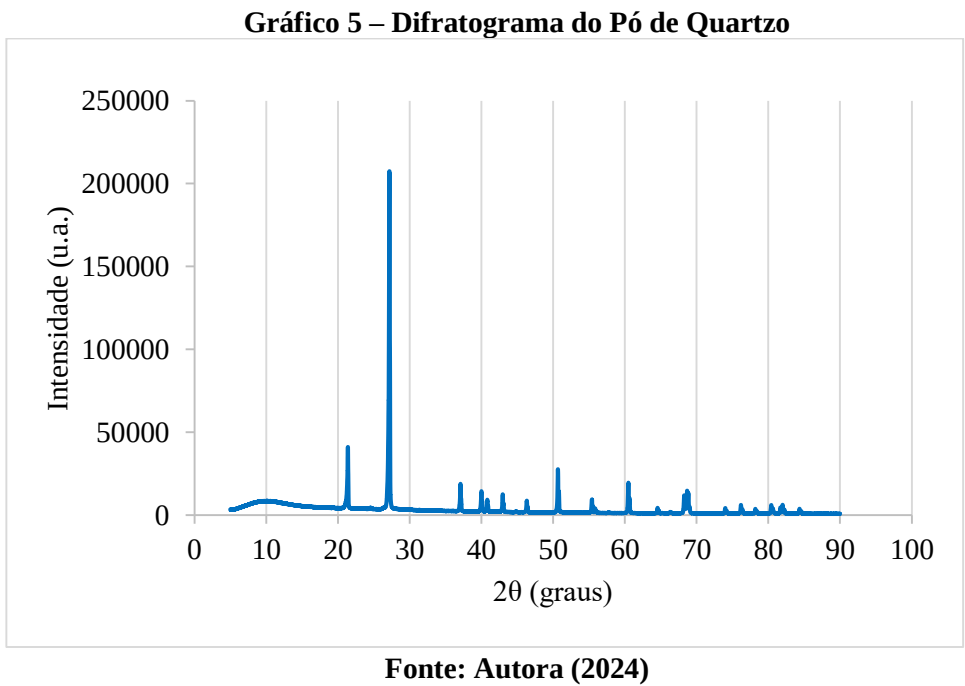
Fonte: Autora (2024)

A análise química do Pó de Quartzo foi fornecida pela fabricante e apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Análise química do Pó de Quartzo				
%Fe ₂ O ₃	%Al ₂ O ₃	%TiO ₂	%SiO ₂	% Perda ao fogo
0,045	0,230	0,028	99,680	0,110

Fonte: Fabricante (2023)

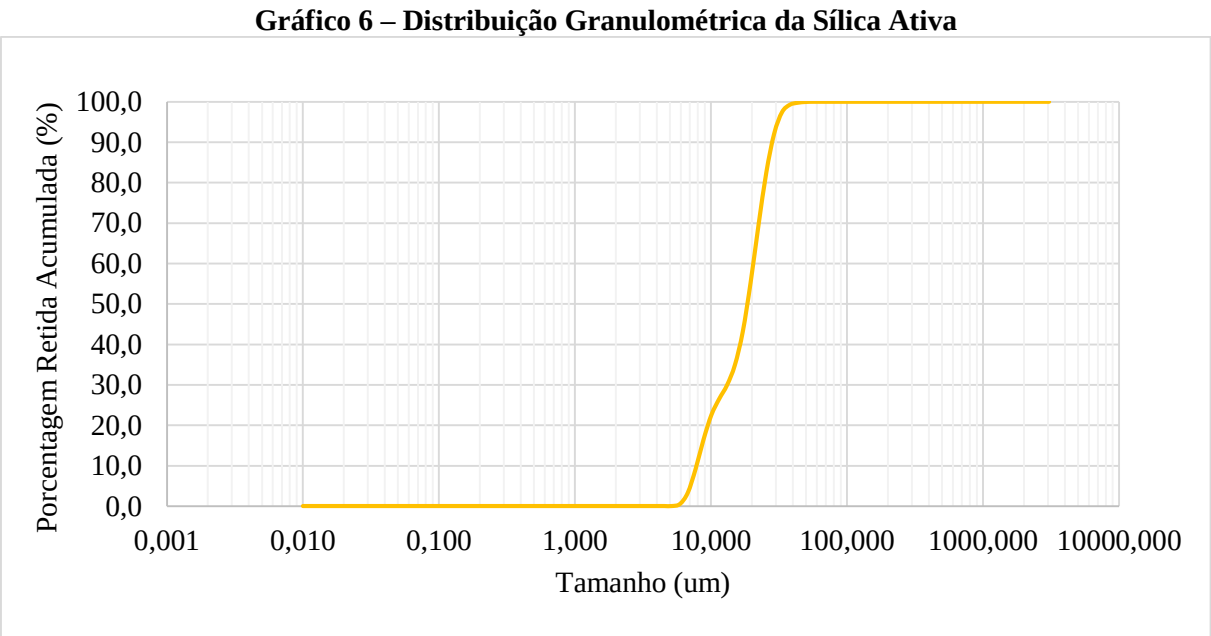
Por meio do ensaio de Difração de Raios-X (DRX), realizado na Central de Análises Avançadas de Materiais (CAM-COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), foi possível obter o difratograma do pó de quartzo, apresentado no Gráfico 5.



3.1.6 Sílica ativa (SA)

A sílica ativa utilizada nesta pesquisa é do tipo não densificada.

Por meio do ensaio de granulometria a laser, realizado no Laboratório de Sedimentologia, Pedologia e Palinologia da Universidade Estadual de Maringá, obteve-se a curva granulométrica da Sílica Ativa utilizada nesta pesquisa, como pode ser verificado no Gráfico 6.



Fonte: Autora (2024)

Obteve-se também o diâmetro médio das partículas (D50), assim como os diâmetros D03, D10, D90 e D97 em que 3%, 10%, 90% e 97% das partículas, respectivamente, são menores do que o valor obtido. Os valores para os diâmetros citados constam na Tabela 6.

Tabela 6 – Diâmetros da Sílica Ativa obtidos no ensaio de granulometria a laser					
Material	D03	D10	D50	D90	D97
Sílica Ativa	7,641 µm	8,952 µm	21,223 µm	32,283 µm	37,993 µm

Fonte: Autora (2024)

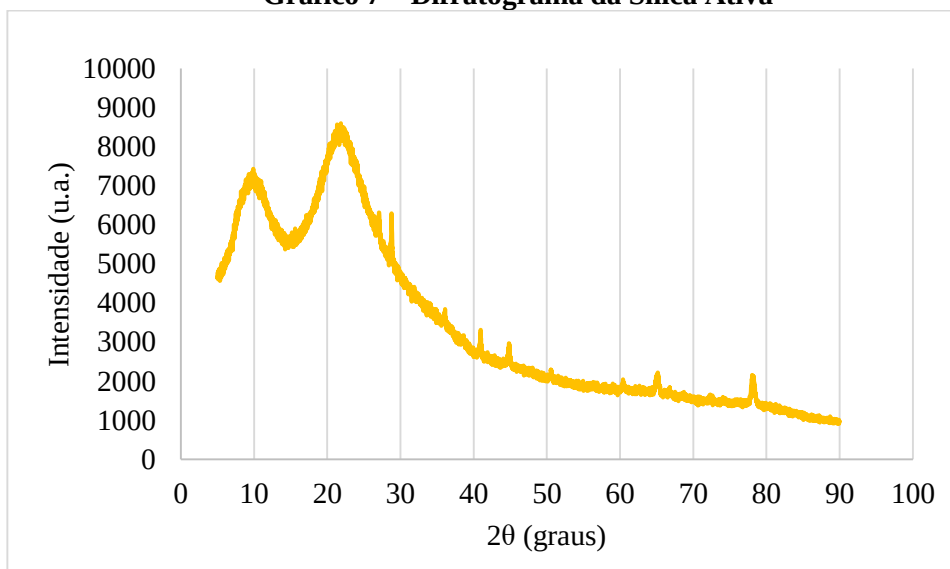
A análise química da Sílica Ativa foi fornecida pela mineradora e apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise química da Sílica Ativa							
%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%SrO	%K ₂ O	%Na ₂ O	% Perda ao fogo
94,100	<0,200	<0,500	<0,200	<0,200	1,660	0,610	3,600

Fonte: Fabricante (2024)

Por meio do ensaio de Difração de Raios-X (DRX), realizado na Central de Análises Avançadas de Materiais (CAM-COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), foi possível obter o difratograma da sílica ativa, apresentado no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Difratograma da Sílica Ativa



Fonte: Autora (2024)

3.1.7 Pó de vidro (PDV)

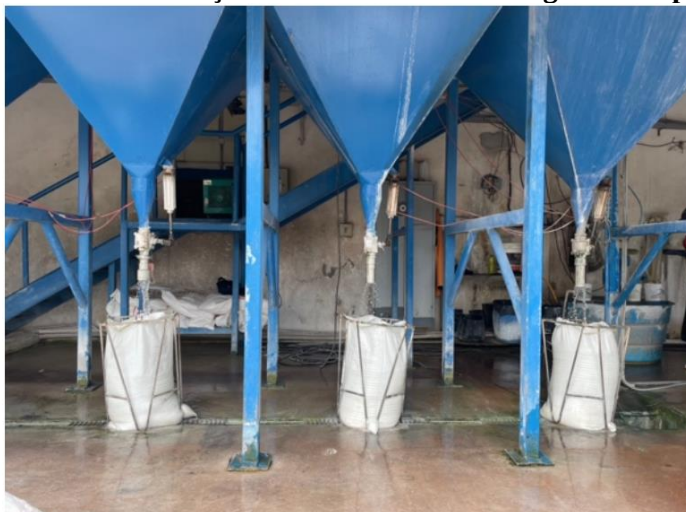
O pó de vidro (PDV) - resíduo utilizado neste estudo – foi fornecido por uma empresa industrial, situada na cidade de Apucarana-PR, e provém da laminação (corte) do vidro, uma das etapas para a determinação das dimensões das placas vítreas antes da têmpera.

O subproduto da laminação do vidro é uma mistura constituída por pó de vidro e água. Essa mistura passa por um processo de decantação em funis na fábrica antes de ser ensacado e destinado ao aterro sanitário.

Após a decantação (Figura 13), o resíduo em lama foi coletado na empresa, levado ao laboratório P02 da Universidade Estadual de Maringá (UEM) e espalhado em bandejas para secagem.

As bandejas foram cobertas com lonas para proteger o material de possíveis contaminações. Após uma semana, aproximadamente, a lama estava seca e foi quebrada manualmente em blocos, como mostra a Figura 14.

Figura 13 – Decantação da mistura de PDV e água na empresa



Fonte: Rotta (2022)

Figura 14 – Blocos de lama seca do resíduo de vidro



Fonte: Autora (2024)

Assim, os blocos de resíduo foram inseridos em um moinho de barras para que todos os aglomerados de pó se desfizessem.

Primeiramente, cada porção de 5 kg de resíduo, aproximadamente, foi submetido ao processo de moagem por 10 minutos, etapa em que os blocos de resíduos ficaram menores, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Blocos menores de resíduo após 10 minutos de moagem.



Fonte: Autora (2024)

Com mais 20 minutos de moagem (30 minutos no total) foi possível obter o pó de vidro, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Pó de vidro após 30 minutos de moagem.



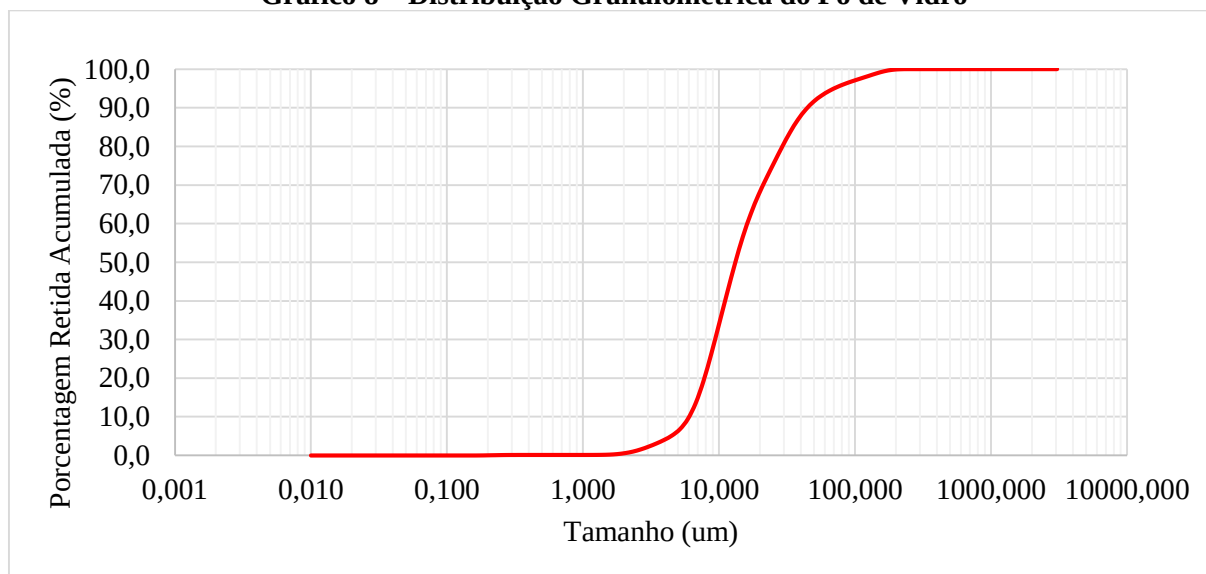
Fonte: Autora (2024)

Após a moagem, todo o pó de vidro passou pela fase de peneiramento manual na peneira de inox nº 50, com abertura de 300 μ m (0,300 mm). O resíduo retido na peneira nº 50 não foi utilizado.

No laboratório, seguindo as recomendações da NBR 6458 (ABNT, 2016), verificou-se que a massa específica do PDV é igual a 2,57 g/cm³.

Por meio do ensaio de granulometria a laser, realizado no Laboratório de Sedimentologia, Pedologia e Palinologia da Universidade Estadual de Maringá, obteve-se a curva granulométrica do Pó de Vidro utilizado nesta pesquisa, como pode ser verificado no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Distribuição Granulométrica do Pó de Vidro



Fonte: Autora (2024)

Obteve-se também o diâmetro médio das partículas (D50), assim como os diâmetros D03, D10, D90 e D97 em que 3%, 10%, 90% e 97% das partículas, respectivamente, são menores do que o valor obtido. Os valores para os diâmetros citados constam na Tabela 8.

Tabela 8 – Diâmetros do Pó de Vidro obtidos no ensaio de granulometria a laser

Material	D03	D10	D50	D90	D97
Pó de Vidro	3,893 µm	6,183 µm	15,563 µm	61,337 µm	115,700 µm

Fonte: Autora (2024)

A análise química do Pó de Vidro foi obtido no laboratório multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *Campus* Londrina (LabMult-LD) e apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Análise química do Pó de Vidro

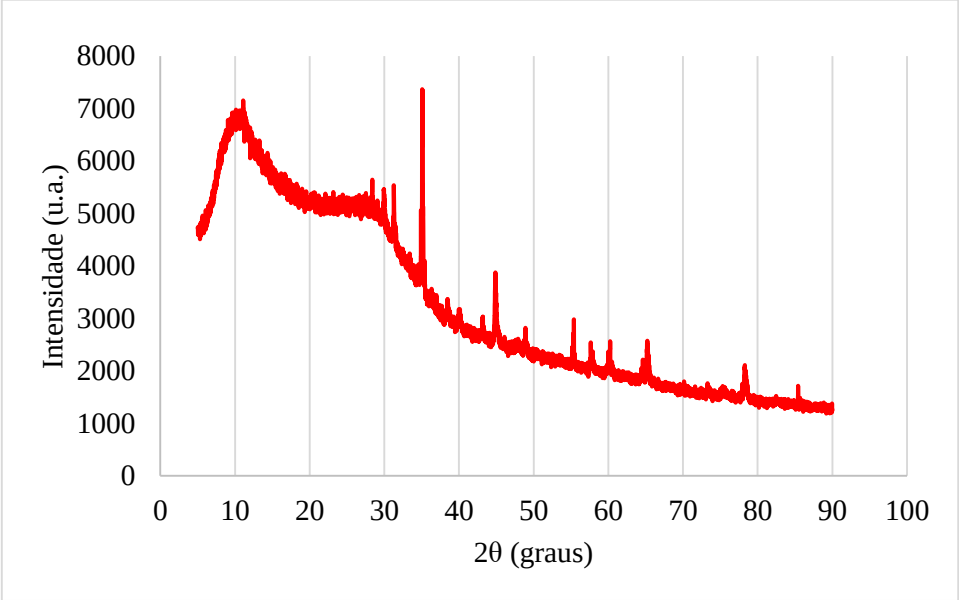
%SiO ₂	%CaO	%Fe ₂ O ₃	%Al ₂ O ₃	%K ₂ O	%SO ₃	%TiO ₂	%MnO	%Cl	%CuO	%SrO
74,489	15,136	5,655	2,050	0,745	0,364	0,227	0,087	0,058	0,048	0,042

%ZnO	%Eu ₂ O ₃	%V ₂ O ₅	%SnO ₂	%Cr ₂ O ₃	%Rb ₂ O	% Yb ₂ O ₃	% Y ₂ O ₃	%NiO	%OsO ₄
0,020	0,025	0,012	0,010	0,003	0,003	0,003	0,002	0,001	0,000

Fonte: Autora (2024)

Por meio do ensaio de Difração de Raios-X (DRX), realizado na Central de Análises Avançadas de Materiais (CAM-COMCAP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), foi possível obter o difratograma do PDV, apresentado no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Difratograma do Pó de Vidro (PDV).

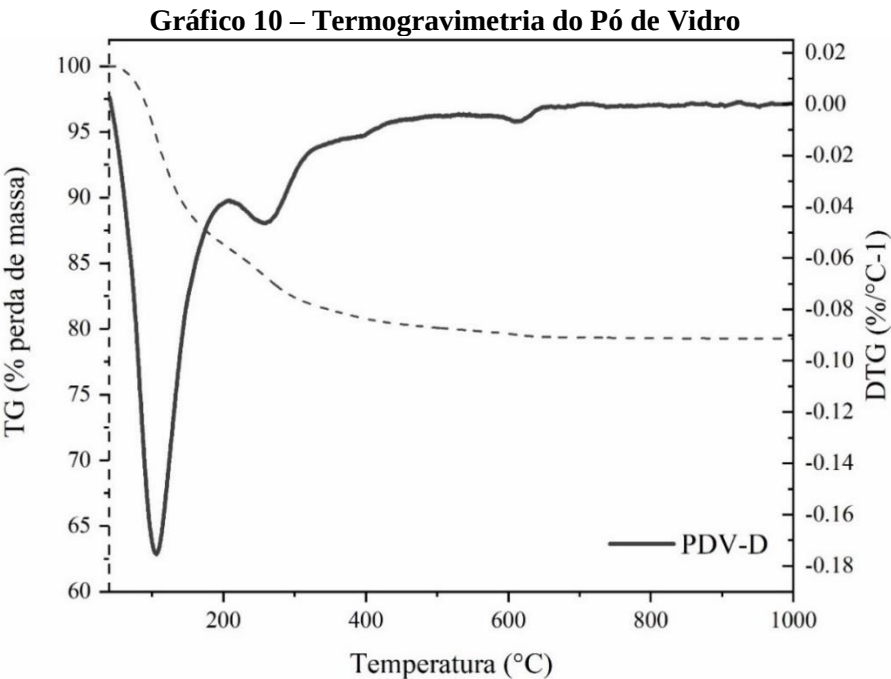


Fonte: Autora (2024)

O ensaio de análise termogravimétrica e o Chapelle Modificado do PDV foram realizados no Laboratório de Inovação em Cimentos Ecoeficientes (LINCE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O teor de hidróxido de cálcio fixado, para determinação do índice de atividade pozolânica do PDV pelo método Chapelle Modificado foi de 249,05 mg de Ca(OH)₂/g de material.

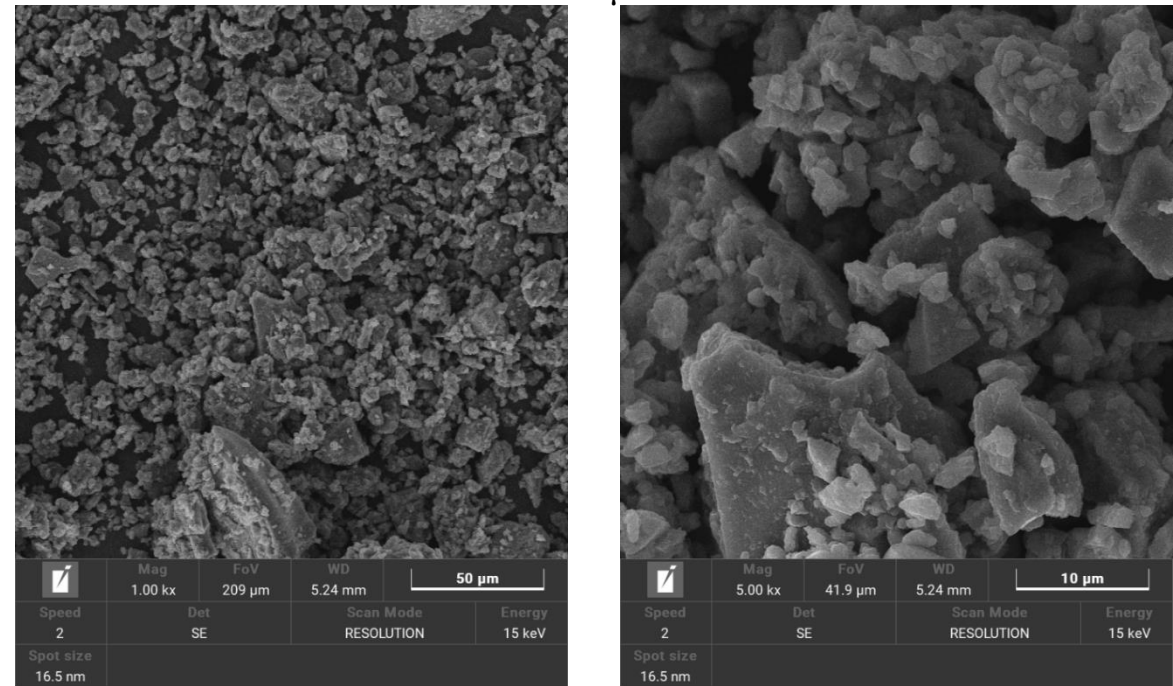
A termogravimetria do PDV encontra-se apresentada no Gráfico 10.



Fonte: Laboratório LINCE (2024)

Por meio da Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV), realizada no laboratório multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *Campus* Londrina (LabMult-LD), foi possível visualizar o pó de vidro em ampliações de 50, 10, 5 e 2 μm , como mostram as figuras a seguir. Foi possível perceber que o formato dos grãos de pó de vidro é irregular, com laterais fragmentadas e angulares.

Figura 17 – Microscopia Eletrônica por Varredura do pó de vidro. Ampliações de 50, 10, 5 e 2 μm .



Fonte: Autora (2024)

3.2 MISTURA E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE UHPC

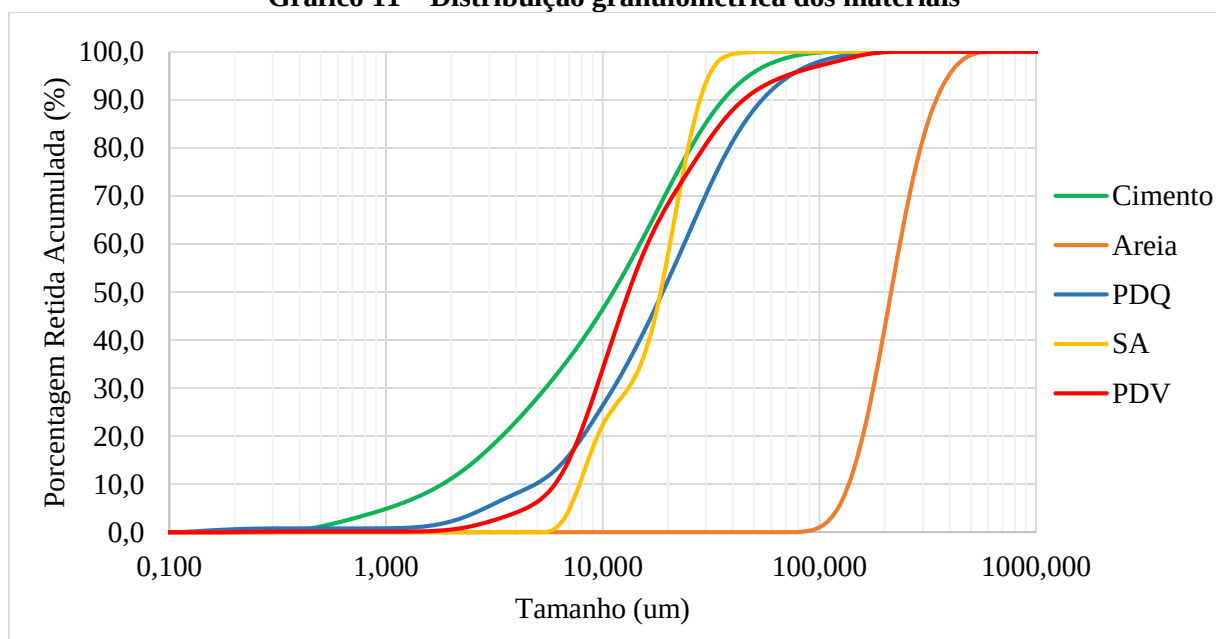
O traço de UHPC escolhido como referência para este estudo foi desenvolvido por Santos (2021) e apresentado na Tabela 10. Seu resultado para resistência à compressão axial média (f_{cm}) aos 28 dias foi de 130 MPa, aproximadamente, para as misturas confeccionadas na argamassadeira.

Tabela 10 – Traço do UHPC referência		
Material	Traço referência (V0)	Consumo (kg/m³)
Cimento	1,000	769,900
Areia	1,100	846,890
Pó de Quartzo	0,500	384,950
Sílica Ativa	0,250	192,480
Água (a/c)	0,230	177,080
Aditivo superplastificante	0,030	23,100

Fonte: Autora (2024)

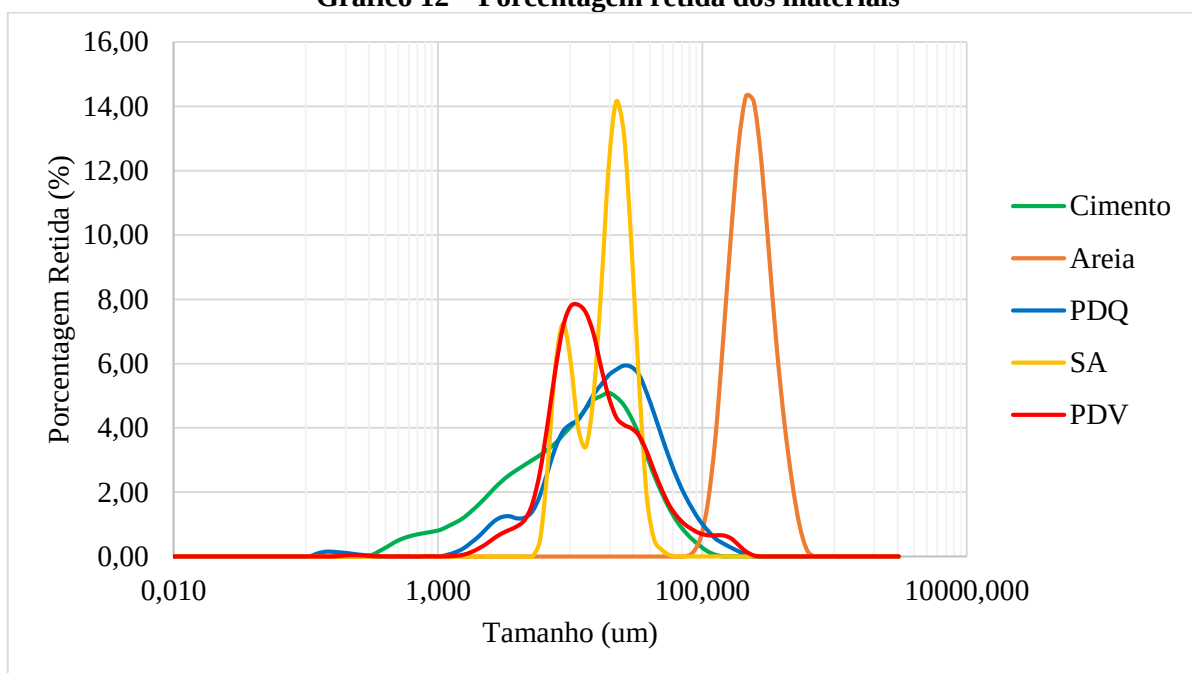
Foi realizado um comparativo entre as distribuições granulométricas dos materiais empregados no UHPC e do PDV que seria incorporado nas misturas, como mostrado no Gráfico 11 e no Gráfico 12, com o objetivo de definir qual material seria substituído pelo resíduo.

Gráfico 11 – Distribuição granulométrica dos materiais



Fonte: Autora (2024)

Gráfico 12 – Porcentagem retida dos materiais



Fonte: Autora (2024)

Para manter o mesmo patamar de resistência do que o traço referência, o ideal seria aplicar o PDV em substituição ao material de igual ou semelhante granulometria, a fim de não prejudicar o empacotamento dos grãos na mistura.

Como visto no Gráfico 11 e no Gráfico 12, a curva do PDV não é igual a de nenhum material empregado no UHPC, mas se assemelha com a granulometria do pó de quartzo (PDQ) e do cimento.

Portanto, tendo como base o impacto negativo que a indústria de cimento causa ao ambiente, foi escolhido que o PDV seria aplicado em substituição parcial ao cimento no UHPC.

A partir dessa escolha, foram confeccionadas as misturas com substituição de cimento por pó de vidro nas porcentagens de 5, 10, 15 e 20%, cujas proporções foram apresentadas na Tabela 11.

Todos os CPs foram moldados em um misturador planetário de bancada (argamassadeira).

Tabela 11 – Traço das misturas de UHPC com substituição de cimento por PDV.

Materiais	V5		V10		V15		V20	
	Traço	Consumo (kg/m³)	Traço	Consumo (kg/m³)	Traço	Consumo (kg/m³)	Traço	Consumo (kg/m³)
Cimento	1,000	731,405	1,000	692,91	1,000	654,415	1,000	615,92
PDV	0,053	38,495	0,111	76,990	0,176	115,485	0,250	153,98
Areia	1,158	846,890	1,222	846,890	1,294	846,890	1,375	846,890
Pó de Quartzito	0,526	384,950	0,556	384,950	0,588	384,950	0,625	384,950
Sílica Ativa	0,263	192,480	0,278	192,480	0,294	192,480	0,313	192,480
Água	0,242	177,080	0,256	177,080	0,271	177,080	0,288	177,080
Aditivo	0,032	23,100	0,033	23,100	0,035	23,100	0,038	23,100

Fonte: Autora (2024)

Figura 18 – Misturador planetário de bancada (argamassadeira)

Assim, foram executados os seguintes passos para as misturas:

- i. Colocar todo o material seco em um saco plástico e misturá-lo por cerca de 2 minutos, de forma manual, até que a mistura fique com aparência homogênea;
- ii. Transferir a mistura de materiais secos para a argamassadeira de capacidade igual a 1,4 litros e manter em máximo velocidade durante 5 minutos, envolvendo externamente o recipiente planetário com o saco plástico para evitar perda de material (ver Figura 19);

- iii. Com o misturador em velocidade lenta, adicionar o aditivo superplastificante e a água de forma separada, durante 2 minutos;
- iv. Manter a argamassadeira em velocidade máxima até que o material esteja com a consistência desejada para a moldagem, podendo variar de 3 a 5 minutos.

Figura 19 – Misturador envolto com saco plástico



A cada rodagem na argamassadeira, foram produzidos seis corpos de prova de dimensões 5x10cm.

Os corpos de prova foram moldados com auxílio de um saco de confeiteiro, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Utilização de saco de confeiteiro para moldagem dos CPs



Com 24 horas após a moldagem, os CPs foram desmoldados. Após o desmolde, todos os CPs foram identificados da seguinte forma:

X Y Z W

Em que:

X: refere-se à letra que identifica o traço que foi produzido, sendo R para o traço referência e V para o traço com pó de vidro;

Y: refere-se ao dia de moldagem, sendo definido o número 1 para a primeira data de moldagem, 2 para o segundo dia, e assim por diante;

Z: refere-se ao número da sequência de rodagens do dia na argamassadeira, sendo o número 1 para a primeira rodagem, 2 para a segunda rodagem, e assim por diante.

W: refere-se ao número do corpo de prova moldado na rodagem, variando de 1 a 6.

Depois de identificados, os CPs foram levados para a câmara úmida para a cura.

Para todos os corpos de prova citados, foi realizado o ensaio de mini abatimento, a fim de verificar o espalhamento das misturas no estado fresco.

Para cada traço foram moldados seis corpos de prova, em que três foram rompidos à compressão axial aos sete dias de cura e três foram rompidos aos 70 dias.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO UHPC NO ESTADO FRESCO

Todos os ensaios no estado fresco foram realizados logo após a finalização da mistura na argamassadeira.

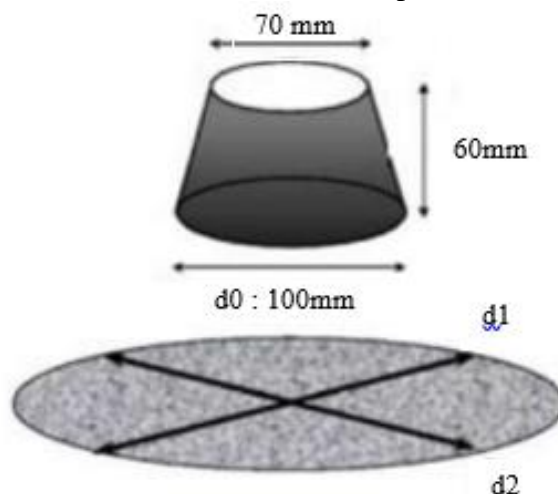
3.3.1.1 Mini abatimento

Devido às quantidades reduzidas de UHPC produzidas na argamassadeira, o espalhamento foi avaliado pelo ensaio de mini abatimento (mini *slump*), utilizando um mini cone.

Para este ensaio, utilizou-se os seguintes aparatos:

- i. Mini cone com diâmetro superior de 70mm, diâmetro inferior de 100mm e altura de 600mm, como mostrado na Figura 21;
- ii. Base redonda de vidro com 400mm de diâmetro.

Figura 21 – Dimensões do mini cone para mini slump



Fonte: Okamura e Ouchi (2003)

Com os resultados, foi possível calcular o Índice de deformabilidade (Γ_m) por meio da Eq. 3.1:

$$\Gamma_m = \left(\frac{d_1 \cdot d_2 - d_0^2}{d_0^2} \right)^2 \quad \text{Eq. 3.1}$$

Em que,

d_1 e d_2 são medidas do espalhamento perpendiculares entre si, em mm, como mostra a Figura 21;

d_0 representa o diâmetro inicial da base do cone, em mm.

Esse ensaio foi proposto por Okamura e Ouchi (2003), para ser realizado em argamassas e pastas de cimento, a fim de caracterizar aditivos e adições usados em concretos autoadensáveis. Segundo os autores, quanto maior o valor do índice, maior a deformabilidade que determinado material proporciona à mistura no estado fresco.

Portanto, o material a ser avaliado deve ser adicionado, em determinadas porcentagens, para a verificação de qual o maior índice de deformabilidade proporcionado.

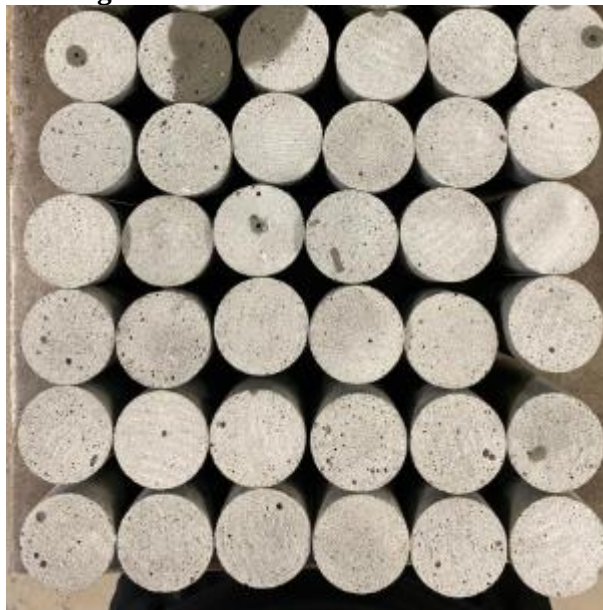
Neste estudo, utilizou-se esse método para avaliar os espalhamentos das misturas de UHPC com as porcentagens de 0, 5, 10, 15 e 20% de pó de vidro em substituição ao cimento.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO UHPC NO ESTADO ENDURECIDO

3.4.1 Ensaios do UHPC à temperatura ambiente

Todos os CPs confeccionados nesta pesquisa foram submetidos à cura em câmara úmida até as datas pertinentes, e retificados previamente para garantir a planicidade das bases, conforme as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

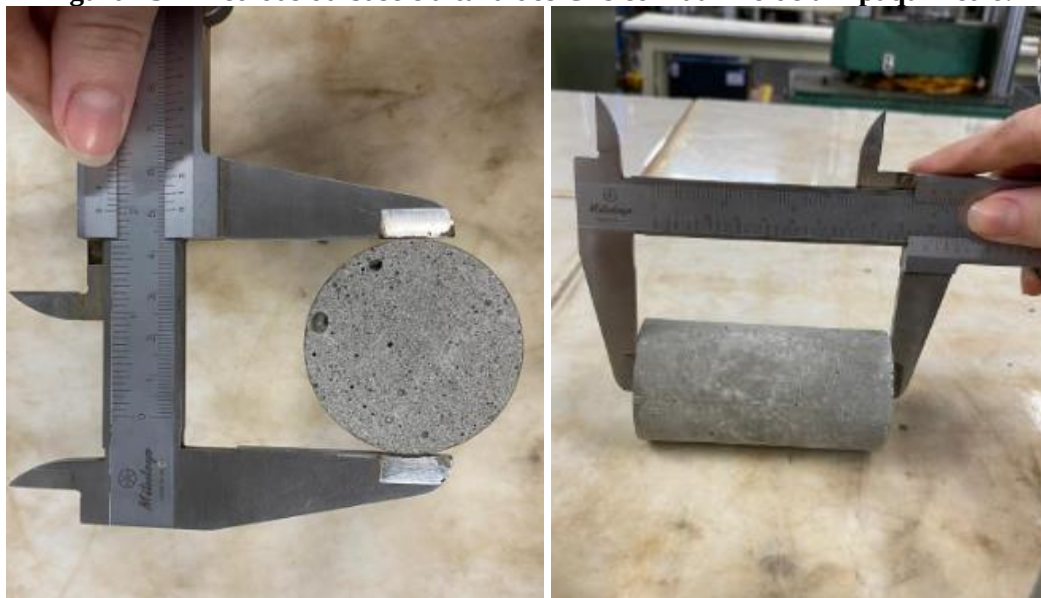
Figura 22 – CPs com bases retificadas



Fonte: Autora (2024)

Depois de retificados, a base e a altura dos CPs foram medidas com paquímetro e anotadas.

Figura 23 – Medidas da base e altura dos CPs com auxílio de um paquímetro.



Fonte: Autora (2024)

Para a fase 02, os CPs de UHPC com PDV nas porcentagens de 0, 5, 10, 15 e 20% em substituição ao cimento, foram caracterizados quanto à resistência à compressão axial aos 7 e aos 70 dias, seguindo as orientações da NBR 5739 (ABNT, 2007). Para cada idade e para cada traço foram utilizados 3 CPs.

Posteriormente, para a fase 04, 12 CPs de cada traço de UHPC, nas porcentagens de 0 e 10% de PDV em substituição ao cimento (V0 e V10, respectivamente), foram caracterizados quanto à resistência à compressão axial aos 28 e 70 dias.

Além disso, outros 12 CPs de cada traço mencionado foram utilizados para determinação das resistências à tração indireta por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011).

Os ensaios de compressão axial e diametral foram realizados na prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PCE 1000C, com capacidade de carga de 100.000,00 kgf (Figura 24), disponível no laboratório P02 da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Figura 24 – Prensa hidráulica durante o ensaio de resistência à compressão axial e diametral.



Fonte: Autora (2024)

Posteriormente, ainda na fase 04, três CPs de UHPC V0 e V10, foram para determinação do módulo de elasticidade estático aos 28 dias, de acordo com as diretrizes da NBR 8522-1 (ABNT, 2021). Esse ensaio foi realizado na prensa universal INSTRON EMIC 23-600, também disponível no laboratório P02 da UEM.

O módulo de elasticidade estático para os CPs de UHPC, nas idades de 70 dias, foram estimados matematicamente, conforme previsto pela norma NBR 8522-1 (ABNT, 2021). Esta norma define que o módulo de elasticidade estático (E_{ci}) pode ser estimado a partir do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) e da massa específica do concreto (ρ), empregando a Eq. 3.2:

$$E_{ci} = \frac{0,4275}{\rho} E_{cd}^{1,4} \quad \text{Eq. 3.2}$$

O módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}), por sua vez, foi calculado por meio da Eq. 3.3 da ASTM C597-16 (ASTM, 2016) que correlaciona o módulo dinâmico com a velocidade de pulso ultrassônico:

$$v = \sqrt{\frac{E_{cd}(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Em que,

v é a velocidade de pulso ultrassônico obtido no ensaio de ultrassom;

E_{cd} é o módulo de elasticidade dinâmico;

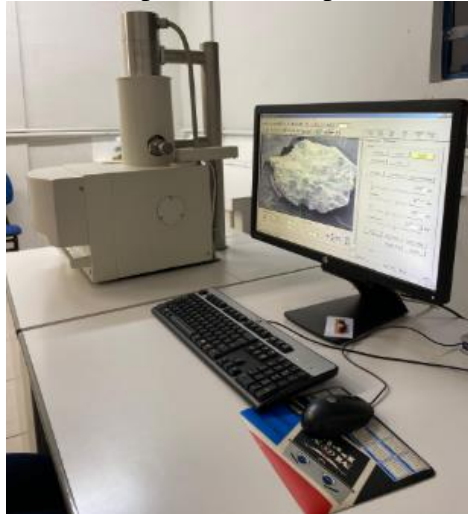
μ é o coeficiente de Poisson, considerado como 0,20.

Em ao menos cinco CPs de cada traço, para cada idade de ensaio, foi realizado o ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), preconizado pela NBR 8802 (ABNT, 2019), que consiste em um método não destrutivo para expressar a compacidade dos materiais. Essa técnica foi criada para viabilizar a obtenção de curvas de correlação entre a VPU do elemento de concreto e a sua resistência à compressão. Se trata de um ensaio rápido, fácil, que possibilita verificar se existem falhas internas na matriz.

Além disso, aos 70 dias, três corpos de prova de cada traço de UHPC (V0 e V10) foram submetidos ao ensaio de absorção de água, conforme as prescrições da norma NBR 9778 (ABNT, 2005).

Por fim, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica por varredura (MEV) nos fragmentos coletados dos CPs rompidos à compressão, a fim de obter informações morfológicas da matriz (Figura 25).

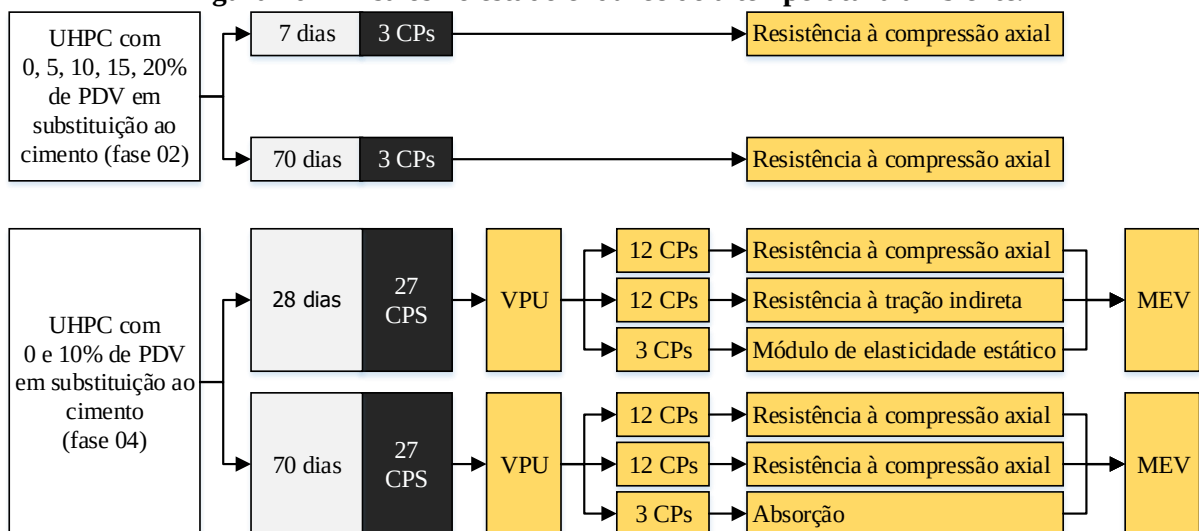
Figura 25 – Equipamento utilizado para Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)



Fonte: Autora (2024)

Para melhor entendimento, os ensaios realizados foram esquematizados e apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Ensaios no estado endurecido à temperatura ambiente.



Fonte: Autora (2024)

3.4.2 Ensaios do UHPC sob elevadas temperaturas

Para os ensaios de UHPC sob elevadas temperaturas, utilizou-se somente as misturas com 0 e 10% de PDV em substituição ao cimento (V0 e V10).

Nessa etapa, foi possível analisar a ocorrência do efeito *spalling* no UHPC, por meio do monitoramento dos lascamentos explosivos, de sua intensidade e forma de ocorrência nos CPs. Com isso, foi possível analisar também a influência do teor de umidade, da taxa de aquecimento e do choque térmico quanto à ocorrência dos eventos explosivos.

Foram analisadas também as propriedades mecânicas das misturas de UHPC após a exposição a diferentes temperaturas.

Para submeter os CPs de UHPC à elevadas temperaturas, utilizou-se um forno de dimensões internas 10x15x21cm (Figura 27) que possui taxa de aquecimento máxima de até 15°C/min.

Figura 27 – Forno EDG 3000.

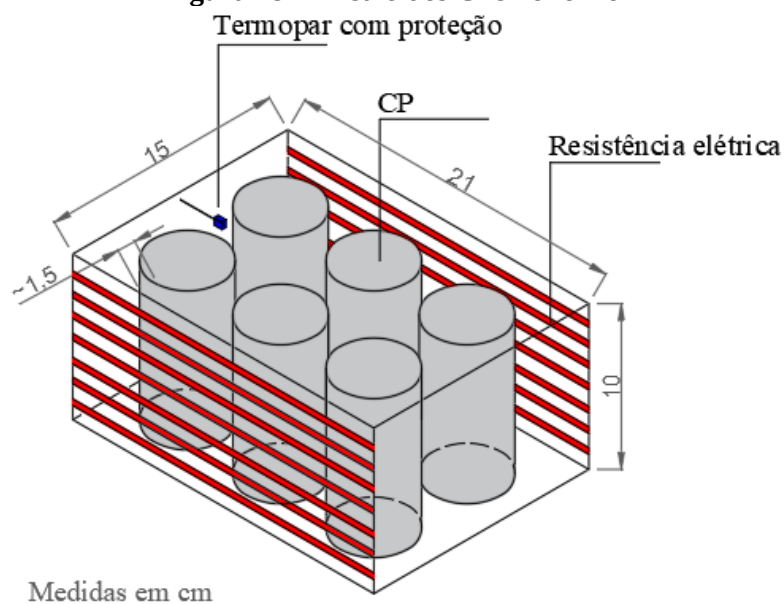


Fonte: Autora (2024)

A Figura 28 ilustra a disposição dos CPs no forno e os itens que compõem a parte interna do equipamento.

O termopar do forno, que mede a temperatura, foi protegido com um aparato para que não fosse danificado com as explosões do concreto (ver Figura 28).

Figura 28 – Ensaio dos CPs no forno

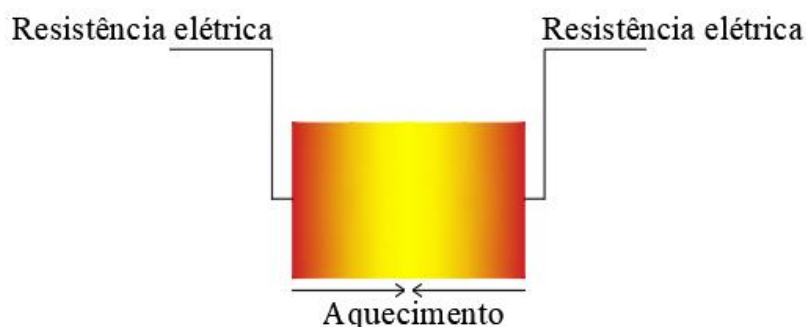


Fonte: Autora (2024)

Cada ensaio no forno foi realizado com seis CPs de UHPC. Os CPs ficaram cerca de um centímetro e meio de distância das laterais e dos outros CPs.

Como as resistências elétricas ficam dispostas na lateral do forno (ver Figura 28), todos os CPs foram submetidos ao mesmo gradiente de temperatura, das laterais para o centro (Figura 29).

Figura 29 – Gradiente de temperatura dentro do forno (vista frontal)



Fonte: Autora (2024)

3.4.2.1 Análise da ocorrência do efeito *spalling*

Primeiramente, para verificar a relação entre a taxa de aquecimento e o efeito explosivo do concreto, 18 CPs foram secos em estufa por seis dias (dos 64 dias de idade até os 70 dias) e foram submetidos à diferentes taxas de aquecimento, especificamente 1, 5 e 15°C/min.

Nesse ensaio, os CPs foram aquecidos até explodirem e/ou racharem, o que delimitou as temperaturas dos ensaios que seriam realizados para determinação das propriedades residuais do concreto.

Assim, para análise mecânica das misturas de UHPC na condição pós-forno (propriedades residuais), definiu-se as temperaturas de 200°C, 300°C e 400°C.

Para cada traço e para cada temperatura pré-determinada, 18 CPs foram ensaiados. 12 deles foram para a secagem em estufa aos 64 dias de idade, permanecendo até os 70 dias, quando se deu início aos testes no forno. Os outros seis CPs foram mantidos em câmara úmida até os 70 dias de idade, para então serem submetidos às elevadas temperaturas.

Os 12 CPs secos e 6 saturados de cada traço (V0 e V10), foram aquecidos a uma taxa fixa de 5°C/min até atingir a temperatura de ensaio, mantendo-se no forno em temperatura constante por mais 60 minutos. Assim, foi possível observar a relação entre o teor de umidade da amostra e a ocorrência de efeito *spalling* no UHPC, sem influência da taxa de aquecimento.

Esse tempo de 60 minutos de manutenção da temperatura foi escolhido por ser o tempo médio de resistência ao fogo requerido pela NBR 14432 (ABNT, 2001) para ser considerado nos projetos de edificações.

Realizou-se também a análise do comportamento do concreto frente à brusca perda de calor para o meio, ou seja, diante de um choque térmico.

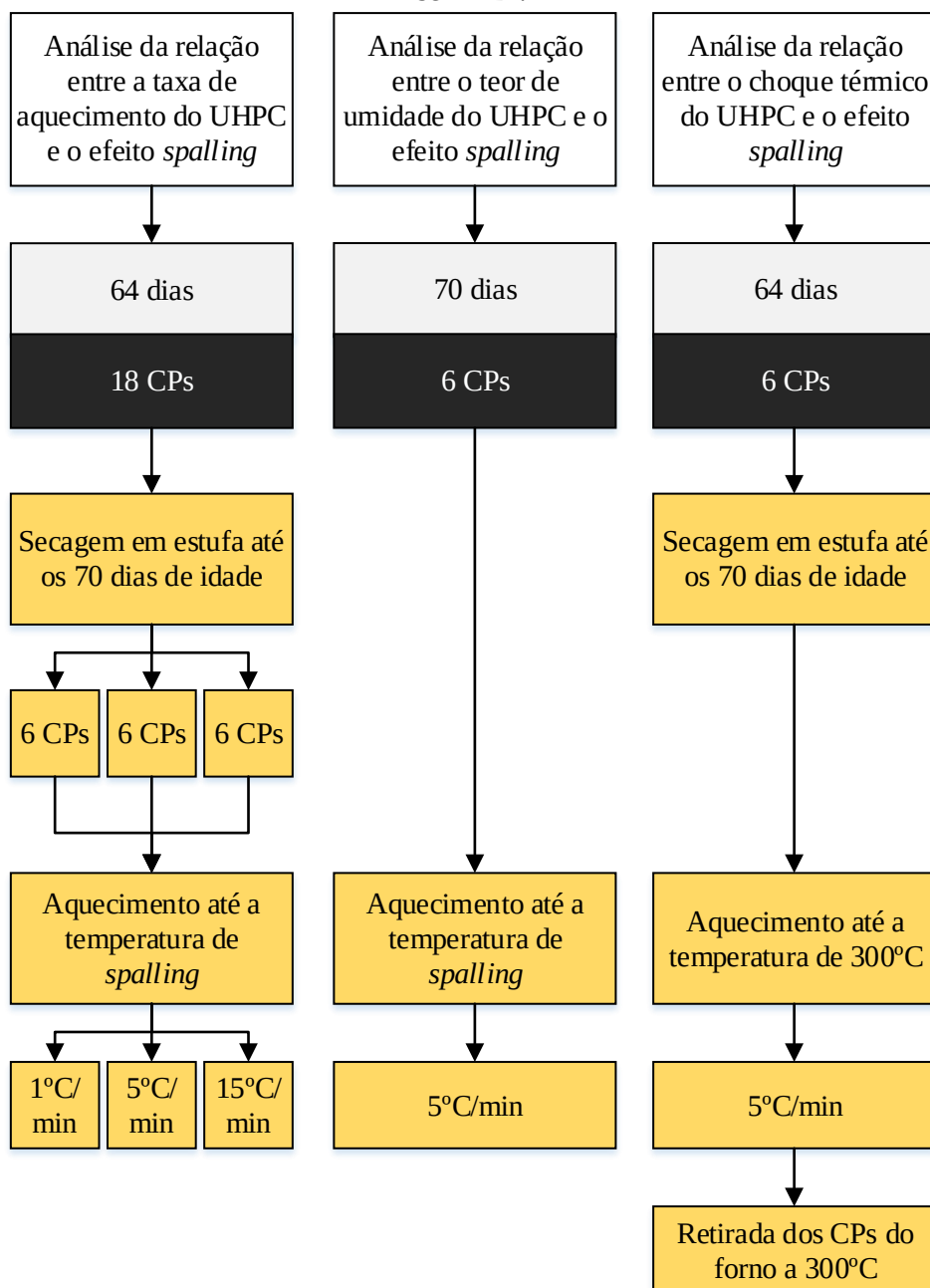
Essa análise é importante para entender o comportamento do concreto em situações reais de incêndio. O ideal é que a estrutura se mantenha íntegra diante do seu brusco resfriamento nas operações de combate ao fogo, a fim de não causar risco de ferimentos secundários aos bombeiros pelo ao lascamento explosivo do concreto (Han *et al.*, 2024).

Seis corpos de prova, também secos em estufa por 6 dias (dos 64 dias aos 70 dias de idade) foram aquecidos a uma taxa de temperatura de 5°C/min, situação em que não foi verificada a ocorrência de *spalling* no ensaio anterior. Quando o forno atingiu a temperatura de 300°C, o aquecimento do forno foi pausado. Imediatamente, os CPs foram retirados do forno e mantidos em contato com o ar atmosférico até atingirem a temperatura ambiente.

Para analisar a influência da presença do pó de vidro (PDV) no concreto submetido a elevadas temperaturas, todos os testes no forno realizados na mistura referência de UHPC, também foram feitos para a mistura de UHPC com PDV.

A esquematização dos ensaios realizados para análise da do efeito *spalling* no UHPC foi apresentada na Figura 30.

Figura 30 – Esquematização dos ensaios realizados para análise do efeito *spalling* o UHPC com e sem PDV



Fonte: Autora (2024)

3.4.2.2 Determinação das propriedades residuais

As características das amostras e os parâmetros de aquecimento no presente programa experimental assemelham-se às diretrizes da RILEM TC 200-HTC: Part 2:2007 (RILEM, 2007). Portanto, o ensaio foi realizado sem carga simultânea durante a exposição às altas temperaturas e as propriedades mecânicas residuais foram determinadas após o resfriamento dos CPs.

Para determinar as propriedades residuais do UHPC pós-forno, foram escolhidas temperaturas e taxas de aquecimento em que não foram verificadas explosões do concreto nos ensaios anteriores (análise da ocorrência de efeito *spalling*), a fim de manter os CPs íntegros para os ensaios a serem realizados.

Assim, foram escolhidas as temperaturas de 200 e 300°C para a taxa de aquecimento de 5°C/min e a temperatura de 400°C para a taxa de aquecimento de 1°C/min.

Além disso, os CPs mantidos na estufa a 100°C também foram caracterizados quanto às suas propriedades mecânicas residuais.

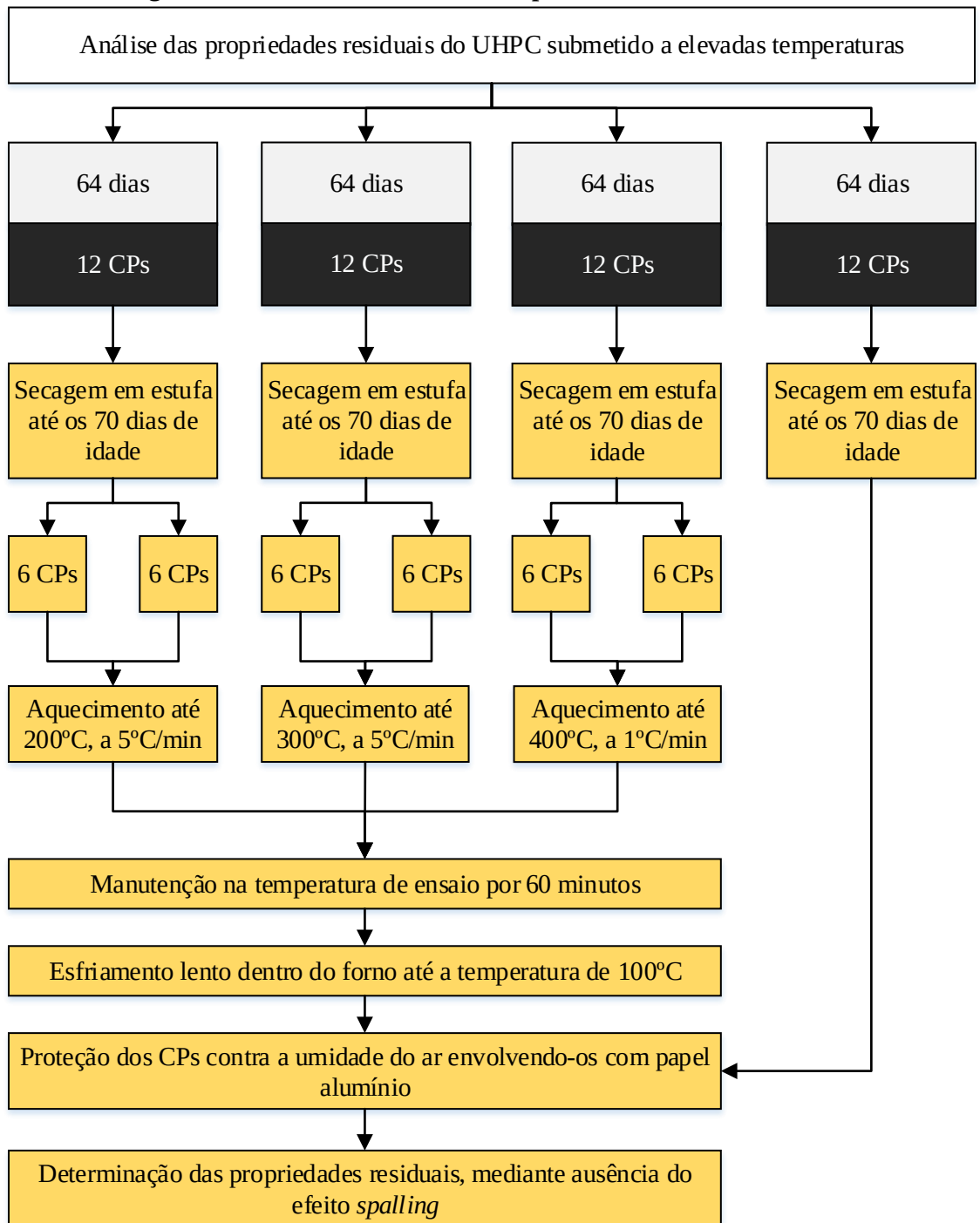
Após os ensaios no forno, os CPs só foram retirados após atingirem a temperatura de 100°C. Ao serem retirados do forno, foram envoltos em papel alumínio para evitar contato e absorção da umidade do meio.

Posteriormente, após o resfriamento dos CPs envoltos no papel alumínio, os CPs foram levados para a realização dos ensaios não destrutivos (ultrassom) e destrutivos (compressão axial e diametral).

Alguns fragmentos dos CPs rompidos à compressão, foram coletados para a realização dos ensaios de Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV). Os fragmentos foram isolados em sacos plásticos e conservados em um recipiente com sílica em gel para evitar absorção de umidade.

A esquematização dos ensaios realizados para análise das propriedades residuais do UHPC frente a elevadas temperaturas, foi apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Ensaio das fases 05 e 06 para o UHPC com e sem PDV.



Fonte: Autora (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO PDV

A reação pozolânica que as adições minerais oferecem aos compósitos cimentícios ocorre devido à combinação química entre a pozzolana, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 ou CH) e a água presente nos concretos, formando uma nova fase de C-S-H (Soares, 2021).

Segundo Dal Molin (2011), o C-S-H secundário formado pela reação pozolânica, preenche os poros do compósito e, conseqüentemente, favorece a resistência mecânica e durabilidade dos concretos.

Os materiais pozolânicos seguem uma classificação específica, dada pela NBR 12653 (ABNT, 2015) e podem ser classificados como pozzolanas naturais ou artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas (classe N); como cinzas volantes (classe C) ou como quaisquer pozzolanas não contempladas nas classes N e C (classe E), desde que obedeçam aos requisitos normativos.

Entre os critérios para classificar um material como pozolânico, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), este deve apresentar um somatório das quantidades de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e trióxido de ferro (Fe_2O_3) igual ou superior a 50% para classe E, e igual ou superior a 70% para as classes N e C.

Ainda de acordo com a normativa, o material também deve apresentar quantidade máxima de 4% de trióxido de enxofre (SO_3) para classe N e de 5% para as classes C e E; além de uma quantidade máxima de 1,5% de óxido de sódio (Na_2O) para todas as classes.

Conforme o resultado da análise química por meio do ensaio de FRX (Tabela 9), o pó de vidro apresentou o somatório de quantidades de sílica, alumina e trióxido de ferro de 82,194%, o que está dentro do critério da norma brasileira para materiais pozolânicos.

Além disso, o PDV possui quantidade nula de óxido de sódio (Na_2O) e quantidade de 0,364% de trióxido de enxofre (SO_3), atendendo aos requisitos de quantidades inferiores a 1,5 e 4%, respectivamente.

Outro critério de classificação de materiais pozolânicos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), é que o material retido na peneira 45 μm seja inferior a 20%, para todas as classes.

Conforme a análise granulométrica realizada, o PDV utilizado nesta pesquisa possui 12,41% de material retido na peneira 45 μm , valor inferior a 20%, atendendo ao requisito estabelecido pela norma brasileira. Esse percentual foi calculado a partir da média dos três

resultados de granulometria a laser do material. Os dados da granulometria foram apresentados no Anexo A.

Não foram feitos todos os testes para classificação do PDV como um material pozzolânico. Entretanto, foi possível verificar que o pó de vidro é um material passível de apresentar atividade pozzolânica pois atende os critérios que foram testados.

Além dessa classificação, outros ensaios mostraram que o PDV possui potencial de pozzolanicidade. Um material pozzolânico deve ser quimicamente ativo, ou seja, deve se apresentar como um material amorfo e possuir capacidade de se combinar com outros compostos. Para verificar se a estrutura do PDV é amorfa ou cristalina, devemos analisar o difratograma do material.

Para os ensaios de DRX, segundo Hoppe Filho *et al.* (2017) os materiais inertes não possuem halo amorfo nos difratogramas e, por conseguinte, não são passíveis de interação com o hidróxido de cálcio na mistura. Isso pode ser verificado no difratograma do pó de quartzo, apresentado no Gráfico 5, que apresenta inúmeros picos cristalinos e não há halo amorfo. Ainda, segundo os autores, os difratogramas de materiais pozzolânicos apresentam banda difusa, o que caracteriza a existência de estrutura amorfa.

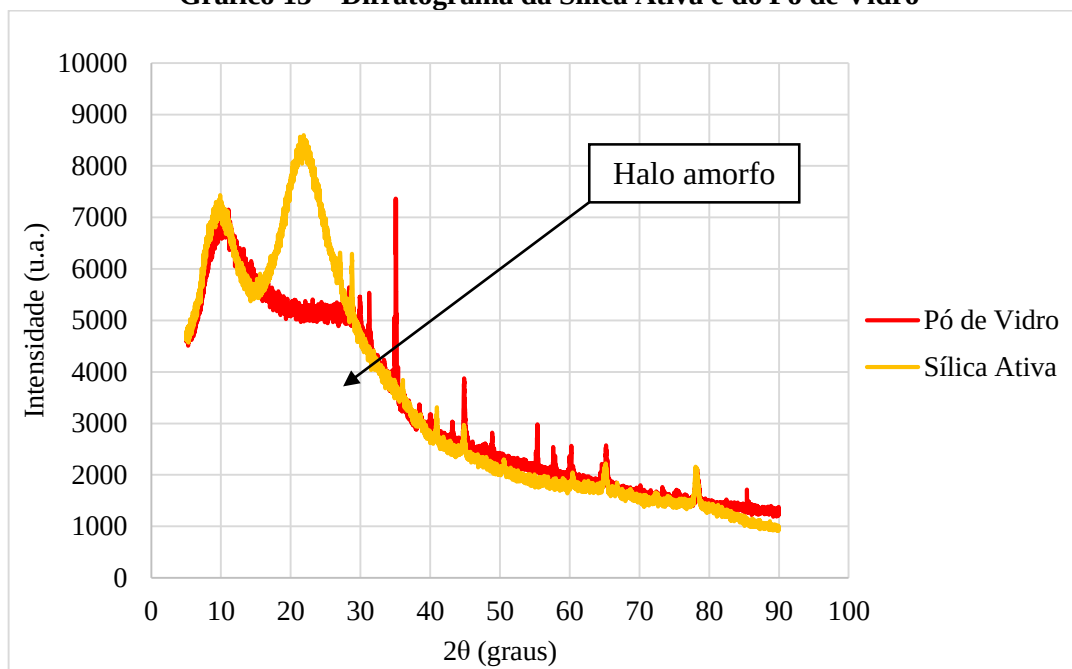
No difratograma do PDV (Gráfico 9), é possível verificar um intenso pico cristalino, em 33-35 graus, aproximadamente, e outros pequenos picos em outros ângulos. Entretanto, é possível verificar que o PDV apresenta comportamento predominantemente amorfo, representado pela banda amorfa.

Esse comportamento é semelhante ao apresentado no difratograma da sílica ativa (Gráfico 7), que por sua vez, é um material pozzolânico.

Assim, é possível afirmar que o pó de vidro é passível de atividade pozzolânica devido sua banda difusa apresentada no difratograma e, portanto, pode combinar com o hidróxido de cálcio nas misturas para formar outros compostos.

Os dois gráficos citados, da sílica ativa e do pó de vidro, foram apresentados no Gráfico 13 para comparação.

Gráfico 13 – Difratoograma da Sílica Ativa e do Pó de Vidro



Fonte: Autora (2024)

Além disso, existe também a análise da norma NBR 15895 (ABNT, 2010), que apresenta as diretrizes para se calcular o índice de atividade pozolânica, pelo ensaio Chapelle modificado. O resultado desse ensaio mostra o teor de hidróxido de cálcio fixado, em miligramas (mg) de Ca(OH)_2 por grama (g) de material.

O índice de atividade pozolânica calculado para o PDV, conforme o ensaio Chapelle, foi de 249,05 mg de Ca(OH)_2 /g de pó de vidro.

Para entender a significância desse resultado, existe a referência do índice de atividade pozolânica para o material metacaulim destinado ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, como especifica a norma NBR 15894-1 (ABNT, 2010). A norma cita que o valor do índice de atividade pozolânica deve ser de no mínimo 750 mg de Ca(OH)_2 /g de material.

Entretanto, para Raverdy *et al.* (1980) *apud* Soares (2021), autor que propôs o método de investigação de atividade pozolânica pelo ensaio de Chapelle modificado, estabelece que o valor mínimo para classificar um material como pozolânico é de 436 mg de Ca(OH)_2 /g de material.

Independentemente do valor referência adotado, o resultado do índice de atividade pozolânica para o PDV não atende aos critérios estabelecidos. Entretanto, esse resultado pode estar atrelado à granulometria do material.

No presente estudo, utilizou-se o PDV passante na peneira #50 de abertura 300 μm . Soares (2021), com pó de vidro reciclado mais fino, passante na peneira #200 de abertura 75

μm , teve como resultado o índice de pozolanicidade de 654 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ de material. As análises químicas dos dois PDVs são semelhantes, assim como o resultado do DRX.

Além disso, Borges (2021), pelo método Chapelle modificado, identificou que o índice de atividade pozolânica do pó de vidro aumenta à medida em que o tamanho das partículas diminui. O autor verificou o índice de 457, 654 e 870 de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ de material para os pós de vidro passantes nas peneiras #100 ($150\ \mu\text{m}$), #200 ($75\ \mu\text{m}$) e #325 ($45\ \mu\text{m}$), respectivamente.

Portanto, foi possível entender que o PDV utilizado neste estudo é passível de apresentar atividade pozolânica mas, precisaria ser moído por mais tempo para obtenção de partículas passantes na peneira #100 de abertura $150\ \mu\text{m}$, pelo menos.

4.2 DEFINIÇÃO DO TEOR DE PDV NO UHPC

Este item refere-se aos resultados obtidos na fase 02 do programa experimental (ver Figura 12), em que foi definido o traço de UHPC com PDV a ser analisado nos ensaios sob altas temperaturas.

4.2.1 Estado fresco

As misturas de UHPC foram moldadas nas porcentagens de 0, 5, 10, 15 e 20% de substituição de cimento por PDV. As quantidades em massa para cada percentual de substituição foram apresentadas na Tabela 12. Cada mistura produzida rendeu seis corpos de prova de dimensões $5 \times 10 \text{ cm}$.

Imediatamente após a execução de cada mistura, foi realizado o ensaio de mini abatimento. Os diâmetros de espalhamento foram medidos com paquímetro. Os valores foram apresentados na Tabela 13.

Tabela 12 – Quantidades em massa para seis corpos de prova $5 \times 10 \text{ cm}$					
Materiais	Percentual de substituição de cimento por PDV				
	0%	5%	10%	15%	20%
	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g)
Cimento	1043,07	990,92	938,76	886,61	834,46
PDV	0,00	52,15	104,31	156,46	208,61
Areia	1147,38	1147,38	1147,38	1147,38	1147,38
Pó de Quartzo	521,53	521,53	521,53	521,53	521,53
Sílica Ativa	260,77	260,77	260,77	260,77	260,77
Água	239,91	239,91	239,91	239,91	239,91
Aditivo	31,30	31,30	31,30	31,30	31,30

Fonte: Autora (2024)

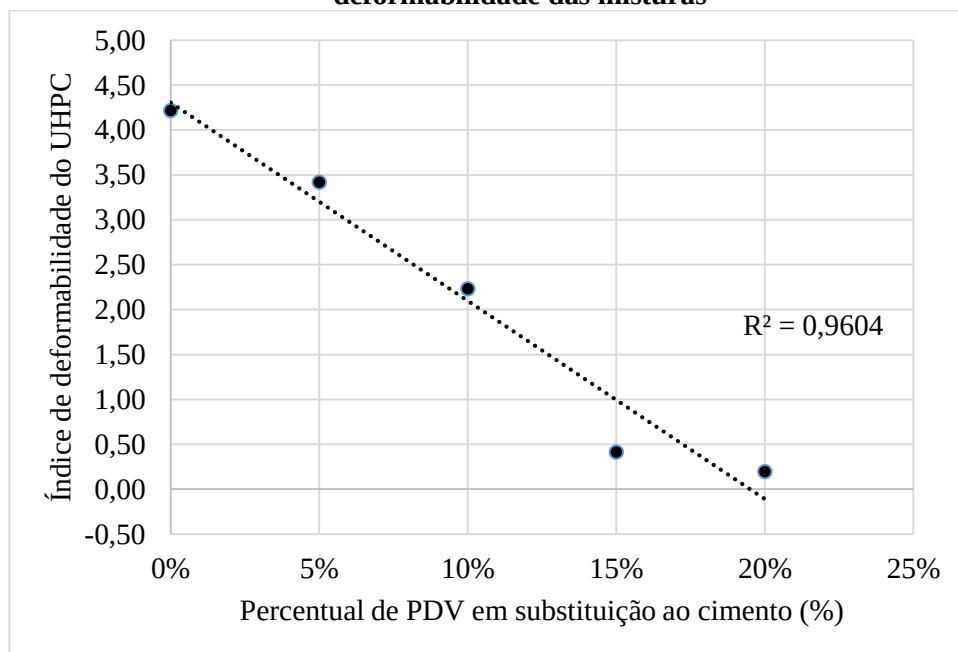
Tabela 13 – Resultados do ensaio de mini abatimento

Percentual de substituição	ID	Diâmetros de espalhamento		Diâmetro do cone	Índice de deformabilidade (Eq. 3.1)
		d1 (mm)	d2 (mm)	d0 (mm)	
0%	V0	227,90	229,00	100,00	4,22
5%	V5	210,90	209,60	100,00	3,42
10%	V10	177,50	182,20	100,00	2,23
15%	V15	120,00	118,00	100,00	0,42
20%	V20	109,40	109,60	100,00	0,20

Fonte: Autora (2024)

Por meio dos resultados obtidos no ensaio de mini abatimento, verificou-se que, quanto maior a porcentagem de cimento substituído por PDV, menor foi o diâmetro de espalhamento da mistura. Ou seja, a substituição de cimento por PDV diminuiu a fluidez das misturas de UHPC.

Essa relação entre a quantidade de PDV e a fluidez da mistura apresentou tendência linear e negativa, como é possível verificar no Gráfico 14.

Gráfico 14 – Relação entre o percentual de substituição de cimento por PDV com o índice de deformabilidade das misturas

Fonte: Autora (2024)

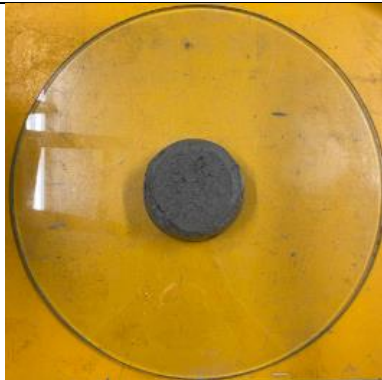
Por meio do aspecto visual, apresentado no Quadro 4, verificou-se que a mistura com 15 e 20% de substituição de cimento por PDV apresentaram espalhamento quase nulo, e permaneceram com o formato do molde tronco-cônico.

Quadro 4 – Aspecto visual do ensaio de mini abatimento

(continua)

Percentual de substituição	ID	Aspecto visual dos espalhamentos	
0%	V0		
5%	V5		
10%	V10		
15%	V15		

(conclusão)

20%	V20		
-----	-----	--	---

Fonte: Autora (2024)

Os resultados do comportamento de concretos com PDV, no estado fresco, divergem entre os trabalhos.

Soliman e Tagnit-Hamou (2016) verificaram que a fluidez das misturas de UHPC aumentou com a utilização de PDV (com dimensão máxima de 100 μm). Os autores atribuíram essa melhora na consistência do compósito devido à superfície lisa e à baixa absorção de água pelo PDV, deixando maior quantidade de água disponível para a fluidificação da mistura.

Essa foi a mesma justificativa dada por Zhao *et al.* (2024), que substituíram 30% de cimento por PDV (com partículas menores do que 100 μm), e obtiveram espalhamento maior do que a mistura referência, sem PDV.

Outra justificativa dada por Soliman e Tagnit-Hamou (2016), é que a demanda de água e a fluidez da mistura estão diretamente relacionadas ao tamanho das partículas e à área de superfície dos sólidos, respectivamente, ou seja, quanto maior o tamanho das partículas de PDV, menor a demanda de água e maior a fluidez do concreto.

Soares *et al.* (2019), substituíram o cimento por um PDV mais fino (com dimensão máxima de 75 μm), em misturas de UHPC, nas proporções de 10, 20, 30 e 50%, e verificaram que no estado fresco, não houve diferença significativa no espalhamento das misturas.

Wang *et al.* (2023) substituíram a sílica ativa por PDV ultrafino (d50=316 nm) e verificaram que o PDV prejudicou a fluidez do UHPC devido sua maior área específica se comparado com a sílica ativa. Ou seja, como o PDV era mais fino do que o material substituído, o espalhamento da mistura foi prejudicado devido à maior demanda de água da mistura.

Na presente pesquisa, como o cimento foi substituído por um material de partícula mais grossa (dimensão máxima de 300 μm), esperava-se que o aumento do teor de substituição de cimento por PDV aumentasse a fluidez das misturas. Entretanto, o resultado foi o oposto: quanto maior o teor de PDV, menor o espalhamento da mistura.

Pan *et al* (2017), em argamassas convencionais, também verificaram a redução do espalhamento das misturas com o aumento da substituição do cimento por PDV (com dimensão máxima de $100\ \mu\text{m}$), com uma piora brusca da consistência de 10 para 20% de substituição. Os autores justificaram que parte da água da mistura fica contida na superfície do pó de vidro, o que reduz o teor de água livre (na mistura fresca) e, consequentemente, a fluidez do material.

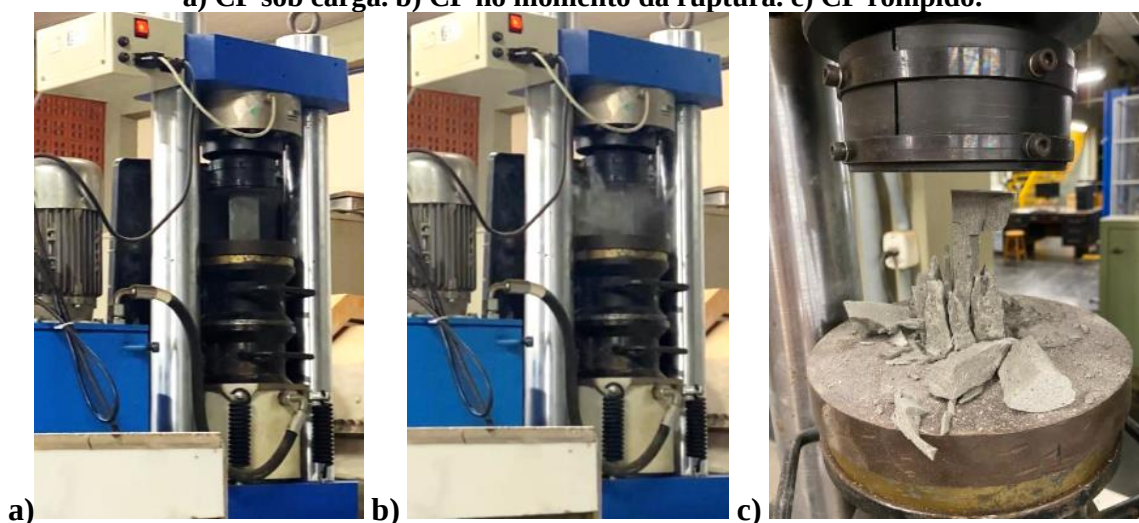
4.2.2 Estado endurecido

4.2.2.1 Resistência à compressão axial

Para caracterização das misturas de UHPC nas porcentagens de 0, 5, 10, 15 e 20% de PDV em substituição ao cimento, três CPs de cada traço foram rompidos à compressão aos 7 dias, a fim de verificar a influência da substituição do cimento pelo PDV nas primeiras idades.

Os CPs de UHPC tiveram rompimento brusco e frágil. Não apresentaram avisos, como fissuras, antes do rompimento. A Figura 32 mostra o momento em que o CP rompe à compressão.

Figura 32 – CP de UHPC durante o ensaio de resistência à compressão axial.
a) CP sob carga. b) CP no momento da ruptura. c) CP rompido.



Fonte: Autora (2024)

Na Tabela 14, foram apresentados os valores das resistências à compressão axial das misturas, o desvio-padrão e coeficiente de variação. No Apêndice A, foram apresentados os resultados individuais dos corpos de prova, o desvio relativo máximo (DRM), e as fórmulas utilizadas nos cálculos.

Tabela 14 – Resistência à compressão axial aos 7 dias

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão axial média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação
		<i>j</i>	<i>f_{cm,7}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>
		(dias)	(MPa)	-	%
V0	0%	7	115,428	3,63	3,14%
V5	5%	7	128,405	6,13	4,78%
V10	10%	7	116,443	5,38	4,62%
V15	15%	7	117,770	2,40	2,04%
V20	20%	7	84,347	5,02	5,95%

Fonte: Autora (2024)

Verificou-se, portanto, que apenas a mistura com 20% de PDV apresentou resistência inferior à mistura sem PDV. As outras misturas, com porcentagens de 5, 10 e 15% de PDV, se apresentaram no mesmo patamar de resistência do que a mistura referência, considerando a variação calculada.

De acordo com Li *et al.* (2019), quando o cimento é substituído pelo PDV na pasta de cimento, ocorre o efeito de diluição. Nesse efeito, o teor de cimento reduz e a relação água/cimento aumenta. Consequentemente, a formação dos produtos de hidratação diminui, reduzindo também a resistência à compressão nas primeiras idades.

Somente na mistura V20 foi observado o efeito de diluição.

Assim, a mistura V10 foi escolhida a ser utilizada nas próximas fases da pesquisa, pois dentre as maiores porcentagens de PDV, foi a mistura que obteve maior espalhamento no estado fresco e que não apresentou perda de resistência à compressão axial no estado endurecido nas primeiras idades.

Dos seis CPs produzidos para cada mistura de UHPC, três foram rompidos aos 7 dias, como mostrado acima, e os outros três foram rompidos aos 70 dias, a fim de verificar a influência do PDV na evolução da resistência do UHPC ao longo do tempo.

Na Tabela 15, foram apresentados os valores das resistências à compressão axial das misturas, bem como o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos resultados.

No Apêndice A, foram apresentados os resultados individuais dos corpos de prova, o desvio relativo máximo (DRM), e as fórmulas utilizadas nos cálculos.

Tabela 15 – Resistência à compressão axial aos 70 dias

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão axial média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação
		<i>j</i>	<i>fcm,70</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>
		(dias)	(MPa)	-	%
V0	0%	70	132,656	6,76	5,10%
V5	5%	70	137,177	3,93	2,86%
V10	10%	70	146,863	2,70	1,84%
V15	15%	70	134,697	3,03	2,25%
V20	20%	70	135,381	5,08	3,76%

Fonte: Autora (2024)

Com os resultados expostos na Tabela 16, foi possível analisar que todas as resistências evoluíram dos 7 aos 70 dias, com destaque para a mistura V20 que apresentou evolução de 60,50% resistência.

Além disso, verificou-se também que a mistura V10, com 10% de PDV, apresentou evolução da resistência de 26,14% dos 7 aos 70 dias, cerca de 11% superior à evolução da mistura referência V0.

Tabela 16 – Evolução da resistência à compressão axial dos 7 aos 70 dias

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Resistência à compressão axial média aos 7 dias	Resistência à compressão axial média	Evolução da resistência dos 7 aos 70 dias
		<i>fcm,7</i>	<i>fcm,70</i>	-
		(MPa)	(MPa)	%
V0	0%	115,428	132,656	14,93%
V5	5%	128,405	137,177	6,83%
V10	10%	116,443	146,863	26,14%
V15	15%	117,770	134,697	14,37%
V20	20%	84,347	135,381	60,50%

Fonte: Autora (2024)

Essa maior evolução de resistência nos traços V10 e V20, pode ser explicada pelo potencial pozolânico do PDV, que possui reação lenta e garante maior resistência aos concretos em idades mais avançadas.

Soliman e Tagnit-Hamou (2016), verificaram que todas as misturas de UHPC com 10, 20, 30, 40 e 50% de PDV em substituição ao cimento, apresentaram evolução da resistência em

idades avançadas; sendo a mistura de UHPC com 20% de PDV a que apresentou maior valor de resistência à compressão aos 56 e 91 dias.

Segundo Du e Tan (2017), a sílica amorfa do PDV reage lentamente para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o que densifica a microestrutura do concreto em idades tardias, conferindo evolução de sua resistência. Os autores, utilizando 15, 30, 45 e 60% de PDV, verificaram resistências à compressão superiores ao traço referência aos 365 dias, e atribuíram o ganho de resistência em idades mais avançadas à reação pozolânica do pó de vidro.

4.3 UHPC EM TEMPERATURA AMBIENTE

4.3.1 Resistência à compressão axial

A partir da escolha do traço de UHPC a ser utilizado nas etapas posteriores da pesquisa, as misturas V0 (sem PDV) e V10 (com 10% de PDV em substituição ao cimento) foram reproduzidas.

Na Tabela 17, foram apresentados os valores das resistências à compressão axial das misturas V0 e V10 aos 28 e aos 70 dias, bem como o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos resultados. No Apêndice A, foram apresentados os resultados individuais dos corpos de prova, o desvio relativo máximo (DRM), e as fórmulas utilizadas nos cálculos.

Tabela 17 – Resistência à compressão axial aos 28 e 70 dias das misturas V0 e V10

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão axial média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação
		<i>j</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>
		(dias)	(MPa)	-	%
V0	0%	28	137,371	3,654	2,66%
V0	0%	70	136,833	4,292	3,14%
V10	10%	28	127,392	4,395	3,45%
V10	10%	70	143,110	3,966	2,77%

Fonte: Autora (2024)

De acordo com Santos (2021), a resistência à compressão média do traço V0 foi de 130,45 MPa aos 28 dias. Portanto, o valor alcançado nesta pesquisa de 137,37 MPa se mostra coerente.

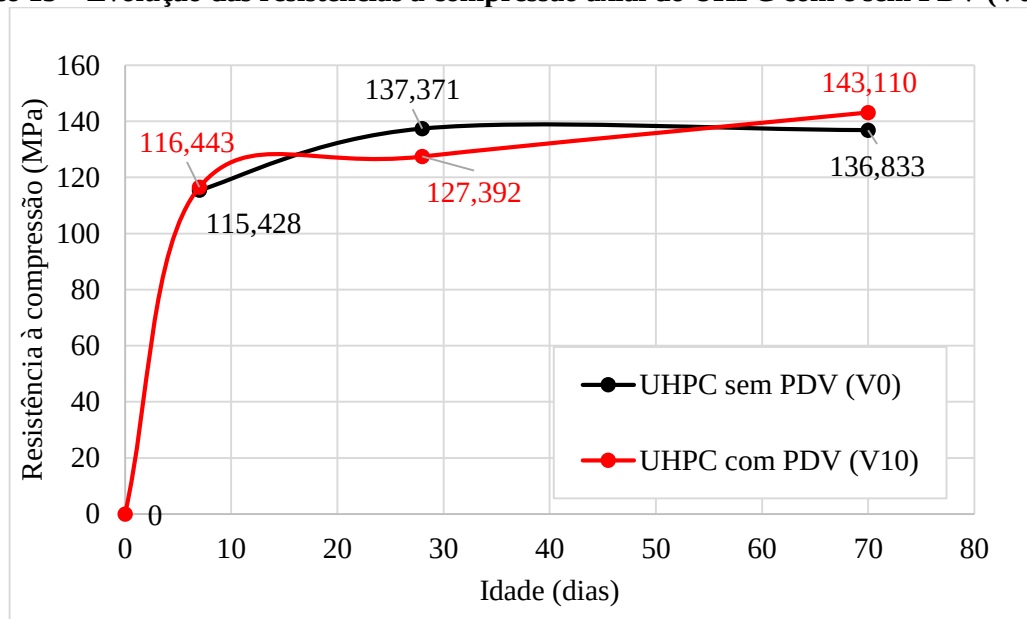
Além disso, os resultados apresentados na Tabela 17 assemelham-se aos resultados obtidos na fase 02 da pesquisa, mostrando confiabilidade e padronização da mistura e moldagem dos CPs de UHPC.

O Gráfico 15 apresenta a evolução das resistências aos 7, 28 e 70 dias, para os traços V0 e V10. No gráfico, é possível verificar que o traço V10 apresenta resistência inferior ao traço referência V0 aos 28 dias. Entretanto, aos 70 dias, a resistência do traço V10 evolui e supera a resistência do traço referência V0.

No traço referência V0, é possível observar que dos 28 aos 70 dias, a resistência não varia, mantendo-se em 137 MPa, aproximadamente. Entretanto, para o traço V20, a resistência varia de 127 para 143 MPa, ou seja, aumentou cerca de 13%.

Portanto, mesmo que o índice de atividade pozolânica pelo método chapelle modificado seja inferior ao limite estabelecido ($249,05 \text{ mg de Ca(OH)}_2/\text{g} < 436 \text{ mg de Ca(OH)}_2/\text{g}$), é inegável que o PDV conferiu evolução da resistência à compressão axial ao UHPC em idades avançadas.

Gráfico 15 – Evolução das resistências à compressão axial do UHPC com e sem PDV (V0 e V10).



Fonte: Autora (2024)

4.3.2 Resistência à tração indireta por compressão diametral

Na Tabela 18, foram apresentados os valores das resistências à compressão diametral, no ensaio de tração indireta, das misturas V0 e V10 aos 28 e aos 70 dias, bem como o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos resultados.

No Apêndice B, foram apresentados os resultados individuais dos corpos de prova, o desvio relativo máximo (DRM), e as fórmulas utilizadas nos cálculos.

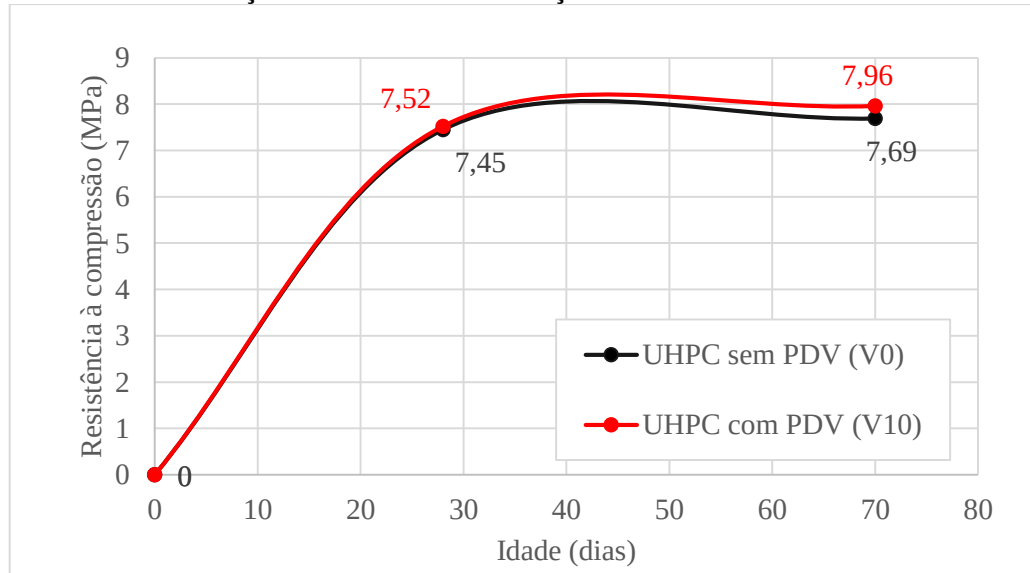
Tabela 18 – Resistência à compressão axial aos 28 e 70 dias das misturas V0 e V10

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão diametral média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação
		j (dias)	$f_{cm,j}$ (MPa)	se -	cve %
V0	0%	28	7,45	1,726	23,17%
V0	0%	70	7,69	1,882	24,46%
V10	10%	28	7,52	1,758	23,39%
V10	10%	70	7,96	1,364	17,04%

Fonte: Autora (2024)

Por meio do Gráfico 8, é possível verificar que os resultados para tração indireta dos CPs de UHPC foram semelhantes para ambos os traços (V0 e V10) e para ambas as idades (28 e 70 dias).

Soares *et al.* (2019) também verificaram que a incorporação do PDV no UHPC não forneceu diferença entre os valores de resistência à tração por compressão diametral. Os valores variaram de 9,80 MPa a 10,86 MPa aos 28 dias.

Gráfico 16 - Evolução das resistências à tração indireta do UHPC com e sem PDV.

De acordo com Santos (2021), a resistência à compressão diametral média do traço V0 (traço reproduzido neste estudo) foi de 9,42 MPa aos 28 dias. Portanto, o valor de 7,45 MPa alcançado nesta pesquisa foi ligeiramente inferior ao esperado.

A Figura 33 mostra que os corpos de prova romperam conforme o esperado, de forma longitudinal e retilínea.

Figura 33 – CP de UHPC após o ensaio de resistência à compressão diametral.



Fonte: Autora (2024)

4.3.3 Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)

Os transdutores foram dispostos de forma direta (frente a frente), como mostrado na Figura 34. Este é o arranjo mais recomendado pela norma NBR 8802 (ABNT, 2019).

Figura 34 – Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)



Fonte: Autora (2024)

Durante os ensaios de ultrassom nos CPs, percebeu-se que os valores se repetiam, na maioria das vezes. A maioria dos CPs ensaiados apresentaram velocidade de 4902 m/s por exemplo. De acordo com o Anexo A da norma NBR 8802 (ABNT, 2019), a repetição dos valores de velocidade explica a homogeneidade do material.

Ademais, os resultados das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas podem ser utilizados como indicadores de qualidade do concreto. Uma das escalas utilizadas foi produzida pelo Internacional Atomic Energy Agency em 2002 e foi apresentada no Quadro 5.

Quadro 5 – Índices estimativos da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica

Velocidade de propagação da onda (m/s)	Qualidade do concreto
>4500	Excelente
3500 a 4500	Ótimo
3000 a 3500	Bom
2000 a 3000	Regular
<2000	Ruim

Fonte: Adaptado de Internacional Atomic Energy Agency (2002) *apud* Lorenzi (2016)

A Tabela 19 mostra os valores para as médias das velocidades de pulso ultrassônico obtidas.

De acordo com a classificação apresentada no Quadro 5 e com os resultados apresentados na Tabela 19, todas as misturas enquadram-se como “excelentes”, pois apresentaram VPU maior do que 4500 m/s.

No Apêndice C, foram apresentadas todas as velocidades de pulso ultrassônico dos CPs em que foram realizados o ensaio de ultrassom.

Tabela 19 – Velocidade de pulso ultrassônico aos 28 e 70 dias das misturas V0 e V10

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Média da Velocidade de pulso ultrassônico
		<i>j</i>	<i>VPU</i>
		(dias)	(m/s)
V0	0%	28	4878,60
V0	0%	70	4910,96
V10	10%	28	4831,80
V10	10%	70	4828,88

Fonte: Autora (2024)

4.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico

O resultado para o módulo de elasticidade dinâmico foi estimado pela Eq. 3.2 e apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Módulo de elasticidade dinâmico estimado aos 70 dias das misturas V0 e V10

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Média da Velocidade de pulso ultrassônico	Massa específica	Módulo de elasticidade dinâmico estimado
		j	VP_U	ρ	E_{cd}
		(dias)	(m/s)	g/cm ³	GPa
V0	0%	70	4910,96	2,313	50,20
V10	10%	70	4828,88	2,301	48,28

Fonte: Autora (2024)

No Apêndice D foram apresentados os dados considerados e os cálculos para a massa específica e módulo de elasticidade dinâmico.

4.3.5 Módulo de elasticidade estático

Os ensaios de módulo de elasticidade estático dos UHPC foram realizados em três corpos de prova aos 28 dias, para os traços V0 e V10.

Os ensaios foram realizados no mesmo equipamento e na mesma configuração do ensaio realizado por Santos (2021), como mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Ensaio de módulo de elasticidade em UHPC

Fonte: Santos (2021)

Os resultados obtidos nos ensaios foram apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade estático aos 28 das misturas V0 e V10

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Módulo de elasticidade estático dos três CPs ensaiados	Média do módulo de elasticidade estático
		j	E_{ci}	E_{ci}
		(dias)	(GPa)	(GPa)
V0	0%	28	42,62	43,38
			44,05	
			43,46	
V10	10%	28	39,95	40,27
			39,69	
			41,18	

Fonte: Autora (2024)

O módulo de elasticidade estático das misturas V0 e V10 para a idade de 70 dias, foi estimada por meio da correlação entre o módulo dinâmico e a velocidade de pulso ultrassônico. Os resultados dos cálculos foram apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Velocidade de pulso ultrassônico aos 28 e 70 dias das misturas V0 e V10

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Média da Velocidade de pulso ultrassônico	Massa específica	Módulo de elasticidade dinâmico estimado	Módulo de elasticidade estático estimado
		j	VPU	ρ	E_{cd}	E_{ci}
		(dias)	(m/s)	(g/cm³)	(GPa)	(GPa)
V0	0%	70	4910,96	2,313	50,20	44,44
V10	10%	70	4828,88	2,301	48,28	42,30

Fonte: Autora (2024)

Assim, verificou-se que, por meio do ensaio, as misturas V0 e V10 possuem módulo de elasticidade estático de 43,38 e 40,27 GPa, respectivamente, aos 28 dias. Verificou-se também que, por meio dos cálculos de correlação com a velocidade de pulso ultrassônico, as misturas V0 e V10 possuem módulo de elasticidade estático de 44,44 e 42,30 GPa, aos 70 dias.

Como os valores são muito próximos, pode-se afirmar que o ensaio não destrutivo de ultrassom foi útil para o cálculo do módulo de elasticidade estático de uma forma mais rápida e simples.

Por meio dos resultados obtidos, verificou-se que o módulo de elasticidade estático para a mistura referência V0 (sem PDV) é 8% maior do que para a mistura V10 (com 10% de PDV) aos 28 dias.

Soliman e Tagnit-Hamou (2016) citam que o pó de vidro poderia contribuir para um aumento no módulo de elasticidade do UHPC visto que o vidro apresenta elevada rigidez (cerca de 70 GPa). Entretanto, os autores não identificaram mudanças significativas no módulo de elasticidade entre as misturas com e sem pó de vidro. Os valores variaram de 50 a 55 GPa para traços com até 50% de PDV.

Soares (2021) obteve o valor médio de 42,9 GPa para o módulo de elasticidade estático para todas as misturas (referência e com 10, 20, 30 e 50% de PDV), sem variações significativas. Os resultados variaram de 41,5 a 45,5 GPa.

Assim, é possível verificar que as variações de módulo de elasticidade estático deste estudo também não apresentam significativas diferenças entre as misturas V0 e V10.

4.3.6 Absorção de água por imersão

A Tabela 23 apresenta a taxa de absorção de água verificada nos ensaios.

Tabela 23 – Absorção das misturas V0 e V10 aos 70 dias

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Absorção de água por imersão
		<i>j</i> (dias)	<i>A</i> (%)
V0	0%	70	3,09
V10	10%	70	1,32

Fonte: Autora (2024)

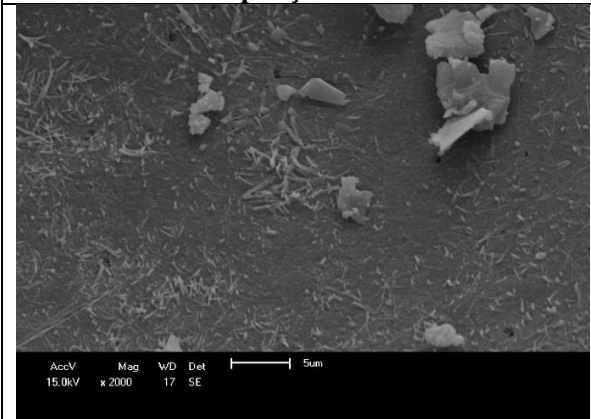
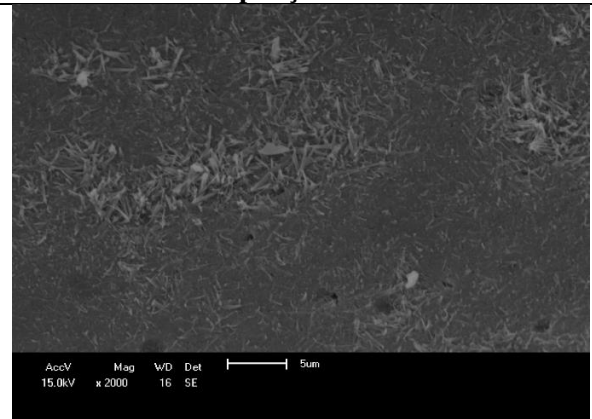
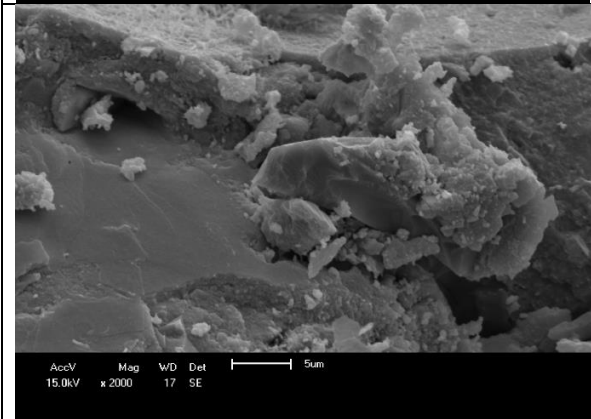
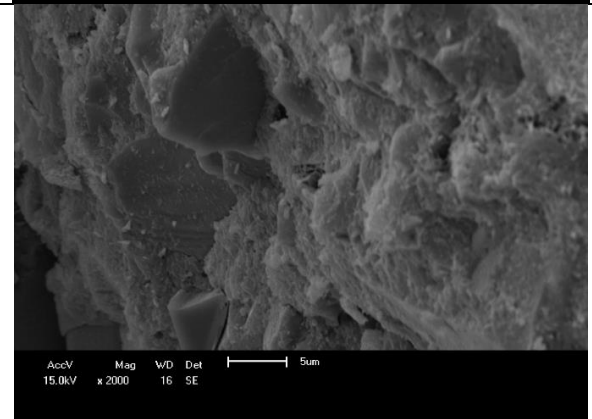
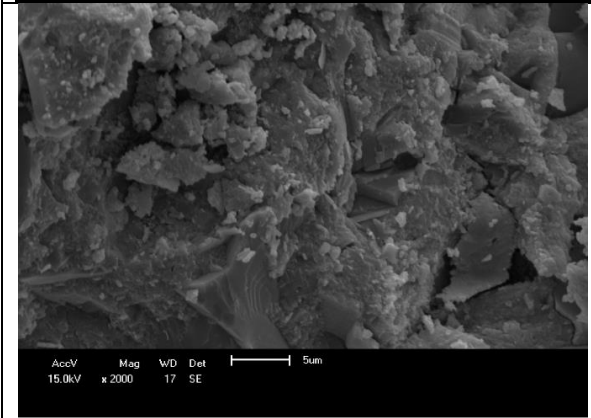
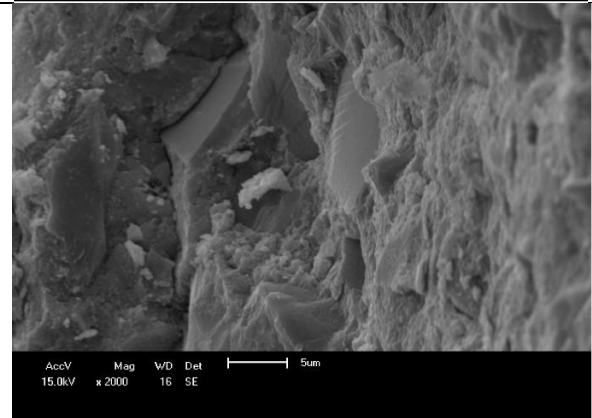
Por meio desses resultados, é possível perceber que a mistura V10 absorveu menos água do que a mistura V0, que se relaciona com o grau de compacidade do concreto.

A menor absorção da mistura V10 pode significar que a substituição de 10% de cimento por PDV na mistura, diminuiu a porosidade e promoveu maior compacidade ao compósito.

Essa característica de maior compacidade, por sua vez, pode estar atrelada à melhora do arranjo granular entre os materiais pelo efeito fíler e pela atividade pozzolânica, que na presença de água, consome a portlandita disponível na mistura formando compostos resistentes secundários, preenchendo vazios.

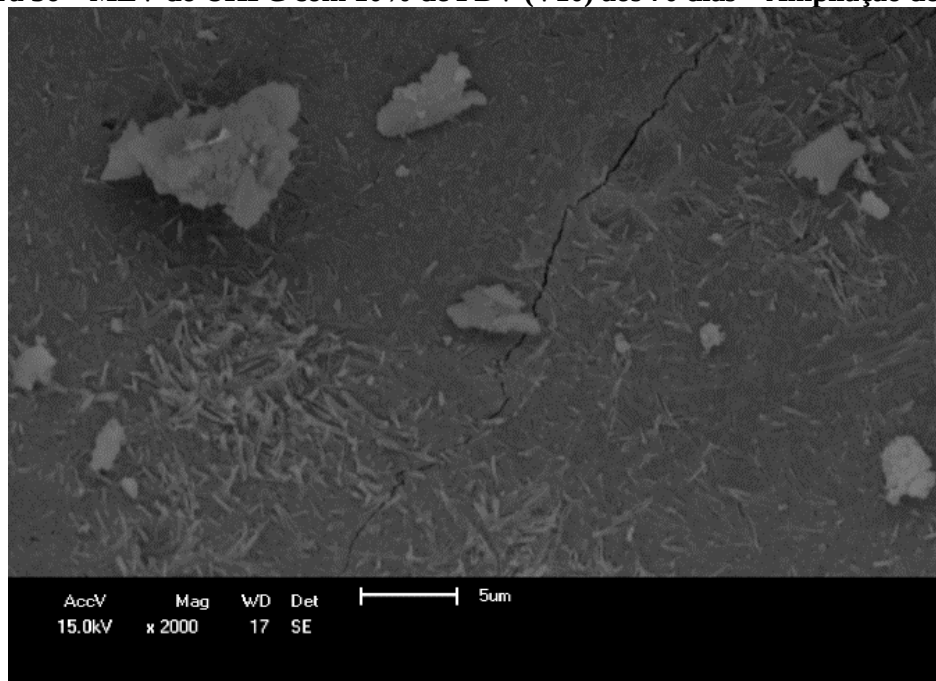
4.3.7 Microscopia eletrônica por varredura (MEV)

O MEV foi realizado em fragmentos dos CPs da mistura V0 aos 28 dias e da mistura V10 aos 28 e 70 dias. As imagens foram apresentadas

Quadro 6 – MEV do UHPC com e sem PDV aos 28 dias	
MEV do UHPC sem PDV (V0) aos 28 dias – Ampliação 2000x	MEV do UHPC com PDV (V10) aos 28 dias – Ampliação 2000x
	
	
	

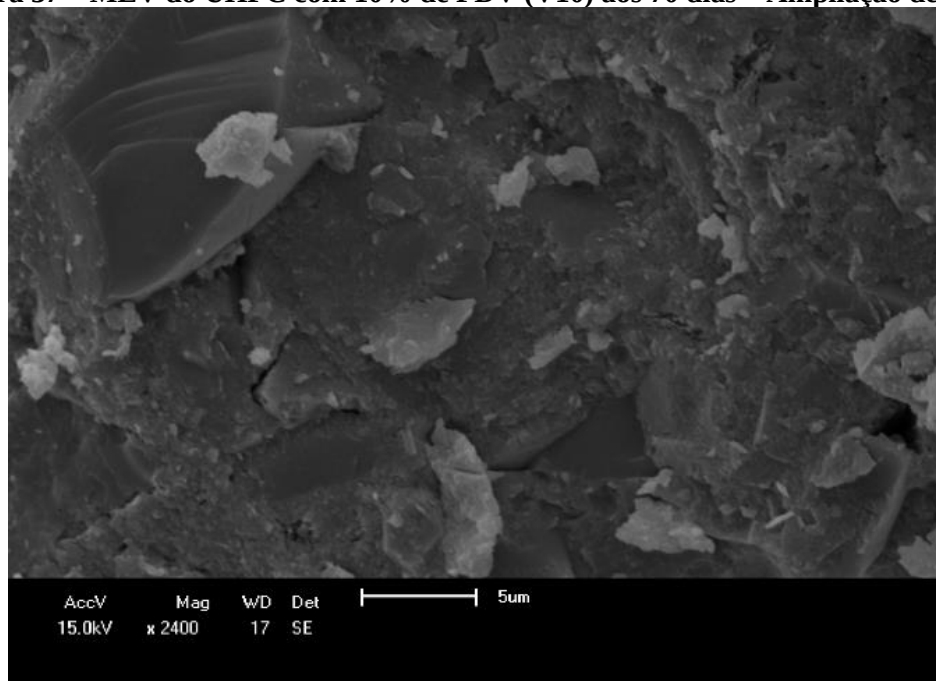
Fonte: Autora (2024)

Figura 36 – MEV do UHPC com 10% de PDV (V10) aos 70 dias – Ampliação de 2000x



Fonte: Autora (2024)

Figura 37 – MEV do UHPC com 10% de PDV (V10) aos 70 dias – Ampliação de 2000x



Fonte: Autora (2024)

4.3.8 Síntese dos resultados

A partir dos resultados obtidos para o UHPC foi possível identificar que, no estado fresco, a substituição parcial do cimento pelo PDV (de partículas menores do que $300\mu\text{m}$ > partículas do cimento) prejudicou a fluidez da mistura.

No estado endurecido, para o UHPC em temperatura ambiente, a substituição de 20% de cimento por PDV resultou em um aumento de 60% de resistência à compressão axial dos 7 aos 70 dias. Entretanto, sua consistência no estado fresco não se mostrou adequada para o UHPC.

Por outro lado, a substituição de 10% de cimento por PDV se mostrou benéfica tanto para o estado fresco quanto para o estado endurecido, pois promoveu um ganho de resistência à compressão axial de 13% dos 28 aos 70 dias, enquanto a mistura referência V0 (sem PDV), manteve o mesmo patamar de resistência ao longo do tempo.

Esse resultado pode ser explicado pelo refinamento dos poros do UHPC com o incremento de PDV na mistura; e/ou pela atividade pozolânica do material que proporciona evolução da resistência em idades tardias.

Conforme a análise do PDV utilizado nessa pesquisa, a análise química do material no ensaio de FRX e o comportamento predominantemente amorfo no ensaio de DRX, mostrou que o material é passível de se classificar como um material pozolânico. Entretanto, o índice de atividade pozolânica, verificado pelo método Chapelle modificado, teve resultado abaixo da referência determinada para pozolanas. Esse resultado pode estar atrelado à granulometria do PDV que possui partículas menores do que $300\mu\text{m}$. Entre as pesquisas referenciadas neste estudo, há um consenso de que o índice de atividade pozolânica do PDV aumenta à medida em que o tamanho da partícula diminui para partículas menores do que $100\mu\text{m}$.

4.4 UHPC SOB ALTAS TEMPERATURAS

4.4.1 Análise do efeito *spalling*

4.4.1.1 Influência da taxa de aquecimento

Nessa etapa, os CPs foram levados da estufa (a 100°C) para o forno (pré-aquecido a 100°C), e submetidos à diferentes taxas de temperatura, especificamente 1, 5 e $15^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$.

Primeiramente, seis CPs secos da mistura de UHPC sem PDV (V0) foram submetidos à uma taxa de aquecimento de $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Passados 16 minutos, na temperatura de 340°C , verificou-se que os CPs começaram a explodir.

Então, o aquecimento do forno foi pausado e aguardou-se o resfriamento lento e natural do forno até a temperatura aproximada de $90\text{-}100^{\circ}\text{C}$.

A taxa em que o forno esfriava com a porta fechada era de 1°C por minuto, aproximadamente.

Ao abrir o forno, verificou-se que todos os CPs haviam explodido. Os CPs se desmancharam em pequenos fragmentos, como mostra a Figura 38.

Figura 38 – CPs de UHPC sem PDV (V0) antes e após serem aquecidos a uma taxa de 15°C/min



Fonte: Autora (2024)

O material branco no meio dos fragmentos de concreto é alumina, material que reveste o forno. Com as explosões, o revestimento do forno foi danificado.

Na sequência, seis CPs secos da mistura de UHPC sem PDV (V0) foram submetidos a uma taxa de aquecimento de 5°C/min.

Passados 52 minutos, na temperatura de 360°C, verificou-se que os CPs começaram a explodir. O aquecimento foi pausado e aguardou-se o forno atingir a temperatura próxima de 100°C.

Nesse ensaio, ao abrir o forno, verificou-se que os CPs explodiram assim como no ensaio anterior, mas, desta vez se fragmentaram em pedaços maiores, como é possível verificar na Figura 39.

Figura 39 – CPs de UHPC sem PDV (V0) após serem aquecidos a uma taxa de 5°C/min



Fonte: Autora (2024)

Posteriormente, outros seis CPs secos da mistura de UHPC sem PDV (V0) foram levados ao forno, desta vez para serem aquecidos a uma taxa de 1°C/minuto.

Passados 243 minutos, na temperatura de 343°C, verificou-se que os CPs começaram a explodir. O aquecimento do forno foi pausado para esfriar.

Na temperatura de 100°C aproximadamente, ao abrir o forno, verificou-se que três CPs haviam explodido e três estavam íntegros.

Os CPs que explodiram também se fragmentaram em pedaços maiores, como pode ser visto na Figura 40.

Figura 40 – Três dos CPs de UHPC sem PDV (V0) após serem aquecidos a uma taxa de 1°C/min



Fonte: Autora (2024)

A partir do exposto, verificou-se que para o traço V0 de UHPC, sem PDV, os CPs apresentaram intensas explosões (efeito *spalling*) nas três taxas de aquecimento (1, 5 e 15°C/minuto), antes mesmo de atingir a temperatura de 400°C.

Na taxa de 15°C/minuto, as explosões foram mais severas devido à aparência dos CPs pós-forno, em que foram visualizados os fragmentos em pequenos pedaços.

O Quadro 8 apresenta um resumo dos resultados obtidos para o traço V0 nas diferentes taxas de aquecimento.

Quadro 7 – Resultados da análise de *spalling* no UHPC sem PDV (V0) variando a taxa de aquecimento

ID	Porcent. de PDV em subst. ao cimento	Idade	Estado	Taxa de aquecimento	Temperatura de <i>spalling</i>	Quantidade de CPs íntegros/ensaiados
		<i>j</i>	(seco ou saturado)	°C/minuto	°C	
		(dias)				
V0	0%	70	Seco	1	343	3/6
V0	0%	70	Seco	5	360	0/6
V0	0%	70	Seco	15	340	0/6

Fonte: Autora (2024)

Na sequência, os mesmos procedimentos realizados para o traço de UHPC sem PDV (V0), foram reproduzidos para os traços de UHPC com 10% de substituição de cimento por PDV (V10).

Então, seis CPs da mistura V10 foram submetidos a taxa de aquecimento de 15°C/min. Quando a temperatura chegou a 400°C, foi possível ouvir um ruído de baixa intensidade do forno e o aquecimento foi pausado para verificação.

Ao abrir o forno, verificou-se que dois CPs haviam se fragmentado em poucas partes e quatro estavam íntegros, como pode ser visto na Figura 41.

Portanto, o UHPC com PDV (V10) não apresentou efeito explosivo a ser aquecido a uma taxa de 15°C/min.

Figura 41 – CPs de UHPC com PDV (V10) após serem aquecidos a uma taxa de 15°C/min



Fonte: Autora (2024)

Para a taxa de aquecimento de 5°C/min, os seis CPs do UHPC com PDV (V10) explodiram intensamente e se fragmentaram em pequenos pedaços, como mostra a Figura 42. O efeito *spalling* foi verificado aos 348°C.

Figura 42 – CPs de UHPC com PDV (V10) após serem aquecidos a uma taxa de 5°C/min



Fonte: Autora (2024)

Para a taxa de aquecimento de 1°C/min, os seis CPs do UHPC com PDV (V10) também explodiram intensamente e se fragmentaram em pequenos pedaços, como mostra a Figura 42. Entretanto, o efeito *spalling* foi verificado somente aos 480°C.

Figura 43 - CPs de UHPC com PDV (V10) após serem aquecidos a uma taxa de 1°C/min



Fonte: Autora (2024)

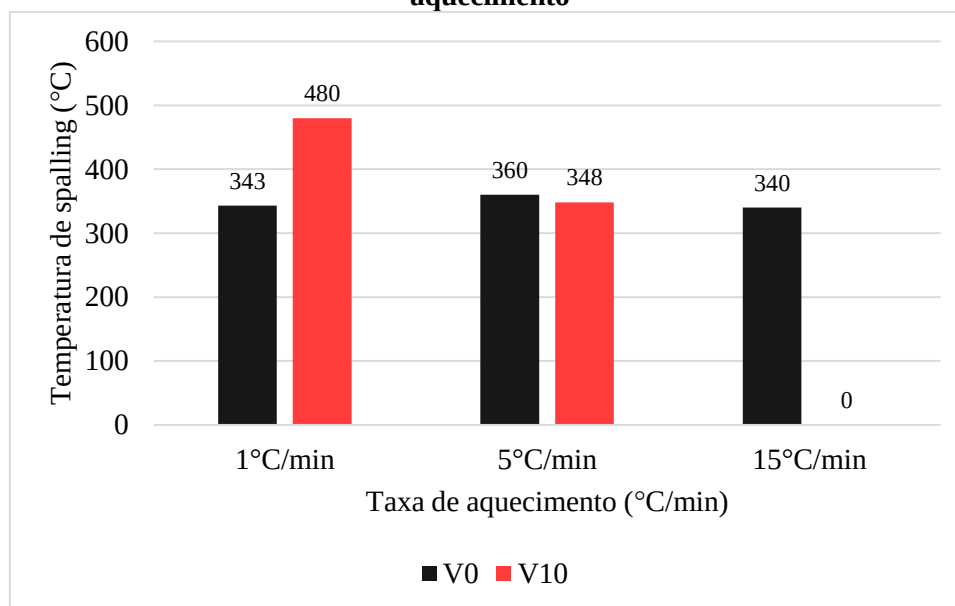
O Quadro 8 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os traço V0 e V10 nas diferentes taxas de aquecimento. Os resultados também foram dispostos no Gráfico 17.

Quadro 8 – Resultados da análise de *spalling* dos traços de UHPC (V0 e V10) variando a taxa de aquecimento

ID	Porcent. de PDV em subst. ao cimento	Idade	Estado	Taxa de aquecimento	Temperatura de <i>spalling</i>	Quantidade de CPs íntegros/ensaiados
		<i>j</i>	(seco ou saturado)	°C/minuto	°C	
		(dias)				
V0	0%	70	Seco	1	343	3/6
V0	0%	70	Seco	5	360	0/6
V0	0%	70	Seco	15	340	0/6
V10	10%	70	Seco	1	480	0/6
V10	10%	70	Seco	5	348	0/6
V10	10%	70	Seco	15	-	4/6

Fonte: Autora (2024)

Gráfico 17 – Temperatura de *spalling* dos traços de UHPC (V0 e V10) secos variando a taxa de aquecimento



Fonte: Autora (2024)

O aumento da temperatura faz com que as águas presentes no concreto (livre e quimicamente combinada) evaporem. No UHPC, o vapor de água não consegue sair facilmente devido à sua densa microestrutura e reduzida quantidade de poros, o que gera uma pressão interna gradativa no material. Quando essa pressão excede a resistência à tração do concreto, ocorre o efeito *spalling* (MISSEMER *et al.*, 2019; AMRAN *et al.*, 2023).

Devido a isso, já era esperado que o concreto pudesse apresentar efeito *spalling* diante dos ensaios a elevadas temperaturas.

Por meio do Gráfico 17, é possível perceber que quanto maior a taxa de temperatura aplicada sobre o UHPC sem PDV, menor foi a temperatura de ocorrência do efeito *spalling*. Além disso, verificou-se também que a temperatura de 15°C/min no UHPC sem PDV foi que a que causou explosões de maior intensidade nos CPs.

Yang e Peng (2016), também verificaram que taxas de aquecimento mais altas intensificam a gravidade da fragmentação do UHPC.

Comparando o comportamento do UHPC com e sem PDV, verificou-se que a uma taxa de aquecimento de 1°C/min, o UHPC sem PDV explodiu com 343°C, enquanto o UHPC com PDV explodiu com 480°C, ou seja, a mistura com PDV resistiu 137°C a mais do que a mistura sem PDV.

Pan *et al.* (2017) verificaram que o PDV reduziu em 32% a condutividade térmica das misturas em comparação com a mistura referência (sem PDV). Segundo os autores, a baixa condutividade térmica indica que a transferência de calor no material é lenta. Então, para as misturas com PDV, o tempo necessário para atingir as temperaturas alvo é maior em comparação com a mistura referência.

Essa verificação pode explicar o motivo pelo qual o UHPC com PDV (V10), a uma taxa de aquecimento de 1°C/min, apresentou efeito *spalling* em uma temperatura mais alta do que a mistura referência. Entretanto, esse efeito não foi observado para as outras taxas de aquecimento analisadas (5 e 15°C/min).

A 5°C/min, os comportamentos de ambos os traços, com e sem PDV, foram semelhantes, com explosões entre 348 e 360°C respectivamente.

Além disso, foi possível verificar que o único ensaio que não apresentou efeito explosivo foi o do UHPC com PDV (V10) submetido a uma taxa de aquecimento de 15°C/min, por isso seu valor não foi apresentado do Gráfico 17. Para essa taxa de aquecimento, a mistura V10 rachou aos 400°C, mas não explodiu.

Ling *et al* (2012) analisaram que a incorporação de PDV no concreto poderia auxiliar o compósito a manter sua resistência após a exposição a altas temperaturas, devido ao derretimento e à ressolidificação do PDV na matriz do concreto. Entretanto, esse efeito ocorreria com a fusão do vidro, em torno de 800°C.

No caso em questão, foi verificado que o pó de vidro permitiu que o UHPC se mantivesse íntegro entre o intervalo de 343-480°C, na taxa de aquecimento de 15°C/min. Em 480°C, o material se desintegrou sem lascas ou explodir.

4.4.1.2 Influência do teor de umidade

Nesta etapa, os CPs submetidos à altas temperaturas permaneceram em câmara úmida até os 70 dias, ou seja, não passaram pela secagem em estufa e se apresentavam com alto teor de umidade, praticamente saturados.

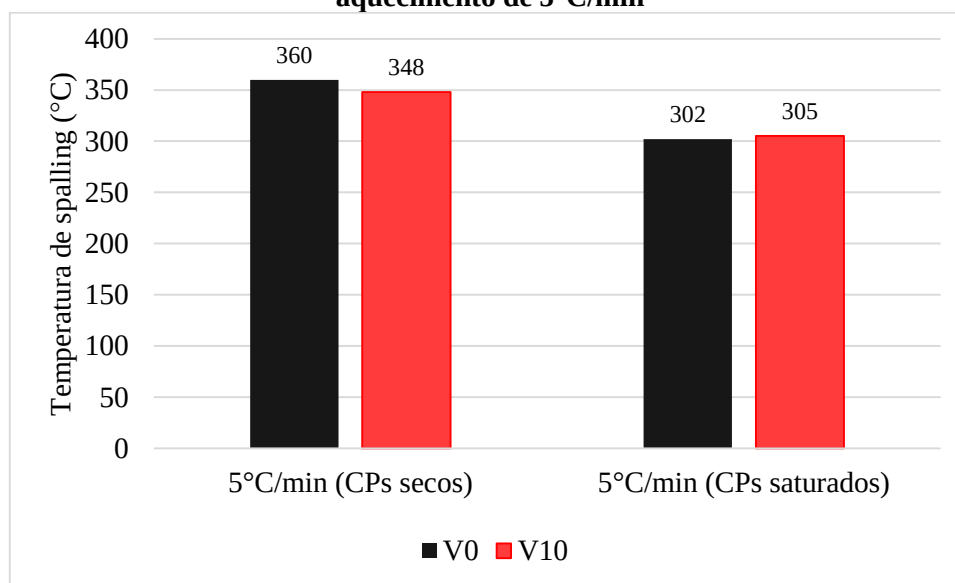
Assim, os CPs de ambos os traços foram aquecidos a uma taxa fixa de 5°C/min, pois foi nessa taxa que os CPs de UHPC (V0 e V10), no estado seco, tiveram resultados semelhantes entre si.

Na análise anterior, os CPs secos de UHPC com e sem PDV, aquecidos a 5°C/min, explodiram com 348 e 360°C, respectivamente.

Entretanto, com os CPs saturados, verificou-se que o efeito *spalling* ocorreu a uma temperatura mais baixa, especificamente aos 305 e 302°C para os CPs de UHPC com e sem PDV, respectivamente. Os resultados foram mostrados no Gráfico 18.

Nos dois ensaios realizados, três CPs explodiram e três se mantiveram íntegros.

Gráfico 18 - Temperatura de *spalling* dos traços de UHPC (V0 e V10) saturados a taxa de aquecimento de 5°C/min



Fonte: Autora (2024)

Assim, verificou-se que ambas as misturas de UHPC (V0 e V10) apresentaram efeito explosivo em temperaturas mais baixas. A temperatura de *spalling* diminuiu cerca de 19,20% para V0 e 14,10% para V10 em relação à temperatura de ocorrência de *spalling* dos CPs secos.

4.4.1.3 Influência do choque térmico

Por fim, realizou-se a análise do choque térmico nos CPs de UHPC submetidos a uma temperatura de 300°C, aquecidos a uma taxa de 5°C/min.

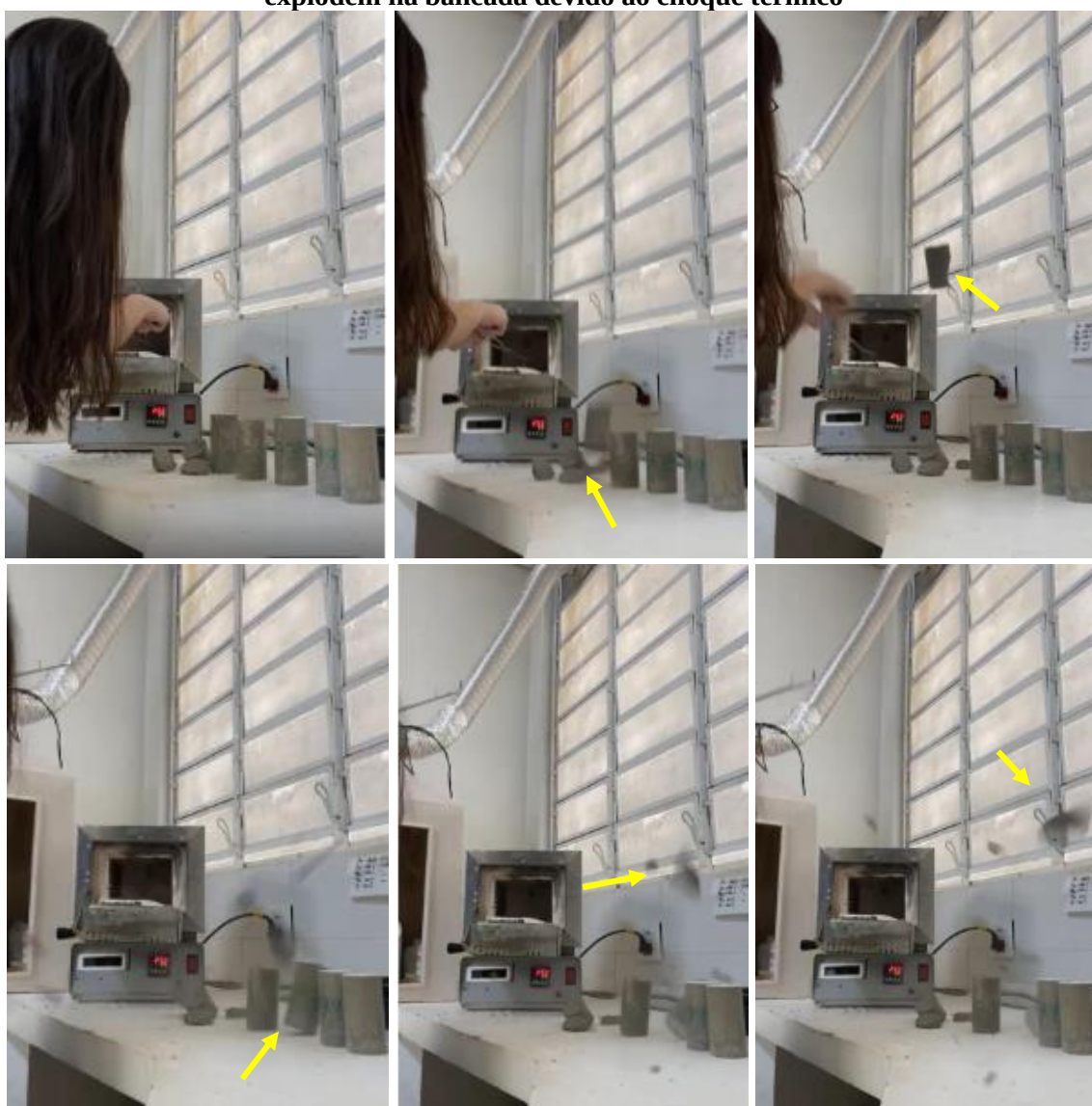
Essa temperatura e taxa de aquecimento foram escolhidas com a certeza de que não ocorreria o efeito *spalling* dentro do forno, conforme os resultados obtidos nos ensaios anteriores.

Portanto, após o aquecimento dos CPs de UHPC com PDV (V10) até 300°C, o aquecimento foi pausado, o forno foi aberto e os CPs foram retirados do forno e colocados sobre a bancada para iniciarem a troca brusca de calor com o meio.

Logo após a abertura da porta do forno aos 300°C, o primeiro CP explodiu.

Passados alguns segundos que os CPs estavam na bancada, outros dois CPs explodiram. A Figura 44 mostra a sequência dos momentos em que dois CPs explodem na bancada.

Figura 44 – Sequência de imagens de um vídeo realizado no momento que os CPs explodem na bancada devido ao choque térmico



Fonte: Autora (2024)

Para os CPs de UHPC sem PDV, o mesmo teste foi realizado, quatro deles também explodiram na mesma intensidade, segundos após serem colocados na bancada.

Portanto, verificou-se que o UHPC não apresentou resistência ao choque térmico de 300°C para temperatura ambiente (aproximadamente 26°C).

4.4.1.4 Síntese dos resultados

A partir dos resultados obtidos nessa fase da pesquisa, em relação à ocorrência do efeito *spalling* sob altas temperaturas, foi possível observar que o pó de vidro influenciou apenas no comportamento do UHPC seco submetido à uma taxa de temperatura de 15°C/min, ocasião em que o UHPC com PDV (V10) não apresentaram efeito explosivo, diferentemente da mistura referência V0, cuja explosão foi a que ocorreu de forma mais intensa.

Além disso, verificou-se também que o PDV manteve o CP íntegro na faixa de 343°C a 480°C, a uma taxa de temperatura de 1°C/min, diferentemente do UHPC referência (V0) que explodiu aos 343°C.

Ademais, foi possível verificar que quanto maior a taxa de aquecimento, mais severas são as explosões e lascamentos do UHPC frente a altas temperaturas.

Foi verificado também que teor de umidade fez com que o efeito *spalling* se apresentasse em temperaturas mais baixas para ambos os traços de UHPC (com e sem PDV) e que o UHPC não apresentou resistência ao choque térmico.

Nos ensaios de teor de umidade e de choque térmico realizados, o PDV não influenciou nos resultados, pois apresentou comportamento semelhantes à mistura referência V0.

4.4.2 Propriedades residuais

A partir dos resultados obtidos nos ensaios anteriores, definiu-se as temperaturas e taxas de aquecimento em que seria possível analisar as propriedades residuais dos CPs.

Assim, ambos os traços de UHPC (V0 e V10) foram submetidos a temperaturas de 200 e 300°C, a uma taxa de 5°C/minuto, sendo mantidos nessas temperaturas de ensaio por 60 minutos.

Além disso, os CPs de ambos os traços de UHPC (V0 e V10) também foram submetidos a temperatura de 400°C, a uma taxa de 1°C/minuto, a fim de confirmar o comportamento dos dois concretos e analisar suas propriedades residuais após a manutenção da temperatura por 60 minutos.

De todos os ensaios citados, o único que não foi possível de obter suas propriedades residuais devido a ocorrência do efeito *spalling* foi o UHPC sem PDV submetido a 400°C a

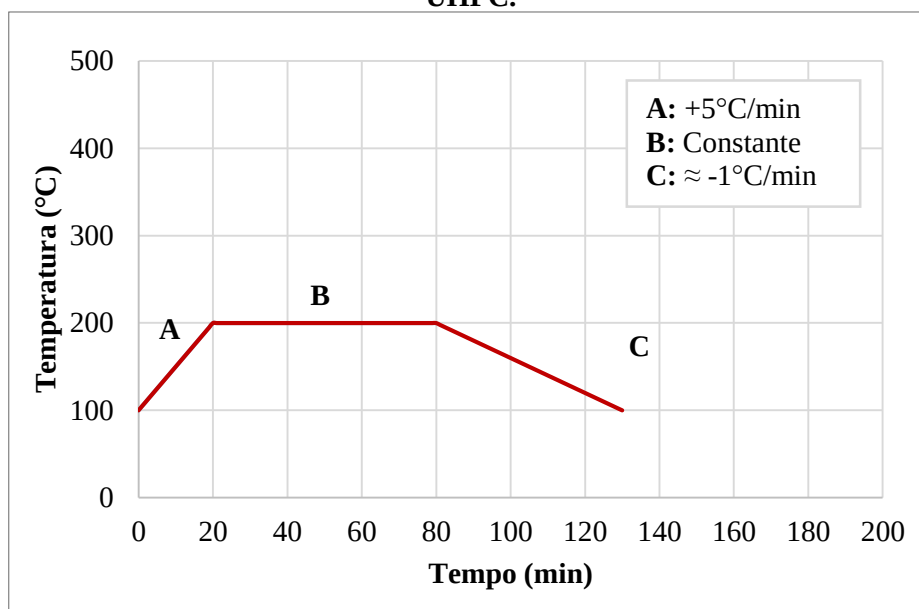
taxa de 1°C/minuto. Entretanto, esse resultado já era esperado, conforme os resultados dos ensaios realizados anteriormente.

Por fim, os CPs mantidos em estufa a 100°C, dos 64 aos 70 dias de idade, também tiveram suas propriedades mecânicas caracterizadas.

4.4.2.1 Resistência à compressão axial

O Gráfico 19 mostra a configuração do ensaio dos CPs que foram submetidos a temperatura de até 200°C.

Gráfico 19 – Configuração do ensaio a 200°C para determinação das propriedades residuais do UHPC.



Fonte: Autora (2024)

Como já esperado, nenhum CP de UHPC apresentou efeito *spalling* a 200°C, na taxa de temperatura de 5°C/min, independentemente do traço (V0 ou V10). Assim, foi possível determinar suas propriedades residuais pós-forno.

Na Tabela 24, foram apresentados os valores das resistências à compressão axial das misturas V0 e V10 aos 70 dias, após serem submetidos a temperatura de 200°C, a uma taxa de aquecimento de 5°C/min. A tabela também apresenta o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos resultados.

No Apêndice A, foram apresentados os resultados individuais dos corpos de prova, o desvio relativo máximo (DRM), e as fórmulas utilizadas nos cálculos.

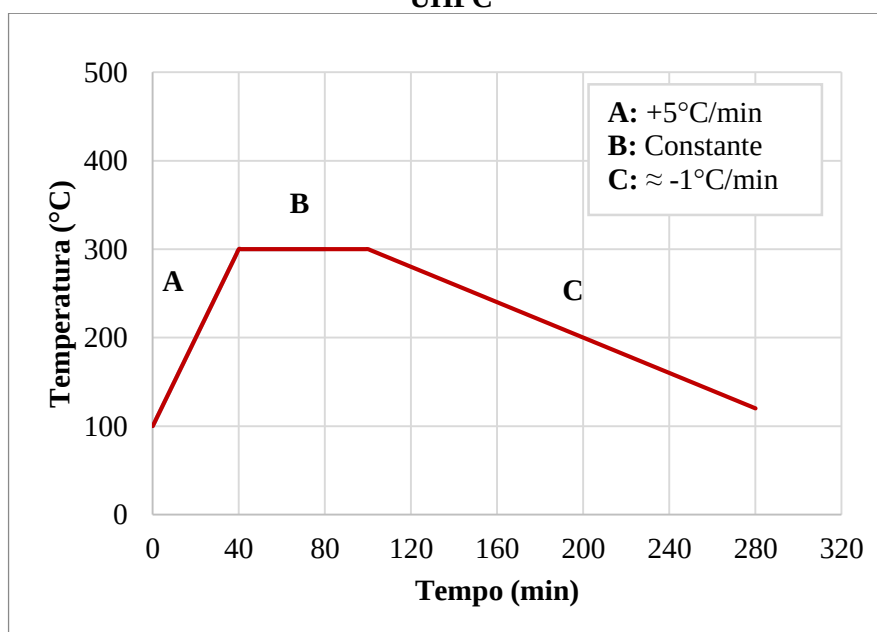
Tabela 24 – Resistência à compressão axial aos 70 dias dos CPs de UHPC com e sem PDV, após serem submetidas à temperatura de 200°C.

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão axial média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação
		j	$f_{cm,j}$	se	C_{ve}
		(dias)	(MPa)	-	%
V0	0%	70	142,904	10,738	7,51%
V10	10%	70	161,122	7,002	4,35%

Fonte: Autora (2024)

De forma análoga, o Gráfico 20 mostra a configuração do ensaio dos CPs que foram submetidos a temperatura de até 300°C.

Gráfico 20 – Configuração do ensaio a 300°C para determinação das propriedades residuais do UHPC



Fonte: Autora (2024)

Como já esperado, nenhum CP de UHPC apresentou efeito *spalling* a 300°C, na taxa de temperatura de 5°C/min, independentemente do traço (V0 ou V10).

Na Tabela 25, foram apresentados os valores das resistências à compressão axial das misturas V0 e V10 aos 70 dias, após serem submetidos a temperatura de 300°C, a uma taxa de aquecimento de 5°C/min. A tabela também apresenta o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos resultados. No Apêndice A, foram apresentados os resultados individuais dos corpos de prova, o desvio relativo máximo (DRM), e as fórmulas utilizadas nos cálculos.

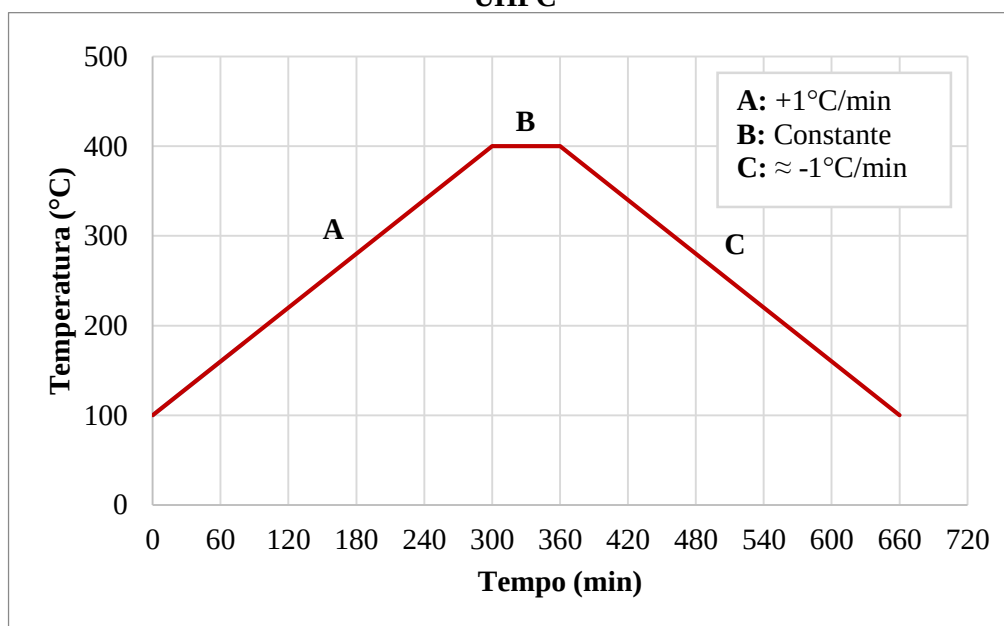
Tabela 25 – Resistência à compressão axial aos 70 dias dos CPs de UHPC com e sem PDV, após serem submetidas à temperatura de 300°C

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão axial média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação
		j	$f_{cm,j}$	se	C_{ve}
		(dias)	(MPa)	-	%
V0	0%	70	155,480	5,204	3,35%
V10	10%	70	167,454	6,145	3,67%

Fonte: Autora (2024)

Por fim, o Gráfico 21 mostra a configuração do ensaio dos CPs que foram submetidos a temperatura de até 400°C, dessa vez a uma taxa de 1°C/min a fim de evitar a ocorrência de *spalling*.

Gráfico 21 – Configuração do ensaio a 400°C para determinação das propriedades residuais do UHPC



Fonte: Autora (2024)

Os CPs de UHPC sem PDV (V0) explodiram, assim como no ensaio realizado anteriormente. Portanto, para esse traço não foi possível determinar suas propriedades residuais a 400°C.

Entretanto, os CPs de UHPC com PDV (V10) não explodiram, como também já era esperado devido resultados anteriores.

Na Tabela 26, foram apresentados os valores das resistências à compressão axial das misturas V10 aos 70 dias, após serem submetidos a temperatura de 400°C, a uma taxa de

aquecimento de 1°C/min. A tabela também apresenta o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos resultados.

No Apêndice A, foram apresentados os resultados individuais dos corpos de prova, o desvio relativo máximo (DRM), e as fórmulas utilizadas nos cálculos.

Tabela 26 – Resistência à compressão axial aos 70 dias dos CPs de UHPC com e sem PDV, após serem submetidas à temperatura de 300°C

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão axial média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação
		j (dias)	$f_{cm,j}$ (MPa)	se -	C_{ve} %
V0	0%	70	-	-	-
V10	10%	70	162,439	3,082	1,90%

Fonte: Autora (2024)

Por fim, os CPs secos em estufa dos 64 até os 70 dias de idades, à 100°C, também foram caracterizados quanto à sua resistência mecânica. A Tabela 27 mostra os resultados obtidos para a resistência à compressão axial.

Tabela 27 – Resistência à compressão axial aos 70 dias dos CPs de UHPC com e sem PDV, após serem submetidas à temperatura de 100°C

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão axial média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação
		j (dias)	$f_{cm,j}$ (MPa)	se -	C_{ve} %
V0	0%	70	173,253	2,497	1,44%
V10	10%	70	170,608	5,771	3,38%

Fonte: Autora (2024)

Com as propriedades residuais determinadas, foi possível identificar que os CPs de UHPC (com e sem PDV), quando submetidos à temperaturas de 100, 200 e 300°C, apresentaram resistências à compressão axial superiores às suas resistências verificadas em temperatura ambiente, como pode ser visualizado no Gráfico 22.

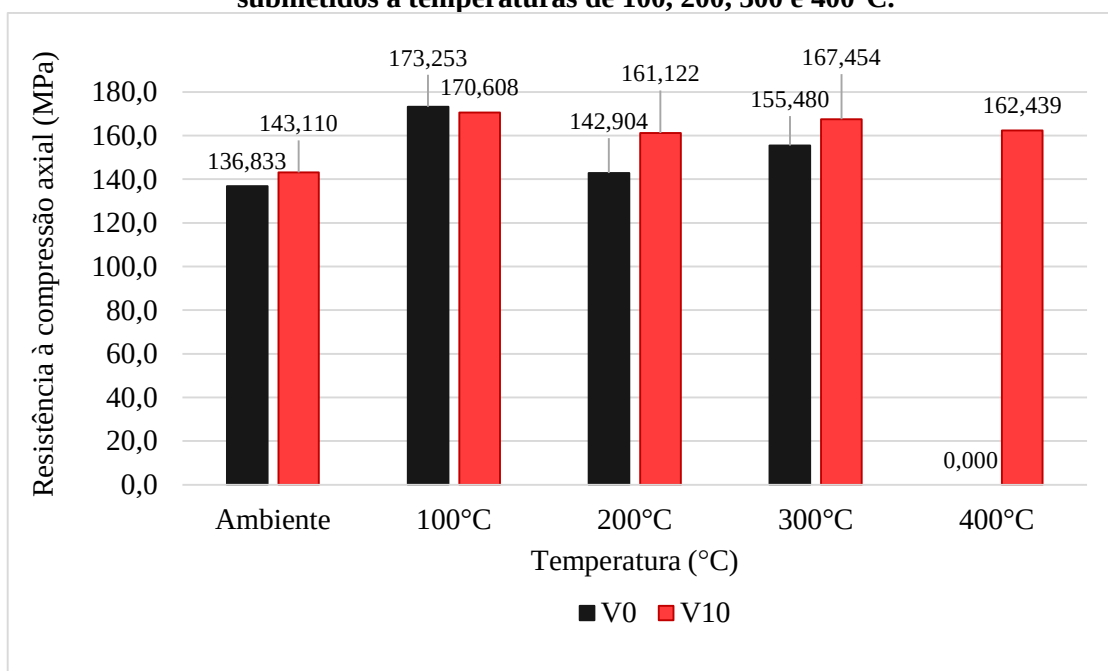
Na temperatura de 400°C e para a taxa de aquecimento de 1°C/min, o UHPC com PDV (V10) também apresentou resistência à compressão axial superior à resistência em temperatura ambiente, enquanto o UHPC sem PDV explodiu.

Além disso, verificou-se que o aumento da resistência do UHPC foi mais acentuado aos 100°C para as duas misturas (V0 e V10) e que depois diminuiu para as demais temperaturas.

A mistura V0 atingiu 173 MPa aos 100°C, 26,6% maior do que em temperatura ambiente (137 MPa), caiu para 142 e 155 MPa aos 200 e 300°C e explodiu antes de chegar aos 400°C.

Já a mistura V10 atingiu 170 MPa aos 100°C, 19,2% maior do que em temperatura ambiente (143 MPa), caindo para 161, 167 e 162 aos 200, 300 e 400°C.

Gráfico 22 – Resistência à compressão residual dos CPs de UHPC à temperatura ambiente e submetidos a temperaturas de 100, 200, 300 e 400°C.



Fonte: Autora (2024)

Han *et al.* (2024) também observaram esse efeito de elevação da resistência no UHPC em temperaturas de até 400°C, a uma taxa de aquecimento de 5°C/min. Os autores explicam que a resistência aumenta inicialmente com a elevação da temperatura devido à presença de grãos de cimento anidro da mistura que vão se hidratando e formando compostos resistentes ao passo em que água presente nos poros mais internos do concreto vai sendo evaporada.

Han *et al.* (2024) perceberam que a resistência à compressão do UHPC caiu bruscamente de 400 para 600°C.

No presente estudo, não foi possível verificar queda brusca de resistência com o aumento de temperatura, pois os todos os CPs explodiram antes de apresentar esse comportamento.

4.4.2.2 Resistência à tração indireta por compressão diametral

Na Tabela 28, foram apresentados os valores das resistências à compressão diametral no ensaio de tração indireta das misturas V0 e V10, aos 70 dias, após serem submetidos à temperatura de 200°C, a uma taxa de 5°C/min. Além disso, nesta tabela também foi apresentado o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos resultados.

No Apêndice B, foram apresentados os resultados individuais dos corpos de prova, o desvio relativo máximo (DRM), e as fórmulas utilizadas nos cálculos.

Tabela 28 – Resistência à compressão axial aos 70 dias das misturas V0 e V10, após serem submetidos à temperatura de 200°C

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão diametral média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação
		<i>j</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>
		(dias)	(MPa)	-	%
V0	0%	70	5,816	0,779	13,40%
V10	10%	70	6,561	0,521	7,95%

Fonte: Autora (2024)

Da mesma forma, a Tabela 29 mostra os resultados obtidos para tração indireta dos CPs de UHPC que foram submetidos a temperatura de 300°C, a uma taxa de 5°C/min.

Tabela 29 – Resistência à compressão axial aos 70 dias das misturas V0 e V10, após serem submetidos à temperatura de 300°C

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão diametral média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação
		<i>j</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>
		(dias)	(MPa)	-	%
V0	0%	70	5,353	0,540	10,09%
V10	10%	70	6,429	1,235	19,21%

Fonte: Autora (2024)

Já na Tabela 29 foram apresentados os resultados obtidos para tração indireta dos CPs de UHPC que foram aquecidos a temperatura de 400°C, a uma taxa de 1°C/min.

Tabela 30 – Resistência à compressão axial aos 70 dias das misturas V0 e V10, após serem submetidos à temperatura de 400°C

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão diametral média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação
		j	$f_{cm,j}$	se	cve
		(dias)	(MPa)	-	%
V0	0%	70	-	-	-
V10	10%	70	5,182	0,167	3,22%

Fonte: Autora (2024)

Por fim, os CPs secos em estufa dos 64 até os 70 dias de idades, à 100°C, também foram caracterizados quanto à sua resistência mecânica. A Tabela 27 mostra os resultados obtidos para a resistência à compressão diametral.

Tabela 31 – Resistência à compressão axial aos 70 dias das misturas V0 e V10, após serem submetidos à temperatura de 100°C

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Resistência à compressão diametral média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação
		j	$f_{cm,j}$	se	cve
		(dias)	(MPa)	-	%
V0	0%	70	7,978	1,121	14,04%
V10	10%	70	7,505	1,444	19,24%

Fonte: Autora (2024)

4.4.2.3 Velocidade de pulso ultrassônico (VPU)

A Tabela 32 mostra os valores para as médias das velocidades de pulso ultrassônico obtidas dos CPs pós-forno.

No Apêndice C, foram apresentadas todas as velocidades de pulso ultrassônico dos CPs em que foram realizados o ensaio de ultrassom.

Tabela 32 – Velocidade de pulso ultrassônico aos 70 dias das misturas V0 e V10 pós-forno

ID	Porcentagem de PDV em substituição ao cimento	Idade	Temperatura a que foi submetido	Média da Velocidade de pulso ultrassônico do UHPC pós-forno
		j (dias)	T_e (°C)	VPU (m/s)
V0	0%	70	100	4937,50
V0	0%	70	200	4874,50
V0	0%	70	300	4863,83
V0	0%	70	400	-
V10	10%	70	100	4902,00
V10	10%	70	200	4863,00
V10	10%	70	300	4828,00
V10	10%	70	400	3802,17

Fonte: Autora (2024)

O resultado para a mistura de UHPC sem PDV (V0) proveniente do ensaio a 400°C não foi medida pois o CP explodiu dentro do forno.

Para a mistura de UHPC com PDV (V10) referente ao ensaio de mesma temperatura, verificou-se que o CP não explodiu e que foi a única mistura que apresentou valor de VPU inferior ao valor antes do forno.

Os outros valores de VPU se mantiveram no mesmo patamar de velocidade dos CPs antes de serem submetidos as altas temperaturas.

De acordo com a classificação apresentada no Quadro 5, todas as misturas enquadram-se na qualidade “excelente”, pois apresentaram VPU maior do que 4500 m/s. Exceto para os CPs submetidos a 400°C, que possui qualidade “ótima” pois apresentam VPU entre 3500 e 4500 m/s.

4.4.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico e estático

O resultado para o módulo de elasticidade dinâmico para o UHPC aos 70 dias, após os ensaios a elevadas temperaturas, foi estimado pela **Eq. 3.2**, a partir dos resultados da ultrassom.

O módulo de elasticidade estático, por sua vez, foi estimado por meio da correlação entre o módulo dinâmico e a velocidade de pulso ultrassônico.

Os resultados dos cálculos foram apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Módulo de elasticidade aos 70 dias das misturas V0 e V10, após o ensaio a elevadas temperaturas

ID	Porcent. de PDV em subst.. ao cimento	Idade	Temp. do ensaio	Média da Velocidade de pulso ultrassônico	Massa específica	Módulo de elasticidade dinâmico estimado	Módulo de elasticidade estático estimado
		(dias)	(°C)	(m/s)	(g/cm³)	(GPa)	(GPa)
V0	0%	70	100	4937,50	2,313	50,20	44,44
V10	10%	70	100	4902,00	2,301	48,28	42,30
V0	0%	70	200	4874,50	2,290	48,97	43,35
V10	10%	70	200	4863,00	2,257	48,04	42,82
V0	0%	70	300	4863,83	2,308	49,14	43,22
V10	10%	70	300	4828,00	2,308	48,42	42,34
V0	0%	70	400	-	-	-	-
V10	10%	70	400	3802,17	2,086	27,147	20,83

Fonte: Autora (2024)

Por meio dos resultados apresentados, foi possível verificar que o módulo de elasticidade dos CPs não foi alterado significativamente após serem submetidos a temperaturas de 100, 200 e 300°C, exceto para os CPs submetidos a 400°C.

Dos CPs submetidos a 400°C, os que explodiram foram o da mistura V0. Os da mistura V10 apenas apresentaram qualidade da microestrutura inferior do o CP antes do ensaio, visto pelo resultado de velocidade de pulso ultrassônico. Mesmo se mantendo em qualidade ótima, foi possível estimar que seu módulo de elasticidade estático baixou cerca de 50%.

4.4.2.5 Síntese dos resultados

Com as propriedades residuais determinadas, foi possível identificar que os CPs de UHPC apresentaram maior resistência à compressão após serem submetidos às temperaturas de 100, 200, 300 e 400°C para ambos os traços, exceto para a mistura V0 que explodiu antes dos 400°C.

A temperatura em que os CPs apresentaram maior resistência à compressão foi a 100°C, na situação pós-estufa. Depois, as resistências decaíram para as outras temperaturas, durante os ensaios do forno, mas ainda se mantiveram acima da resistência dos CPs à temperatura ambiente.

Esse efeito de aumento de resistência após a elevação da temperatura também foi verificado por outros autores e pode ser explicado pela hidratação dos grãos de cimento anidro

que reagem com a água que está se movimentando internamente para ser evaporada (Han *et al.*, 2024).

Além disso, foi possível verificar que o PDV beneficiou a mistura de UHPC que foi submetida a 400°C para as taxas de aquecimento de 1°C/min e 15°C/min.

Na taxa de 1°C/min, o UHPC com PDV apresentou resistência à compressão axial superior à resistência em temperatura ambiente, enquanto o UHPC sem PDV explodiu antes de chegar a 400°C.

Já na taxa de 15°C/min, o UHPC com PDV não apresentou efeito explosivo como a mistura de UHPC com PDV, como citado nos resultados dos ensaios anteriores.

5 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos no presente estudo, foi possível concluir que:

- O pó de vidro (PDV) utilizado neste estudo não apresentou índice de atividade pozolânica adequado segundo o ensaio de Chapelle modificado, mas promoveu ganho de resistência ao UHPC em idades tardias, principalmente na mistura com 10 e 20% de PDV em substituição ao cimento. Além disso, o material se apresentou predominantemente amorfo, com composição química e granulometria adequadas para ser classificado como um material pozolânico de acordo com dois dos critérios estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014).
- No estado fresco, o PDV (com partículas menores do que $300\mu\text{m}$) em substituição ao cimento no UHPC, nas porcentagens de 5, 10, 15 e 20%, reduziu o espalhamento das misturas, com uma piora acentuada da fluidez nos traços com 15 e 20% de resíduo. Quanto maior o teor de PDV incorporado na mistura, menor o diâmetro de abatimento verificado.
- No estado endurecido, em temperatura ambiente, a substituição de cimento por PDV nas porcentagens de 5, 10 e 15% não prejudicou o arranjo granular do UHPC, pois a resistência à compressão aos 7 dias entre as misturas foi semelhante.
- Entretanto, na porcentagem de 20% de substituição do cimento por PDV, a estrutura granular foi prejudicada, pois o UHPC apresentou redução de 27% da resistência aos 7 dias.
- Em idades tardias, o PDV apresentou comportamento similar a um material pozolânico que reage lentamente no concreto formando compostos resistentes, pois conferiu 60,50% de evolução da resistência dos 7 aos 70 dias para a mistura com 20% de substituição, enquanto a mistura referência evoluiu somente 14,93%.
- Quanto à resistência à tração indireta e ao módulo de elasticidade, verificou-se que o PDV não influenciou significativamente nos resultados.
- Na análise da ocorrência de *spalling* no UHPC sob altas temperaturas, verificou-se que todos os parâmetros testados influenciaram nos resultados de ambos os traços (com e sem PDV), como a taxa de aquecimento, o teor de umidade e o choque térmico.
- Para os CPs de UHPC sem PDV secos, quanto maior a taxa de aquecimento, mais intensa foi a explosão dos CPs sob altas temperaturas. Já para os CPs de UHPC

com PDV (teor de 10% em substituição ao cimento), o efeito *spalling* não ocorreu. Os CPs apenas racharam, sem explodir. Portanto, o PDV impediu a ocorrência do efeito *spalling* dos CPs para a taxa de aquecimento de 15°C/min.

- Para os CPs de UHPC com e sem PDV com umidade elevada, o efeito *spalling* ocorreu em temperatura mais baixa do que os CPs secos, para a mesma taxa de temperatura de 5°C/min. Portanto, verificou-se que a presença de água no concreto pode causar explosões antecipadas no UHPC sob altas temperaturas. As explosões ocorreram por volta de 300°C para os CPs com e sem PDV.
- Para ambos os traços de UHPC, com e sem PDV, verificou-se que o material não foi resistente ao choque térmico. Os CPs secos, a 300°C, explodiram assim que entraram em contato com a temperatura ambiente (26°C, aproximadamente). Portanto, em situações reais de incêndio, verificou-se que o UHPC pode oferecer risco aos bombeiros durante o combate ao fogo, devido ao efeito *spalling* sob influência do choque térmico.
- Quanto às propriedades residuais do UHPC pós ensaios a altas temperaturas, verificou-se que, nas temperaturas de 100, 200, 300 e 400°C, as resistências à compressão axial e diametral não foram prejudicadas. Na realidade, as resistências à compressão axial aumentaram significativamente com o aumento da temperatura, com destaque para a temperatura de 100°C, que se apresentou 19,2% e 26,6% mais resistentes para os traços de UHPC com e sem PDV, respectivamente. Esse efeito de aumento de resistência após a elevação da temperatura também foi verificado por outros autores e pode ser explicado pela hidratação dos grãos de cimento anidro que reagem com a água que está se movimentando internamente para ser evaporada.
- Por fim, foi possível verificar que o PDV beneficiou a mistura de UHPC submetida a 400°C para as taxas de aquecimento de 1°C/min e 15°C/min. Na taxa de 1°C/min, o UHPC com PDV apresentou resistência à compressão axial superior à resistência em temperatura ambiente, enquanto o UHPC sem PDV explodiu antes de chegar a 400°C. Já na taxa de 15°C/min, o UHPC com PDV não apresentou efeito explosivo como a mistura de UHPC com PDV.

Ressalta-se que esses resultados são válidos para o PDV utilizado neste estudo. Resíduos de vidro com granulometria e composição distintas, podem apresentar resultados divergentes se utilizados em substituição ao cimento em misturas de UHPC.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização dos ensaios de índice de atividade pozolânica com cal e com cimento, no PDV utilizado neste estudo, passante na peneira #50 de abertura $300\mu\text{m}$, a fim de verificar se o material pode ser classificado como material pozolânico, conforme todos os critérios da norma NBR 12653 (ABNT, 2014).
- Estudo da atividade pozolânica do PDV utilizado neste estudo em granulometrias mais finas do que $300\mu\text{m}$.
- Estudo do ponto de transição vítrea e do ponto de fusão do PDV utilizado neste estudo e da sua influência na ocorrência de *spalling* em misturas de UHPC submetidas à elevadas temperaturas.
- Estudo abrangente sobre a ocorrência do efeito spalling em misturas de UHPC diante de choques térmicos.
- Utilização de corpos de prova maiores e em tamanhos reais de elementos estruturais para a realização do estudo de concretos de ultra alto desempenho, com incorporação de pó de vidro, submetidos a altas temperaturas.

REFERÊNCIAS

AFGC. Documents scientifiques et techniques Bétons fibrés à ultra-hautes performances – recommandations. In: (Edition Révisée, Ed.) 2013, France. **Anais...** France.

AFNOR. **NF P18-470 – Concrete – Ultra-high performance fibre-reinforced concrete – Specifications, performance, production and conformity**. Association Française de Normalisation, 2016.

AİTCIN, Pierre Claude. **Binders for durable and sustainable concrete**. 1 Ed. New York, 2008.

AİTCIN, Pierre Claude. **High Performance Concrete**. 1. Ed. London and New York, 1998.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 239 ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE 2012 ACI Fall Convention. In: 2013, Toronto, Ontario, Canada. **Anais...** Toronto, Ontario, Canada.

AKHNOUKH, A. K.; BUCKHALTER, C. Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00559, 2021.

ALSALMAN, A. *et al.* Mixture-proportioning of economical UHPC mixtures. **Journal of Building Engineering**, v. 27, p. 100970, 1 jan. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 5628**. Componentes construtivos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2022.

____ **ABNT 5752**. Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

____ **ABNT NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

___ **ABNT NBR 5739.** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

___ **ABNT NBR 6458.** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

___ **ABNT NBR 7211.** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

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

___ **ABNT NBR 7222.** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

___ **ABNT NBR 8522.** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

___ **ABNT NBR 8802.** Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

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

___ **ABNT NBR 11579.** Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ M (Nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

___ **ABNT NBR 12653.** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

___ **ABNT NBR 14432.** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

___ **ABNT NBR 16697**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

___ **ABNT 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.

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

___ **ABNT NM 46**. Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro, 2000.

BAYRAKTAR, O. Y. Possibilities of disposing silica fume and waste glass powder, which are environmental wastes, by using as a substitute for Portland cement. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 13, p. 16843–16854, 2021.

BLAIS, P.Y.; COUTURE, M. Precast, prestressed pedestrian bridge – World's first reactive poder concrete structure. **PCI Journal**, Vol. 44, 1999.

BOLINA, F. L. **Avaliação experimental da influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio de protótipos de pilares pré-fabricados de concreto armado**. São Leopoldo, 2016. Thesis (Master). Curso de Arquitetura, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 180p.

BORGES, A. L. **Efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro em argamassas**. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

BRITEZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas**. 252 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BRITEZ, C.; CARVALHO, M.; HELENE, P. Fire impacts on concrete structures. A brief review. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 1, 2020.

CASTELLOTE, M. *et al.* Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1633–1644, 2004.

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale dos Sinos, 2019.

CHRIST, R.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO – UHPC: Fundamentos, propriedades e dosagem**. Editora LEUD, São Paulo, 2022.

CORINALDESI, V. *et al.* Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. **Waste Management**, v. 25, n. 2, p. 197–201, jan. 2005.

CORRÊA, C. Fires in Brazil: Mapping and Lethality. **Hygeia**, v. 20, p. e2007–e2007, 2024.

DUARTE, F. S. **Análises termomecânicas de vigas de concreto armado sob situação de incêndio: uma comparação entre o concreto convencional e o UHPC**. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

ESCOLA POLITÉCNICA. **Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO2**. Publicado em: 2024. Disponível em: <<https://www.poli.usp.br/noticias/1527-cimento-producao-mundial-pode-dobrar-sem-aumentar>>. Acesso em: 03 fev. 2024.

INSTITUTO SPRINKLER BRASIL. **Estatísticas 2022**. Publicado em: 2023. Disponível em: <<https://sprinklerbrasil.org.br/instituto-sprinkler-brasil/estatisticas/estatisticas-2022>>, 2023. Acesso em: 10 mar. 2024.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. fib Bulletin 38: **Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling**, 106 p, 2007.

FERNANDES, B. *et al.* Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 838–863, 2017.

GUO, S. *et al.* Reduced alkali-silica reaction damage in recycled glass mortar samples with supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 3621–3633, 2018.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, v. 61, n. 1, p. 1–10, 2013.

HERTZ, Kristian Dahl. Concrete strength for fire safety design. **Magazine of Concrete Research, London**, v. 57, n. 8, p. 445-453. 2005.

HIGUCHI, A. M. D. *et al.* Use of glass powder residue as an eco-efficient supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 304, p. 124640, 2021.

HOPPE FILHO, Juarez. GOBBI, Andressa. PEREIRA, Eduardo. QUARCIONI, Valdecir Angelo. MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0206>.

INGHAM, J. P. Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. **Materials Characterization**, v. 60, n. 7, p. 700–709, 2009.

JIANG, X. *et al.* Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures. **Journal of Cleaner Production**, v. 340, p. 130778, 2022.

KAMECHE, Z. EL-ABIDINE; DJELIL, M.; DAHMANI, B. Effects of incorporating silica glass powder as a supplementary cementitious material on selected properties of portland cement mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 78, p. 107550, 1 nov. 2023.

KANTRO, D. L. **Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature slump test.** Cement, Concrete and Aggregates, Orlando, v. 2, 1980.

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 2, n. 4, p. 429–447, 2000.

KLINGSCH, Eike Wolfram Heinrich. Explosive spalling of concrete in fire. **ETH Union**, Zurich, jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010243000>.

KODUR, V.; BANERJI, S. Modeling the fire-induced spalling in concrete structures incorporating hydro-thermo-mechanical stresses. **Cement and Concrete Composites**, v. 117, p. 103902, 2021.

LERCH, J. O. *et al.* The effect of mixing on the performance of macro synthetic fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 130-139, 2018.

LING, T. C.; POON, C. S.; KOU, S.C. Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 265-272, 2012.

LORENZI Alexandre. REGINATTO Lucas. SILVA FILHO Luiz Carlos. LORENZI, Luciani. Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto através da aplicação de ensaios não destrutivos. **ABENDI: XXXIV – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção**. Rio Grande do Sul, 2016.

LUO, B.; DENG, C.; LUO, Y. Mechanical properties and microstructure of UHPC with recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. **J. Build Eng.**, vol. 62, pp. 105369, 2022.

MATOS, A. M.; OLIVEIRA, P. M.; PIMENTEL, M. Eco-efficient high performance white concrete incorporating waste glass powder. **Construction and Building Materials**, Vol. 411, 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MUHEDIN, D.A.; IBRAHIM, R.K. Effect of waste glass powder as partial replacement of cement & sand in concrete. **Case Studies in Construction Materials** 2023, 19, e02512. 2023.

MULLER, R.M.; KOELLE, P.; ALMEIDA, C. N. A utilização de UHPC em obras no Brasil. **CONCRETO & Construções**, Vol 87. IBRACON, 2017.

NASSAR, R.-U.-D. *et al.* Spalling behavior and performance of ultra-high-performance concrete subjected to elevated temperature: A review. **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134489, 2024.

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

OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. **Self-compacting concrete**. In: Journal of Advanced Concrete Technology. Vol 1, p. 5-15, 2003.

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

PAN, Z. *et al.* High temperature performance of mortars containing fine glass powders. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 16–26, 2017.

RILEM. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures — modelling and applications. Part 2: Stress–strain relation. **Materials and Structures** n° 40, p. 841–853. 2007.

RADKE, I. B. G. **Viabilidade da utilização de resíduo de laminação de vidro na confecção de concretos estruturais**. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2022.

ROTTA, J. V. P. **Avaliação da utilização de resíduo de vidro como substituto parcial do cimento em concretos estruturais baseada na resistência a compressão e no ataque de soluções agressivas**. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2023.

SALAHADDIN, S. D.; HAIDO, J. H.; WARDEH, G. Rheological and mechanical characteristics of basalt fiber UHPC incorporating waste glass powder in lieu of cement. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 15, 2024.

SANTOS, V. B. **Análise experimental da ligação entre concreto de ultra-alto desempenho e concretos de resistência normal e de alta resistência**. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

SILVA, D. F. R. **Análise teórica e experimental do fenômeno de fluência em lajes unidirecionais fabricadas com concreto convencional e autoadensável**. 2021. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 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) – Universidade Federal de São Carlos, 2021.

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

TORREGROSA, Esteban Camacho. **Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties**. 2013. Universitat Politècnica de València Dosage, 2013.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto Autoadensável**. 3. Ed. São Paulo: Leud, 2021.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho**. In ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 36.

VAN TUAN, N. *et al.* Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1104–1111, 2011.

WILLE, K.; NAAMAN, A.; PARRA-MONTESINOS, G. Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. **ACI Materials Journal**. 108. 46-54. 2011.

WONG, H. S.; RAZAK, H. A. Efficiency of calcined kaolin and sílica fume as cement replacement material for strenght performance. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 696-171, 2008.

YAN, P. *et al.* Study on mechanical properties and microstructure of green ultra-high performance concrete prepared by recycling waste glass powder. **Journal of building engineering**, v. 82, 2024.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 29–39, fev. 2014.

YUNSHENG Z. *et al.* Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors. **Cement and Concrete Composites**, vol. 30, no. 9, pp. 831–838, 2008.

ZHANG, D.; DASARI, A.; TAN, K. H. On the mechanism of prevention of explosive spalling in ultra-high performance concrete with polymer fibers. **Cement and Concrete Research**, v. 113, p. 169–177, 2018.

ZHENG, K. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali–silica reaction. **Cement and Concrete Composites**, v. 67, p. 30–38, 2016.

APÊNDICE A – Dados dos ensaios de compressão axial

Quadro 9 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0, V5, V10, V15 e V20 aos 7 e 70 dias

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Diâm. do CP	Altura do CP	Rel. h/D	Força resist.	Resist. à comp. axial	Resist. à comp. axial média	Desvio-padrão	Coef. de variação	Desvio Relativo Máximo
		<i>j</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h/D</i>	<i>F</i>	<i>f_{c,j}</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>	DRM <6%
		(dias)	(cm)	(cm)	1,94-2,06	(kN)	(MPa)	(MPa)	-		
V01	0%	7	4,90	9,65	1,97	210,84	111,81	115,43	3,626	3,14%	3%
V04	0%	7	4,95	9,70	1,96	225,87	117,37				2%
V05	0%	7	5,00	9,75	1,95	229,94	117,11				1%
V02	0%	70	4,95	9,70	1,96	254,58	132,29	132,66	6,763	5,10%	0%
V03	0%	70	4,95	9,70	1,96	246,45	128,06				4%
V06	0%	70	4,95	9,65	1,95	264,83	137,62				4%
V52	5%	7	4,93	9,70	1,97	242,56	127,07	128,41	6,132	4,78%	1%
V53	5%	7	4,90	9,70	1,98	251,38	133,31				4%
V54	5%	7	4,95	9,70	1,96	240,25	124,84				3%
V51	5%	70	4,95	9,70	1,96	270,47	140,55	137,18	3,930	2,86%	2%
V55	5%	70	5,00	9,75	1,95	263,23	134,06				2%
V56	5%	70	5,00	9,70	1,94	268,85	136,92				0%
V103	10%	7	4,90	9,65	1,97	209,58	111,14	116,44	5,382	4,62%	5%
V104	10%	7	4,95	9,80	1,98	230,43	119,74				3%
V105	10%	7	4,95	9,75	1,97	227,95	118,45				2%
V101	10%	70	4,95	9,70	1,96	283,79	147,47	146,86	2,704	1,84%	0%
V102	10%	70	4,90	9,65	1,97	272,86	144,70				1%
V106	10%	70	4,95	9,65	1,95	285,63	148,42				1%
V154	15%	7	4,95	9,70	1,96	230,62	119,84	117,77	2,397	2,04%	2%
V155	15%	7	4,95	9,65	1,95	226,30	117,59				0%
V156	15%	7	4,95	9,70	1,96	223,00	115,88				2%
V151	15%	70	4,95	9,60	1,94	258,23	134,19	134,70	3,031	2,25%	0%
V152	15%	70	4,95	9,75	1,97	263,77	137,06				2%
V153	15%	70	4,95	9,65	1,95	255,64	132,84				1%
V202	20%	7	4,90	9,75	1,99	152,51	80,88	84,35	5,018	5,95%	4%
V204	20%	7	4,95	9,65	1,95	170,59	88,64				5%
V205	20%	7	4,95	9,70	1,96	160,73	83,52				1%
V201	20%	70	4,95	9,70	1,96	268,12	139,32	135,38	5,084	3,76%	3%
V203	20%	70	4,95	9,65	1,95	252,37	131,14				3%
V206	20%	70	4,95	9,65	1,95	261,10	135,68				3%

Quadro 10 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 28 e 70 dias a temperatura ambiente

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Diâm. do CP	Altura do CP	Rel. h/D	Força resist.	Resist. à comp. axial	Resist. à comp. axial média	Desvio-padrão	Coef. de variação	Desvio Relativo Máximo
		<i>j</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h/D</i>	<i>F</i>	<i>f_{c,j}</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>c_{ve}</i>	DRM <6%
		(dias)	(cm)	(cm)	1,94-2,06	(kN)	(MPa)	(MPa)	-		
R111	0%	28	4,95	9,65	1,95	269,66	140,125	137,371	3,654	2,66%	2%
R121	0%	28	5,05	9,55	1,89	270,23	134,915				2%
R124	0%	28	4,95	9,60	1,94	261,90	136,093				1%
R134	0%	28	5,00	9,60	1,92	253,65	129,183				6%
R123	0%	28	4,95	9,60	1,94	260,82	135,532				1%
R132	0%	28	4,95	9,60	1,94	268,97	139,767				2%
R143	0%	28	4,95	9,70	1,96	277,84	144,376				5%
R113	0%	28	4,90	9,70	1,98	268,80	142,543				4%
R112	0%	28	4,90	9,65	1,97	258,82	137,251				0%
R142	0%	28	4,95	9,70	1,96	261,84	136,062				1%
R141	0%	28	4,95	9,65	1,95	260,24	135,230				2%
R412	0%	70	5,00	9,80	1,96	258,41	131,607	136,833	4,292	3,14%	4%
R542	0%	70	4,90	9,70	1,98	261,05	138,434				1%
R545	0%	70	4,90	9,70	1,98	251,83	133,544				2%
R411	0%	70	5,00	9,80	1,96	258,80	131,806				4%
R414	0%	70	4,90	9,80	2,00	249,65	132,388				3%
R546	0%	70	4,90	9,70	1,98	253,56	134,462				2%
R413	0%	70	4,90	9,80	2,00	256,31	135,920				1%
R536	0%	70	4,90	9,80	2,00	258,34	136,997				0%
R543	0%	70	4,90	9,75	1,99	262,25	139,070				2%
R541	0%	70	4,90	9,80	2,00	265,32	140,698				3%
R511	0%	70	4,90	9,80	2,00	271,72	144,092				5%
R923	0%	70	4,95	9,70	1,96	275,16	142,983				4%
VID123	10%	28	4,95	9,70	1,96	248,81	129,291	127,392	4,395	3,45%	1%
VID144	10%	28	5,00	9,75	1,95	251,64	128,159				1%
VID113	10%	28	4,95	9,65	1,95	241,90	125,700				1%
VID132	10%	28	4,95	9,55	1,93	252,23	131,068				3%
VID133	10%	28	4,95	9,60	1,94	260,51	135,371				6%
VID124	10%	28	4,95	9,70	1,96	242,06	125,783				1%
VID141	10%	28	5,00	9,65	1,93	258,22	131,510				3%
VID142	10%	28	4,95	9,75	1,97	241,02	125,243				2%
VID143	10%	28	4,95	9,50	1,92	236,82	123,060				3%
VID144	10%	28	4,95	9,55	1,93	254,58	132,289				4%
VID111	10%	28	4,95	9,80	1,98	237,67	123,502				3%
VID121	10%	28	5,05	9,70	1,92	239,34	119,493				6%
VID131	10%	28	4,95	9,60	1,94	241,77	125,633				1%

V121	10%	70	5,00	9,75	1,95	295,10	150,293	143,110	3,966	2,77%	5%
V122	10%	70	4,95	9,70	1,96	282,77	146,938				3%
V123	10%	70	4,90	9,65	1,97	278,17	147,512				3%
V124	10%	70	4,90	9,65	1,97	269,02	142,660				0%
V125	10%	70	4,95	9,65	1,95	282,24	146,662				2%
V126	10%	70	4,95	9,70	1,96	274,21	142,490				0%
V261	10%	70	4,95	9,60	1,94	275,40	143,108				0%
V262	10%	70	4,95	9,65	1,95	262,34	136,321				5%
V263	10%	70	4,95	9,65	1,95	264,51	137,449				4%
V264	10%	70	4,95	9,60	1,94	276,78	143,825				0%
V265	10%	70	4,95	9,65	1,95	262,84	136,581				5%
V266	10%	70	4,95	9,58	1,94	276,11	143,477				0%

Quadro 11 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 70 dias após ensaio no forno a 200°C a uma taxa de 5°C/min

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Diâm. do CP	Altura do CP	Rel. h/D	Força resist.	Resist. à comp. axial	Resist. à comp. axial média	Desvio-padrão	Coef. de variação	Desvio Relativo Máximo
		<i>j</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h/D</i>	<i>F</i>	<i>f_{c,j}</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>c_{ve}</i>	DRM <6%
		(dias)	(cm)	(cm)	1,94-2,06	(kN)	(MPa)	(MPa)	-		
R721	0%	70	5,00	9,90	1,98	282,37	143,810	142,904	10,738	7,51%	1%
R722	0%	70	4,95	9,85	1,99	285,35	148,278				4%
R723	0%	70	4,90	9,60	1,96	253,45	134,403				6%
R822	0%	70	4,90	9,70	1,98	273,42	144,993				1%
R824	0%	70	4,95	9,60	1,94	245,63	127,638				11%
R826	0%	70	4,95	9,70	1,96	304,64	158,302				11%
V241	10%	70	5,00	9,80	1,96	329,36	167,742	161,122	7,002	4,35%	4%
V242	10%	70	5,00	9,60	1,92	297,35	151,439				6%
V243	10%	70	4,90	9,75	1,99	310,53	164,673				2%
V244	10%	70	5,05	9,75	1,93	324,57	162,045				1%
V245	10%	70	4,95	9,80	1,98	295,58	153,594				5%
V246	10%	70	4,95	9,70	1,96	321,84	167,240				4%

Quadro 12 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 70 dias após ensaio no forno a 300°C a uma taxa de 5°C/min

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Diâm. do CP	Altura do CP	Rel. h/D	Força resist.	Resist. à comp. axial	Resist. à comp. axial média	Desvio-padrão	Coef. de variação	Desvio Relativo Máximo
		<i>j</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h/D</i>	<i>F</i>	<i>f_{c,j}</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>	DRM <6%
		(dias)	(cm)	(cm)	1,94-2,06	(kN)	(MPa)	(MPa)	-		
R834	0%	70	4,90	9,65	1,97	304,12	161,273	155,480	5,204	3,35%	4%
R835	0%	70	4,90	9,65	1,97	293,22	155,493				0%
R836	0%	70	4,90	9,60	1,96	296,56	157,264				1%
R814	0%	70	4,95	9,60	1,94	291,03	151,230				3%
R815	0%	70	4,95	9,70	1,96	284,21	147,686				5%
R816	0%	70	4,95	9,70	1,96	307,78	159,934				3%
V221	10%	70	4,90	9,70	1,98	302,53	160,430	167,454	6,145	3,67%	4%
V222	10%	70	5,00	9,75	1,95	316,84	161,365				4%
V223	10%	70	4,95	9,60	1,94	330,86	171,927				3%
V224	10%	70	4,90	9,60	1,96	323,33	171,460				2%
V225	10%	70	4,90	9,60	1,96	310,20	164,498				2%
V226	10%	70	4,95	9,65	1,95	336,86	175,045				5%

Quadro 13 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 70 dias após ensaio no forno a 400°C a uma taxa de 1°C/min

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Diâm. do CP	Altura do CP	Rel. h/D	Força resist.	Resist. à comp. axial	Resist. à comp. axial média	Desvio-padrão	Coef. de variação	Desvio Relativo Máximo
		<i>j</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h/D</i>	<i>F</i>	<i>f_{c,j}</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>	DRM <6%
		(dias)	(cm)	(cm)	1,94-2,06	(kN)	(MPa)	(MPa)	-		
R1141*	0%	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R1143*	0%	70	-	-	-	-	-				-
R1144*	0%	70	-	-	-	-	-				-
V361	10%	70	4,95	9,65	1,95	313,65	162,98	162,439	3,082	1,90%	0%
V362	10%	70	5,05	9,80	1,94	329,11	164,31				1%
V363	10%	70	4,95	9,60	1,94	307,95	160,02				1%

*Os CPs R1141, R1143 e R1144 explodiram no forno.

Quadro 14 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão axial das misturas V0 e V10, aos 70 dias após permanecer na estufa por 6 dias 100°C

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Diâm. do CP	Altura do CP	Rel. h/D	Força resist.	Resist. à comp. axial	Resist. à comp. axial média	Desvio-padrão	Coef. de variação	Desvio Relativo Máximo
		<i>j</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h/D</i>	<i>F</i>	<i>f_{c,j}</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>	DRM <6%
		(dias)	(cm)	(cm)	1,94-2,06	(kN)	(MPa)	(MPa)	-		
R931	0%	70	4,90	9,65	1,97	327,66	173,757	173,253	2,497	1,44%	0%
R932	0%	70	4,95	9,60	1,94	327,71	170,290				2%
R933	0%	70	4,90	9,65	1,97	328,97	174,451				1%
R934	0%	70	4,90	9,60	1,96	328,39	174,144				1%
R935	0%	70	4,95	9,85	1,99	327,71	170,290				2%
R936	0%	70	4,90	9,70	1,98	333,00	176,588				2%
V335	10%	70	4,95	9,70	1,96	321,40	167,011	170,608	5,771	3,38%	4%
V334	10%	70	4,95	9,65	1,95	336,65	174,936				1%
V336	10%	70	4,90	9,70	1,98	327,40	173,619				0%
V911	10%	70	4,90	9,70	1,98	315,23	167,165				4%
V912	10%	70	4,90	9,75	1,99	335,67	178,004				3%
V913	10%	70	5,00	9,75	1,95	319,88	162,914				6%

Quadro 15 – Equações utilizadas para o cálculo de resistência à compressão axial

Resistência à compressão axial	Desvio-padrão	Coeficiente de variação	Desvio Relativo Máximo
f_c	S_e	$CV_e \leq 3$ – Excelente $3 < CV_e \leq 3$ – Muito Bom $4 < CV_e \leq 5$ – Bom $4 < CV_e \leq 6$ – Razoável $CV_e \geq 6$ – Deficiente	DRM < 6%
NBR 5739 (ABNT, 2018)	NBR 12655 (ABNT, 2022)	NBR 5739 (ABNT, 2018)	NBR 7215 (ABNT, 2019)
$\frac{4F}{\pi d^2}$	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cm})^2}$	$\frac{S_e}{f_{cm}} * 100$	$\frac{ f_{cm} - f_{c(CP)} }{f_{cm}} * 100$

APÊNDICE B – Dados dos ensaios de compressão diametral

Quadro 16 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão diametral das misturas V0 e V10, aos 28 e 70 dias a temperatura ambiente

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Diâm. do CP	Altura do CP	Rel. h/D	Força resist.	Resist. à comp. axial	Resist. à comp. axial média	Desvio-padrão	Coef. de variação	Desvio Relativo Máximo
		<i>j</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h/D</i>	<i>F</i>	<i>f_{c,j}</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>	DRM <6%
		(dias)	(cm)	(cm)	1,94-2,06	(kN)	(MPa)	(MPa)	-		
RR111	0%	28	5,00	9,60	1,92	48,99	6,498	7,45	1,726	23,17%	13%
RR112	0%	28	5,00	9,80	1,96	75,60	9,822				32%
RR113	0%	28	4,90	9,70	1,98	78,92	10,571				42%
RR114	0%	28	4,95	9,72	1,96	68,50	9,064				22%
RR115	0%	28	4,95	9,77	1,97	40,24	5,297				29%
RR116	0%	28	5,00	9,75	1,95	49,56	6,524				12%
RR211	0%	28	4,95	9,75	1,97	47,21	6,227				16%
RR212	0%	28	4,95	9,70	1,96	45,63	6,050				19%
RR213	0%	28	4,90	9,65	1,97	69,98	9,422				26%
RR214	0%	28	4,90	9,70	1,98	50,25	6,731				10%
RR215	0%	28	4,90	9,73	1,99	56,96	7,606				2%
RR216	0%	28	4,95	9,70	1,96	42,08	5,579				25%
R644	0%	70	4,90	9,70	1,98	57,75	7,735	7,69	1,882	24,46%	1%
R645	0%	70	4,90	9,70	1,98	78,87	10,564				37%
R643	0%	70	4,90	9,70	1,98	78,96	10,576				37%
R915	0%	70	4,95	9,75	1,97	40,81	5,383				30%
R745	0%	70	4,90	9,70	1,98	44,60	5,974				22%
R746	0%	70	4,90	9,70	1,98	55,45	7,427				3%
R916	0%	70	4,95	9,65	1,95	47,87	6,380				17%
R646	0%	70	4,90	9,70	1,98	50,06	6,705				13%
R921	0%	70	5,00	9,70	1,94	71,23	9,350				22%
R922	0%	70	5,00	9,70	1,94	62,39	8,189				6%
R913	0%	70	4,95	9,70	1,96	40,06	5,311				31%
R912	0%	70	5,00	9,75	1,95	75,76	9,893				29%
R911	0%	70	5,00	9,70	1,94	49,66	6,518				15%
VV111	10%	28	4,95	9,70	1,96	51,51	6,830	7,52	1,758	23,39%	9%
VV112	10%	28	4,95	9,70	1,96	34,26	4,542				40%
VV113	10%	28	5,00	9,75	1,95	67,97	8,876				18%
VV114	10%	28	4,90	9,60	1,96	41,47	5,612				25%
VV115	10%	28	4,95	9,70	1,96	61,10	8,101				8%
VV116	10%	28	5,00	9,75	1,95	72,19	9,572				27%
VV211	10%	28	4,90	9,6	1,96	47,79	6,468				14%
VV212	10%	28	4,90	9,8	2,00	48,95	6,489				14%
VV213	10%	28	4,95	9,7	1,96	78,19	10,367				38%
VV214	10%	28	4,90	9,75	1,99	43,17	5,753				23%

VV215	10%	28	5,00	9,70	1,94	61,47	8,069	7,96	1,364	17,14%	7%
VV216	10%	28	5,00	9,70	1,94	72,58	9,527				27%
V261	10%	70	5,00	9,70	1,94	55,28	7,256				9%
V262	10%	70	4,90	9,65	1,97	46,02	6,196				22%
V263	10%	70	4,90	9,80	2,00	67,92	9,004				13%
V264	10%	70	4,95	9,70	1,96	42,79	5,673				29%
V265	10%	70	4,96	9,75	1,97	70,16	9,236				16%
V266	10%	70	4,95	9,70	1,96	61,25	8,063				1%
V271	10%	70	4,90	9,65	1,97	56,91	7,662				4%
V272	10%	70	5,00	9,70	1,94	78,16	10,259				29%
V273	10%	70	5,00	9,70	1,94	56,83	7,460				6%
V274	10%	70	4,95	9,65	1,95	48,33	6,441				19%
V275	10%	70	5,00	9,70	1,94	67,02	8,797				11%
V276	10%	70	4,90	9,75	1,99	70,64	9,413				18%

Quadro 17 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão diametral das misturas V0 e V10, aos 70 dias após serem submetidos a temperatura de 200°C (taxa de 5°C/min)

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Diâm. do CP	Altura do CP	Rel. h/D	Força resist.	Resist. à comp. axial	Resist. à comp. axial média	Desvio-padrão	Coef. de variação	Desvio Relativo Máximo
		<i>j</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h/D</i>	<i>F</i>	<i>f_{c,j}</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>	DRM <6%
		(dias)	(cm)	(cm)	1,94-2,06	(kN)	(MPa)	(MPa)	-		
R724	0%	70	5,00	9,80	1,96	55,67	7,233	5,816	0,779	13,40%	24%
R725	0%	70	5,00	9,80	1,96	44,27	5,752				1%
R726	0%	70	4,90	9,80	2,00	36,88	4,889				16%
R821	0%	70	4,95	9,40	1,90	42,98	5,880				1%
R823	0%	70	4,95	9,75	1,97	41,14	5,427				7%
R825	0%	70	4,95	9,65	1,95	42,88	5,715				2%
V211	0%	70	4,90	9,70	1,98	46,88	6,279	6,561	0,521	7,95%	4%
V212	0%	70	4,95	9,70	1,96	53,49	7,092				8%
V213	0%	70	4,95	9,65	1,95	52,12	6,946				6%
V214	0%	70	4,95	9,65	1,95	49,58	6,608				1%
V215	0%	70	4,95	9,70	1,96	42,73	5,665				14%
V216	0%	70	5,00	9,70	1,94	51,60	6,773				3%

Quadro 18 – Dados e cálculos do ensaio de resistência à compressão diametral das misturas V0 e V10, aos 70 dias após serem submetidos a temperatura de 300°C (taxa de 5°C/min)

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Diâm. do CP	Altura do CP	Rel. h/D	Força resist.	Resist. à comp. axial	Resist. à comp. axial média	Desvio-padrão	Coef. de variação	Desvio Relativo Máximo
		<i>j</i>	<i>D</i>	<i>h</i>	<i>h/D</i>	<i>F</i>	<i>f_{c,j}</i>	<i>f_{cm,j}</i>	<i>se</i>	<i>cve</i>	DRM <6%
		(dias)	(cm)	(cm)	1,94-2,06	(kN)	(MPa)	(MPa)	-		
R831	0%	70	4,95	9,50	1,92	40,88	5,534	5,353	0,540	10,09%	3%
R832	0%	70	4,95	9,80	1,98	36,17	4,747				11%
R833	0%	70	4,90	9,65	1,97	37,93	5,107				5%
R811	0%	70	4,90	9,80	2,00	40,07	5,312				1%
R812	0%	70	4,95	9,65	1,95	38,26	5,099				5%
R813	0%	70	4,90	9,65	1,97	46,93	6,318				18%
V231	0%	70	4,95	9,70	1,96	46,30	6,139	6,429	1,235	19,21%	5%
V232	0%	70	4,95	9,75	1,97	48,46	6,392				19%
V233	0%	70	4,90	9,60	1,96	34,19	4,627				14%
V234	0%	70	4,95	9,80	1,98	59,87	7,857				47%
V235	0%	70	4,90	9,60	1,96	42,69	5,777				8%
V236	0%	70	4,95	9,55	1,93	57,78	7,781				45%

Quadro 19 – Equações utilizadas para o cálculo de resistência à compressão diametral

Resistência à compressão axial	Desvio-padrão	Coeficiente de variação	Desvio Relativo Máximo
f_c	S_e	$CV_e \leq 3$ – Excelente $3 < CV_e \leq 3$ – Muito Bom $4 < CV_e \leq 5$ – Bom $4 < CV_e \leq 6$ – Razoável $CV_e \geq 6$ – Deficiente	DRM < 6%
NBR 7222 (ABNT, 2011)	NBR 12655 (ABNT, 2022)	NBR 5739 (ABNT, 2018)	NBR 7215 (ABNT, 2019)
$\frac{2F}{\pi dh}$	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cm})^2}$	$\frac{S_e}{f_{cm}} * 100$	$\frac{ f_{cm} - f_{c(CP)} }{f_{cm}} * 100$

APÊNDICE C – Dados do ensaio de ultrassom

Quadro 20 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V0 aos 28 dias

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Condição (normal ou pós-forno)	Veloc. de Pulso Ultras.	Veloc. de Pulso Ultras. (média)
		<i>j</i>		VPU	VPU
		(dias)		(m/s)	(m/s)
R111	0%	28	Normal	4902	4878,60
R121	0%	28	Normal	4785	
R124	0%	28	Normal	4902	
R134	0%	28	Normal	4902	
R123	0%	28	Normal	4902	

Quadro 21 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V0 aos 70 dias

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Condição (normal ou pós-forno)	Veloc. de Pulso Ultras.	Veloc. de Pulso Ultras. (média)
		<i>j</i>		VPU	VPU
		(dias)		(m/s)	(m/s)
R721	0%	70	Normal	4902	4910,96
R722	0%	70	Normal	4902	
R723	0%	70	Normal	4902	
R822	0%	70	Normal	4902	
R824	0%	70	Normal	4902	
R826	0%	70	Normal	4902	
R724	0%	70	Normal	4902	
R725	0%	70	Normal	4902	
R726	0%	70	Normal	4902	
R821	0%	70	Normal	4902	
R823	0%	70	Normal	4902	
R825	0%	70	Normal	4902	
R611	0%	70	Normal	5025	
R615	0%	70	Normal	4785	
R621	0%	70	Normal	4902	
R612	0%	70	Normal	4975	
R613	0%	70	Normal	4902	
R614	0%	70	Normal	4902	
R625	0%	70	Normal	4902	
R626	0%	70	Normal	4902	
R631	0%	70	Normal	4902	
R622	0%	70	Normal	4902	
R623	0%	70	Normal	4785	
R624	0%	70	Normal	5155	

Quadro 22 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V10 aos 28 dias

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Condição (normal ou pós-forno)	Veloc. de Pulso Ultras.	Veloc. de Pulso Ultras. (média)
		<i>j</i>		VPU	VPU
		(dias)		(m/s)	(m/s)
VID123	10%	28	Normal	4902	4831,80
VID144	10%	28	Normal	4785	
VID113	10%	28	Normal	4785	
VID132	10%	28	Normal	4902	
VID133	10%	28	Normal	4785	

Quadro 23 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V10 aos 70 dias

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Condição (normal ou pós-forno)	Veloc. de Pulso Ultras.	Veloc. de Pulso Ultras. (média)
		<i>j</i>		VPU	VPU
		(dias)		(m/s)	(m/s)
V241	10%	70	Normal	4785	4828,88
V246	10%	70	Normal	4785	
V211	10%	70	Normal	4902	
V214	10%	70	Normal	4785	
V252	10%	70	Normal	4785	
V255	10%	70	Normal	4902	
V313	10%	70	Normal	4902	
V312	10%	70	Normal	4785	

Quadro 24 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V0 aos 70 dias pós-forno

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Temperatura do pós-forno	Veloc. de Pulso Ultras.	Veloc. de Pulso Ultras. (média)
		<i>j</i>		VPU	VPU
		(dias)		(m/s)	(m/s)
R931	0%	70	100	4902	4937,50
R932	0%	70	100	4902	
R933	0%	70	100	4902	
R934	0%	70	100	5115	
R935	0%	70	100	4902	
R936	0%	70	100	4902	
R721	0%	70	200	4785	4874,50
R722	0%	70	200	4854	
R723	0%	70	200	4902	
R822	0%	70	200	4902	
R824	0%	70	200	4902	
R826	0%	70	200	4902	
R632	0%	70	300	4902	4863,83
R636	0%	70	300	4902	
R641	0%	70	300	4902	
R735	0%	70	300	4673	
R742	0%	70	300	4902	
R744	0%	70	300	4902	

Quadro 25 – Dados obtidos no teste de VPU para a mistura V10 aos 70 dias pós-forno

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Condição (normal ou pós-forno)	Veloc. de Pulso Ultras.	Veloc. de Pulso Ultras. (média)
		j		VPU	VPU
		(dias)		(m/s)	(m/s)
V335	10%	70	100	4902	4902,00
V334	10%	70	100	4902	
V336	10%	70	100	4902	
V911	10%	70	100	4902	
V912	10%	70	100	4902	
V913	10%	70	100	4902	
V241	10%	70	200	4902	4863,00
V242	10%	70	200	4902	
V243	10%	70	200	4902	
V244	10%	70	200	4785	
V245	10%	70	200	4902	
V246	10%	70	200	4785	
V221	10%	70	300	4785	4828,00
V222	10%	70	300	4673	
V223	10%	70	300	4785	
V224	10%	70	300	4785	
V225	10%	70	300	5155	
V226	10%	70	300	4785	
V361	10%	70	400	3788	3802,17
V362	10%	70	400	3717	
V363	10%	70	400	3717	
V364	10%	70	400	3717	
V365	10%	70	400	3937	
V366	10%	70	400	3937	

APÊNDICE D – Cálculo da massa específica e módulo de elasticidade

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Condição (normal ou pós-forno)	Diâm. do CP	Altura do CP	Massa	Massa esp.	Massa esp. (média)	Mód. de elast. din.	Mód. de elast. est.
		<i>j</i>		<i>D</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	ρ	ρ	<i>Ecd</i>	<i>Eci</i>
		(dias)		(cm)	(cm)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	GPa	GPa
R721	0%	70	Normal	5,00	9,9	438,41	2,255	2,313	50,196	44,441
R722	0%	70	Normal	4,95	9,85	441,97	2,332			
R723	0%	70	Normal	4,90	9,6	413,34	2,283			
R822	0%	70	Normal	4,9	9,7	430,31	2,352			
R824	0%	70	Normal	4,95	9,4	420,11	2,322			
R826	0%	70	Normal	4,95	9,7	435,00	2,330			

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Condição (normal ou pós-forno)	Diâm. do CP	Altura do CP	Massa	Massa esp.	Massa esp. (média)	Mód. de elast. din.	Mód. de elast. est.
		<i>j</i>		<i>D</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	ρ	ρ	<i>Ecd</i>	<i>Eci</i>
		(dias)		(cm)	(cm)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	GPa	GPa
V251	10%	70	Normal	4,95	9,70	431,61	2,312	2,301	48,281	42,304
V252	10%	70	Normal	4,95	9,50	428,52	2,344			
V253	10%	70	Normal	5,00	9,65	432,57	2,283			
V254	10%	70	Normal	5,00	9,60	425,51	2,257			
V255	10%	70	Normal	4,95	9,70	431,82	2,313			
V256	10%	70	Normal	4,95	9,70	428,21	2,294			

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Condição (normal ou pós-forno)	Diâm. do CP	Altura do CP	Massa	Massa esp.	Massa esp. (média)	Mód. de elast. din.	Mód. de elast. est.
		<i>j</i>		<i>D</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	ρ	ρ	<i>Ecd</i>	<i>Eci</i>
		(dias)		(cm)	(cm)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	GPa	GPa
R721	0%	70	Normal	5,00	9,9	438,41	2,255	2,313	50,196	44,441
R722	0%	70	Normal	4,95	9,85	441,97	2,332			
R723	0%	70	Normal	4,90	9,6	413,34	2,283			
R822	0%	70	Normal	4,9	9,7	430,31	2,352			
R824	0%	70	Normal	4,95	9,4	420,11	2,322			
R826	0%	70	Normal	4,95	9,7	435,00	2,330			

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Temper de ensaio no forno	Diâm. do CP	Altura do CP	Massa	Massa esp.	Massa esp. (média)	Mód. de elast. din.	Mód. de elast. est.
		<i>j</i>		<i>D</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	ρ	ρ	<i>Ecd</i>	<i>Eci</i>
		(dias)		(cm)	(cm)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	GPa	GPa
R721	10%	70	200	5,00	9,90	438,61	2,256	2,290	48,967	43,351
R722	10%	70	200	4,95	9,85	441,86	2,331			
R723	10%	70	200	4,90	9,60	413,13	2,282			
R822	10%	70	200	4,90	9,70	-	-			
R824	10%	70	200	4,95	9,40	-	-			
R826	10%	70	200	4,95	9,70	-	-			

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Temperatura de ensaio no forno	Diâm. do CP	Altura do CP	Massa	Massa esp.	Massa esp. (média)	Mód. de elast. din.	Mód. de elast. est.
		<i>j</i>		<i>D</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	ρ	ρ	<i>Ecd</i>	<i>Eci</i>
		(dias)		(cm)	(cm)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	GPa	GPa
R834	10%	70	300	4,90	9,65	428,14	2,353	2,308	49,139	43,222
R835	10%	70	300	4,90	9,65	412,06	2,264			
R836	10%	70	300	4,85	9,60	413,49	2,331			
R814	10%	70	300	4,95	9,60	426,50	2,309			
R815	10%	70	300	4,95	9,70	429,99	2,303			
R816	10%	70	300	4,95	9,70	426,90	2,287			

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Condição (normal ou pós-forno)	Diâm. do CP	Altura do CP	Massa	Massa esp.	Massa esp. (média)	Mód. de elast. din.	Mód. de elast. est.
		<i>j</i>		<i>D</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	ρ	ρ	<i>Ecd</i>	<i>Eci</i>
		(dias)		(cm)	(cm)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	GPa	GPa
V251	10%	70	Normal	4,95	9,70	431,61	2,312	2,301	48,281	42,304
V252	10%	70	Normal	4,95	9,50	428,52	2,344			
V253	10%	70	Normal	5,00	9,65	432,57	2,283			
V254	10%	70	Normal	5,00	9,60	425,51	2,257			
V255	10%	70	Normal	4,95	9,70	431,82	2,313			
V256	10%	70	Normal	4,95	9,70	428,21	2,294			

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Temper de ensaio no forno	Diâm. do CP	Altura do CP	Massa	Massa esp.	Massa esp. (média)	Mód. de elast. din.	Mód. de elast. est.
		<i>j</i>		<i>D</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	ρ	ρ	<i>Ecd</i>	<i>Eci</i>
		(dias)		(cm)	(cm)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	GPa	GPa
V251	10%	70	200	4,95	9,70	420,31	2,252	2,257	48,038	42,817
V252	10%	70	200	4,95	9,50	419,61	2,295			
V253	10%	70	200	5,00	9,65	425,63	2,246			
V254	10%	70	200	5,00	9,60	418,86	2,222			
V255	10%	70	200	4,95	9,70	425,08	2,277			
V256	10%	70	200	4,95	9,70	419,91	2,249			

Id	Subs. de cimento por PDV	Idade	Temper de ensaio no forno	Diâm. do CP	Altura do CP	Massa	Massa esp.	Massa esp. (média)	Mód. de elast. din.	Mód. de elast. est.
		<i>j</i>		<i>D</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	ρ	ρ	<i>Ecd</i>	<i>Eci</i>
		(dias)		(cm)	(cm)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	GPa	GPa
R834	10%	70	300	4,90	9,65	428,14	2,353	2,308	48,417	42,336
R835	10%	70	300	4,90	9,65	412,06	2,264			
R836	10%	70	300	4,85	9,60	413,49	2,331			
R814	10%	70	300	4,95	9,60	426,50	2,309			
R815	10%	70	300	4,95	9,70	429,99	2,303			
R816	10%	70	300	4,95	9,70	426,90	2,287			

Id	Subs. de cimen to por PDV	Idade	Temper de ensaio no forno	Diâm. do CP	Altura do CP	Massa	Massa esp.	Massa esp. (média)	Mód. de elast. din.	Mód. de elast. est.
		<i>j</i>		<i>D</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	ρ	ρ	<i>Ecd</i>	<i>Eci</i>
		(dias)		(cm)	(cm)	(g)	(g/cm3)	(g/cm3)	GPa	GPa
V361	10%	70	400	4,95	9,65	423,05	2,278	2,086	27,147	20,832
V362	10%	70	400	5,05	9,80	426,76	2,174			
V363	10%	70	400	4,95	9,60	224,92	1,217			
V364	10%	70	400	4,95	9,65	427,83	2,304			
V365	10%	70	400	5,00	9,77	429,30	2,238			
V366	10%	70	400	4,92	9,60	421,15	2,308			

ANEXO A – Dados dos ensaios de granulometria a laser

- PÓ DE VIDRO (PDV)

Diam um	Percent	Diam um	Percent	Diam um	Percent
1.000	0.10	0.500	0.11	1.000	0.20
2.000	0.28	1.000	0.10	2.000	0.39
5.000	4.71	2.000	0.31	5.000	4.84
10.00	25.66	5.000	4.99	10.00	25.71
20.00	62.30	10.00	27.00	20.00	62.31
45.00	86.10	20.00	65.62	45.00	86.02
75.00	92.83	45.00	90.64	75.00	92.73
100.0	94.85	75.00	97.88	100.0	94.74
200.0	99.49	100.0	99.66	200.0	99.49
300.0	100.00	200.0	100.00	300.0	100.00

- CIMENTO

Diam um	Percent	Diam um	Percent	Diam um	Percent
0.500	0.69	0.500	0.70	0.500	0.71
1.000	4.03	1.000	4.05	1.000	4.07
2.000	9.52	2.000	9.54	2.000	9.59
5.000	25.03	5.000	25.01	5.000	25.08
10.00	42.38	10.00	42.30	10.00	42.34
20.00	66.17	20.00	66.08	20.00	66.18
45.00	91.91	45.00	91.76	45.00	91.92
75.00	98.31	75.00	98.24	75.00	98.31
100.0	99.60	100.0	99.59	100.0	99.61
200.0	100.00	200.0	100.00	200.0	100.00

- AREIA

Diam um	Percent	Diam um	Percent	Diam um	Percent
20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00
45.00	0.00	45.00	0.00	45.00	0.00
75.00	0.00	75.00	0.00	75.00	0.00
100.0	0.07	100.0	0.23	100.0	0.24
200.0	28.02	200.0	28.70	200.0	29.09
300.0	70.42	300.0	70.97	300.0	71.41
400.0	90.06	400.0	90.33	400.0	90.58
500.0	97.29	500.0	97.38	500.0	97.46
600.0	99.69	600.0	99.71	600.0	99.71
700.0	100.00	700.0	100.00	700.0	100.00

- PÓ DE QUARTZO (PDQ)

Diam um	Percent	Diam um	Percent	Diam um	Percent
1.000	0.79	1.000	0.79	1.000	0.82
2.000	1.64	2.000	1.65	2.000	1.67
5.000	8.89	5.000	8.88	5.000	8.90
10.00	22.20	10.00	22.21	10.00	22.23
20.00	46.71	20.00	46.61	20.00	46.67
45.00	80.98	45.00	80.83	45.00	80.79
75.00	93.56	75.00	93.48	75.00	93.39
100.0	97.03	100.0	96.99	100.0	96.90
200.0	99.87	200.0	99.87	200.0	99.86
300.0	100.00	300.0	100.00	300.0	100.00

- SÍLICA ATIVA (SA)

Diam um	Percent	Diam um	Percent	Diam um	Percent
0.100	0.00	0.050	0.00	0.050	0.00
0.200	0.00	0.100	0.00	0.100	0.00
0.500	0.00	0.200	0.00	0.200	0.00
1.000	0.00	0.500	0.00	0.500	0.00
2.000	0.00	1.000	0.00	1.000	0.00
5.000	0.00	2.000	0.00	2.000	0.00
10.00	15.16	5.000	0.00	5.000	0.00
20.00	44.52	10.00	16.44	10.00	16.53
45.00	98.21	20.00	44.90	20.00	45.27
75.00	100.00	45.00	100.00	45.00	100.00