

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIA**

GUILHERME DE SOUZA SUMITOMO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO
UHPFRC PRODUZIDO COM FIBRAS DE AÇO E DE
PVA SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS**

**CAMPINAS
2022**

GUILHERME DE SOUZA SUMITOMO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO
UHPFRC PRODUZIDO COM FIBRAS DE AÇO E DE
PVA SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada para o curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador(a): Prof.(a) Dr.(a) Lia Lorena Pimentel.

Co-Orientador(a): Prof.(a) Dr.(a) Ana Elisabete Paganelli
Guimarães de Avila Jacintho.

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

620.136 Sumitomo, Guilherme de Souza
S955e Estudo do comportamento mecânico do UHPFRC produzido com fibras de aço e de PVA submetidos a elevadas temperaturas / Guilherme de Souza Sumitomo. - Campinas: PUC-Campinas, 2022.
123 f.: il.
Orientador: Lia L. Pimentel; Coorientador: Jacintho, Ana Elisabete P. G. de Ávila.
Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.
Inclui bibliografia.

1. Concreto. 2. Concreto de alta resistência. 3. Fibras. I. Pimentel, Lia L.. II. Ávila, Jacintho, Ana Elisabete P. G. de III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.

CDD 22. ed. 620.136

GUILHERME DE SOUZA SUMITOMO

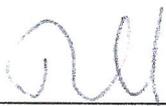
ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO UHPFRC PRODUZIDO COM FIBRAS DE AÇO E DE PVA SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Lia Lorena Pimentel.

Co-orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Ana Elisabete Paganelli G. de A. Jacintho.

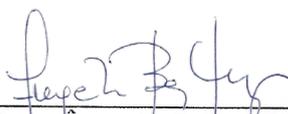
Dissertação defendida e aprovada em 25 de fevereiro de 2022 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Ângela Borges Masuero
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

AGRADECIMENTOS

À Profa Dra Lia Lorena Pimentel, pela sua orientação, disposição, dedicação, carinho e paciência durante todo esse caminho. Não poderia escolher uma orientadora melhor para este trabalho.

À Profa Dra Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho, por sua contribuição, disponibilidade, incentivo e carinho.

Ao Prof Dr Marco Antônio Carnio, por todo seu suporte e contribuição.

Aos meus pais, que estão sempre presentes em minha vida, me apoiando e nunca deixando de acreditar no meu potencial de seguir em frente.

Aos meus amigos, que me apoiam, incentivam e que estão sempre presentes.

Aos técnicos dos laboratórios Igor, Welington, Fernando, Ricardo, Dulce, Lígia e Jair, que auxiliaram no uso de equipamentos e também pela ajuda nos ensaios realizados.

Aos professores da Pós-Graduação, que ministraram suas aulas com bastante carinho, compartilhando conhecimentos e sempre apoiando seus alunos em suas pesquisas.

À Caroline Marção, pelo apoio e colaboração no desenvolvimento da análise dos resultados.

À CAPES pois, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

As empresas Belgo Bekaert Arames, MCBauchemie, Kuraray e Beneficiadora de Minerais Rio Claro pelo fornecimento de materiais.

RESUMO

SUMITOMO, Guilherme de Souza. *Estudo do comportamento mecânico do UHPFRC produzido com fibras de aço e de PVA submetidos a elevadas temperaturas*. 2022. 120f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

O concreto de ultra alto desempenho (UHPFRC) é um tipo especial de concreto que apresenta elevada resistência mecânica e durabilidade, ductilidade, ausência de agregados graúdos e uma microestrutura densa. Suas principais aplicações são em pontes, passarelas, obras arquitetônicas e reparação estrutural. Em situações de incêndio, é necessária a integridade da estrutura por tempo suficiente para que vidas sejam salvas antes de seu colapso. Uma das maiores preocupações do concreto sob elevadas temperaturas, além da perda de resistência, é o deslocamento, que tem ocorrência mais acentuada em concretos de elevadas resistências. O uso de fibras poliméricas é considerado benéfico para o controle do deslocamento, pois promove um aumento da porosidade no compósito que diminuem a pressão interna gerada pelo vapor de água, no entanto a adição de fibras poliméricas em UHPFRC podem reduzir significativamente a resistência a tração. Este trabalho teve o objetivo de avaliar as propriedades físicas e mecânicas do UHPFRC produzido com fibras metálicas e de PVA quando submetidos à elevadas temperaturas. Para isso, o trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira etapa consistiu em um delineamento fatorial para estudar o comportamento da resistência à compressão e módulo de elasticidade do UHPFRC frente a diferentes dosagens de fibras de aço e PVA e sob diferentes temperaturas de exposição a fim de determinar um traço ótimo com ambas as fibras que apresentasse um melhor comportamento antes e depois de tal exposição. A segunda etapa é a caracterização física e mecânica desse traço ótimo e de um traço referência (somente 2,00% de fibras de aço) para avaliar seu desempenho. Durante o procedimento de aquecimento dos traços na etapa 1, somente o uso das fibras de PVA não foram suficientes para prevenir a ocorrência do deslocamento para temperaturas de 300°C ou superiores, causando danos em alguns corpos de prova desde pequenas fissuras até a sua degradação total. Com base nos resultados obtidos, o traço (definido como ótimo) que apresentou os melhores resultados de resistência a compressão e módulo de elasticidade foram obtidos para a dosagem de 0,50% das fibras de PVA e 1,65% de fibras de aço. Observou-se na etapa 2 que o traço ótimo apresentou, uma queda de 12% e 0,04% de resistência à compressão e do módulo de elasticidade, respectivamente. O traço ótimo foi classificado como UHPFRC 130/145, sendo uma classificação abaixo da que o traço referência atingiu (UHPFRC 150/165). Para a resistência à tração por flexão em quatro pontos, o traço ótimo apresentou um desempenho superior ao traço referência, tendo o limite de elasticidade 40% acima, enquanto que para o ensaio em 3 pontos, o comportamento entre os dois traços foi bastante semelhante, apresentando um comportamento hardening limitado. O traço ótimo apresentou um comportamento mecânico à tração por flexão semelhante ao traço referência, apesar de não ter apresentado neste estudo, o resultado esperado para a proteção de estruturas de UHPFRC em situação de incêndio.

Palavra-chave: Concreto de ultra alto desempenho, UHPC, resistência ao fogo, deslocamento, concreto reforçado com fibras, delineamento fatorial

ABSTRACT

SUMITOMO, Guilherme de Souza. *Study of the mechanical behavior of UHPFRC produced with steel and PVA fibers subjected to high temperatures*. 2022. 120f. Dissertation (Master's in Urban Infrastructure Systems) – Postgraduate Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifical Catholic University of Campinas, Campinas, 2022.

Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) is a special type of concrete that features high mechanical strength and durability, ductility, absence of coarse aggregates and a dense microstructure. Its main applications are in bridges, footbridge, architectural works and structural repair. In fire situations, the integrity of the structure must be long enough for lives to be saved before it collapses. One of the biggest concerns of concrete at high temperatures, in addition to the loss of strength, is spalling, which is more pronounced in high-strength concretes. The use of polymeric fibers is considered beneficial for the control of spalling, as it promotes an increase in the porosity in the composite that reduces the internal pressure generated by the water vapor, however the addition of polymeric fibers in UHPFRC can significantly reduce the tensile strength. This work aimed to evaluate the physical and mechanical properties of UHPFRC produced with metallic and PVA fibers when subjected to high temperatures. For this, it was divided into two stages: the first stage consisted of a factorial design to study the behavior of the compressive strength and modulus of elasticity of UHPFRC against different dosages of steel and PVA fibers and under different exposure temperatures in order to determine an optimal mix with both fibers and that it presented a better behavior before and after such exposure. The second step is the physical and mechanical characterization of this optimal mix and a reference mix (only 2,00% steel fibers) to assess its performance. During the heating procedure of the mixes in step 1, only the use of PVA fibers was not enough to prevent spalling at temperatures of 300°C or higher, causing damage to some specimens from small cracks to their total degradation. Based on the results obtained, the mix (defined as optimal) that presented the best results of compressive strength and modulus of elasticity was obtained for the dosage of 0.50% of PVA fibers and 1.65% of steel fibers. It's observed the optimal mix showed a decrease of 12% and 0,04% of compressive strength and Young's modulus, respectively. The optimal mix was classified as UHPFRC 130/145, being one classification lower than the reference mix (UHPFRC 150/165). In four-point bending test, the optimal mix performed better than the reference mix, with limit of elasticity 40% above, while in three-point bending test the performance between the mixes was quite similar, exhibiting a limited strain hardening behavior. The optimal mix presented a flexure tensile mechanical behavior similar to the reference mix, despite it doesn't have presented in this study the expected result for the protection of UHPFRC structures in fire situation.

Keyword: *Ultra high performance concrete, UHPC, fire resistance, spalling, fiber reinforced concrete, factorial design*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Edifício Joelma durante o incêndio (a) e após o incêndio (b).....	17
Figura 2 - Incêndio em casebres debaixo da ponte José Sarney.....	18
Figura 3 - Ponte da Indústria danificada pelo incêndio	19
Figura 4 - Incêndio na costa de Big Sur próximo a ponte Bixby.....	19
Figura 5- Passarela de Gärtnerplatz	23
Figura 6 - Seção transversal da passarela Gärtnerplatz.....	24
Figura 7 - Seção transversal no vão médio da ponte com concreto convencional (a) e o posicionamento da armadura (b)	25
Figura 8 -Seção transversal no vão médio da ponte com UHPFRC (a) e o posicionamento da armadura (b)	25
Figura 9 – Vista interior da estação Montpellier (a) e vista da peça pré-moldada (b)	26
Figura 10 – Instalação do revestimento de UHPFRC na estrutura	27
Figura 11 - Juntas com vazamento (à esquerda) e pedestal deteriorado (à direita)	27
Figura 12 – Armaduras originais e de continuidade (a), colocação do UHPFRC (b) e conexão finalizada (c).	28
Figura 13 – Esquema da concentração de tensões para concreto com e sem reforço com fibras	33
Figura 14 - Gráfico tensão X deformação do UHPFRC	35
Figura 15 - Comportamento softening (a) e hardening (b) do concreto reforçado com fibras.....	36
Figura 16 - Diferentes tipos de ensaio de resistência à tração	38
Figura 17 - Diagrama de Carga x CMOD, identificando as cargas residuais e método de cálculo da resistência residual	39
Figura 18 - Diagrama de Carga x Deslocamento vertical, identificando as cargas residuais e método de cálculo da resistência residual	40
Figura 19 - Ensaio de tração por flexão em três pontos.....	41
Figura 20 - Distribuição da deformação e tensão das seções fissuradas e não fissuradas.....	42
Figura 21 - Ensaio de tração por flexão em quatro pontos	44
Figura 22 - Definição do f_{ctf} caso haja um máximo local da curva.....	45

Figura 23 - Definição do f_{ctf} no caso não haja um máximo local da curva.....	46
Figura 24 - Mecanismo do deslocamento	48
Figura 25 - Micrografia de UHPFRC com fibras de polipropileno antes (a) e depois (b) de exposto à temperaturas elevadas.....	50
Figura 26 – Planejamento fatorial 2^3	53
Figura 27 - Fluxograma da metodologia empregada na etapa 1	55
Figura 28 - Fluxograma da metodologia empregada na etapa 2	55
Figura 29 - Curva granulométrica dos materiais obtidos em laboratório	60
Figura 30 - Cura dos corpos de prova.....	65
Figura 31 - Corpos de prova secos em estufa	67
Figura 32 - Mufla utilizada.....	67
Figura 33 - Curva de aquecimento.....	67
Figura 34 - Molde preenchido com UHPFRC (a) e determinação do diâmetro após retirada do molde (b).....	72
Figura 35 - Ensaio de resistência à tração por flexão em 4 pontos.....	74
Figura 36 - Ensaio de resistência à tração em 3 pontos	74
Figura 37 - Posicionamento do sensor sob o entalhe	75
Figura 38 - Superfície de resposta para índice de consistência.....	81
Figura 39 - Deslocamento ocorrido durante aquecimento	84
Figura 40 - Superfícies de resposta para avaliação de diferentes temperaturas fixadas (a) 20°C,(b) 310°C e (c) 600°C	86
Figura 41 - Superfícies de resposta para avaliação de diferentes temperaturas fixadas (a) 20°C, (b) 138°C e (c) 310°C	90
Figura 42 - Superfícies de resposta para fibra de PVA (a) e fibra de aço (b) fixados	91
Figura 43 - Curvas médias do ensaio de resistência à tração por flexão em 4 pontos (a) e ampliação do trecho elástico (b)	98
Figura 44 - Corpo de prova dos traços referência (em cima) e ótimo (em baixo) após ensaio.....	99
Figura 45 - Curvas médias do ensaio de resistência à tração por flexão em 3 pontos (a) e ampliação do trecho elástico (b)	100
Figura 46 - Curvas médias tensão x abertura de fissura.....	102
Figura 47 - Equipamento para termogravimetria.....	116
Figura 48 - Curva termogravimétrica obtida.....	116

Figura 49 - Curvas termogravimétricas da amostra 3 (à esquerda) e 4 (à direita)	117
Figura 50 - Gráfico de pareto para resistência à compressão	121
Figura 51 - Gráfico de valores experimentais vs valores previstos pelo modelo para resistência à compressão	121
Figura 52 - Gráfico de pareto para módulo de elasticidade	123
Figura 53 - Gráfico de valores experimentais vs valores previstos pelo modelo para módulo de elasticidade	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classe de resistência do UHPFRC segundo NF P18-470	35
Tabela 2 - Traço de referência de UHPFRC utilizado	56
Tabela 3 - Composição química do cimento	57
Tabela 4 - Ensaio e normas de caracterização para os materiais.....	58
Tabela 5 - Resistência à compressão do cimento Portland	58
Tabela 6 - Massa específica do cimento, sílica ativa, areia de quartzo e pó de quartzo	59
Tabela 7 - Resultados da granulometria	59
Tabela 8 - Características do aditivo.....	60
Tabela 9 - Características das fibras.....	61
Tabela 10 - Propriedades de fibras poliméricas utilizadas em estudos de UHPFRC	62
Tabela 11 - Procedimentos de mistura, fluidez e resistência a compressão estudados por Hiremath e Yaragal (2017)	64
Tabela 12 - Resistência à compressão do traço piloto e obtidos por Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018).....	65
Tabela 13 - Variáveis e intervalos de valores adotados.....	68
Tabela 14 - Variáveis codificadas	69
Tabela 15 - Combinação das variáveis codificadas e identificação dos traços.....	70
Tabela 16 - Dosagem de fibras de cada traço.....	71
Tabela 17- Ensaio e normas utilizados em UHPFRC no estado fresco	72
Tabela 18 - Características e respectivas normas de ensaio para UHPFRC no estado endurecido.....	73
Tabela 19 - Características, normas e corpo de provas para avaliação do UHPFRC	73
Tabela 20 - Índice de consistência e teor de ar incorporado.....	80
Tabela 21 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios	82
Tabela 22 - Dados inseridos no software STATISTICA 7 para resistência à compressão.....	83
Tabela 23 - Resistência à compressão obtida no modelo e no laboratório.....	85
Tabela 24 - Resultados de resistência à compressão do estudo de Sanchayan e Foster (2016) e de Liang <i>et al.</i> (2018).....	88

Tabela 25 – Módulo de elasticidade obtido no modelo e no laboratório	89
Tabela 26 - Resultados de módulo de elasticidade do estudo de Sanchayan e Foster (2016) e de Rasul <i>et al.</i> (2020)	93
Tabela 27 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios dos traços referência e ótimo	93
Tabela 28 Resistência à compressão dos traços Referência e Ótimo	94
Tabela 29 Módulo de elasticidade para Traço Referência e Ótimo.....	96
Tabela 30 - Resistência à tração por flexão em 4 pontos para os traços Referência e Ótimo	97
Tabela 31 - Resistência à tração por flexão em 3 pontos	101
Tabela 32 - Determinação do comportamento hardening sobre flexão.....	102
Tabela 33 - Dados obtidos da Termogravimetria e Massa específica da sílica ativa	117
Tabela 34 - Fatores MANOVA pelo STATISTICA 7 para resistência à compressão	120
Tabela 35 - Tabela MANOVA para resistência à compressão.....	120
Tabela 36 - Fatores MANOVA pelo STATISTICA 7 para módulo de elasticidade	122
Tabela 37 - Tabela MANOVA para resistência à compressão.....	122

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo.....	22
1.1.1. Objetivo geral.....	22
1.1.2. Objetivo específico.....	22
2. REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1. Aplicações do UHPFRC.....	23
2.2. Materiais componentes do UHPFRC	28
2.2.1. Metodologia de empacotamento de partículas	29
2.2.2. Concreto reforçado com fibras.....	32
2.3. Caracterização do UHPC.....	33
2.3.1. Propriedades Físicas	33
2.3.2. Propriedades Mecânicas.....	34
2.4. Resistência ao fogo	46
2.5. Planejamento experimental.....	51
2.5.1. Planejamento fatorial 2^k	51
3. METODOLOGIA	55
3.1. Determinação do traço.....	56
3.1.1. Caracterização dos materiais.....	57
3.2. Procedimento de mistura, moldagem e cura.....	63
3.3. Estudo do traço piloto	65
3.4. Comportamento do UHPFRC a temperaturas elevadas	66
3.4.1. Delineamento experimental	68
3.4.2. Caracterização do UHPFRC	71
3.5. Caracterização dos Traços finais.....	73
3.5.1. Resistência à tração por flexão.....	73
3.6. Análise dos resultados	75
3.6.1. Método de Grubbs	75
3.6.2. Análise de variância multifator (MANOVA)	77
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	79

4.1. Avaliação do comportamento do UHPFRC frente a elevadas temperaturas	79
4.1.1. Comportamento no estado fresco	79
4.1.2. Comportamento no estado endurecido	82
4.2. Massa específica, absorção de água e índice de vazios do traço referência e do traço ótimo	93
4.3. Análise do comportamento mecânico do traço referência e do traço ótimo	94
4.3.1. Resistência à compressão	94
4.3.2. Módulo de elasticidade	95
4.3.3. Resistência à tração por flexão em 4 pontos	96
4.3.4. Resistência à tração por flexão em 3 pontos	99
5. CONCLUSÃO	103
5.1. Sugestão de trabalhos futuros	105
6. REFERÊNCIAS	106
ANEXO A – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS E MASSA ESPECÍFICA DA SÍLICA ATIVA	116
ANEXO B – MODELO ADOTADO	119
Análise de ajuste do modelo para resistência à compressão	120
Análise de ajuste do modelo para módulo de elasticidade	122

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a tecnologia do concreto foi sendo desenvolvida para atender as necessidades estruturais, arquitetônicas, econômicas e de sustentabilidade. Sendo um dos materiais mais utilizados na área da construção, novos tipos de concretos foram surgindo, como o concreto autoadensável, concreto de alta resistência, reforçado com fibras, leve, compactado com rolo, com resíduos, entre outros (MANOJ; KUMAR; SANTHOSH, 2016). Dentre eles, o concreto de ultra alto desempenho (UHPC) é um tipo de concreto que surgiu mais recentemente.

As décadas de 1970 e de 1980, segundo HABER *et al.* (2018), foi um período no qual a composição de compósitos cimentício sofria avanços tecnológicos com o uso de aditivos superplastificantes, de reforços com fibras e otimização da granulometria dos agregados. Um resultado desse desenvolvimento foi o concreto de alta resistência (CAR), cuja resistência à compressão, segundo Sidodikromo, Chen e Habib (2019), atingia valores superiores a 55 MPa.

No início da década de 1990, foi introduzido por Pierre Richard o concreto de pós reativos, composto por materiais pulverulentos que são quimicamente reativos. Foi desenvolvido para melhorar a homogeneização do compósito removendo os agregados graúdos, otimização no empacotamento das partículas e melhoramento da tenacidade, podendo conter, ou não, a inclusão de fibras. Atingindo valores de resistência à compressão superiores a 170 MPa e de resistência à tração maiores que 8MPa, foi reconhecido como um novo material revolucionário para a indústria da construção (MAYHOUB *et al.*, 2021; PIERRE; HABEL, 2017; SANJUÁN; ANDRADE, 2021; SIDODIKROMO; CHEN; HABIB, 2019).

Pode-se entender o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras, ou UHPFRC (da sigla em inglês Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete) como uma evolução e combinação das propriedades do concreto de alta resistência, concreto autoadensável e concreto reforçado com fibras, pois é uma combinação de elevada resistência, redução de porosidade devido à melhora

da compactação dos materiais e do uso de pozolanas, alta fluidez e reforçado com fibras (CHRIST *et al.*, 2019a; SOHAIL *et al.*, 2018; TOUTLEMONDE *et al.*, 2018).

O UHPFRC é comumente definido pela sua propriedade mecânica e composição. É um compósito que atinge valores de resistência à compressão superiores a 150 MPa, resistência à tração na flexão acima de 20 MPa e módulo de elasticidade acima de 45 GPa (TOUTLEMONDE *et al.*, 2018; YOO; BANTHIA; YOON, 2017; AFNOR, 2016b). É um material composto por elevado consumo de cimento, sílica ativa, areia fina, sem uso de agregado graúdo, relação água-cimento bastante reduzida, adição de fibras e de aditivos plastificantes (BUTTIGNOL; SOUSA; BITTENCOURT, 2017; THOMAS; SORENSEN, 2017).

De acordo com Costa e Cabral (2019), a relação entre o UHPFRC e o concreto autoadensável está baseada no comportamento de ambos no estado fresco. Por meio do uso de aditivos plastificantes, é adquirida elevada fluidez, mesmo com baixas quantidades de água, sendo capaz de total compactação sem utilização de equipamentos vibratórios, somente com o seu peso próprio.

Ao mesmo tempo em que o material consegue atingir uma elevada resistência à compressão, seu comportamento frágil também aumenta. Durante a aplicação de carga, fissuras de diferentes proporções se formam, diminuindo suas resistências mecânicas e de durabilidade, podendo atingir um colapso na estrutura mais rapidamente que as estruturas feitas com o concreto convencional, justificando assim a necessidade do uso de fibras em sua produção (ŠPAK *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2018).

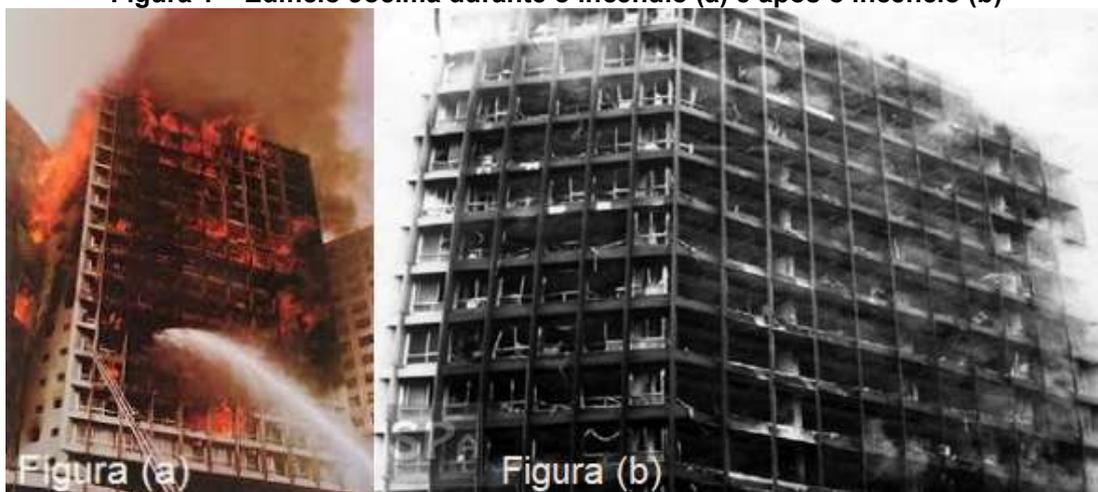
As fibras mais utilizadas como reforço para os traços de UHPFRC são microfibras de aço, que por apresentarem elevado módulo de elasticidade e resistência mecânica. São utilizadas em grandes quantidades, que variam entre 2% e 6% em relação ao peso específico das fibras (CHRIST, 2019a; RUSSEL, G; GRAYBEAL, 2013). Com isso, é provido ao UHPFRC uma capacidade de resistência após sua fissuração e também um comportamento dúctil.

Segundo Toutlemonde *et al.* (2018), o UHPFRC apresenta uma ampla área de aplicação, sendo algumas delas: elementos estruturais em pontes e

passarelas, obras arquitetônicas como painéis de fachada e cobertura, reforço e restauração estrutural. Entretanto, segundo Cunha, Al-Rikabi e Barros (2018), essas aplicações podem apresentar um risco, ao serem expostas em situações de elevadas temperaturas, como em um caso de incêndio

Grandes incêndios no passado intensificaram a preocupação sobre sua prevenção e combate no Brasil. Um exemplo de caso marcante foi o incêndio ocorrido no edifício Joelma (atual edifício Praça das Bandeiras). De acordo com ANDRADE e GODINHO (2014) e MENDONÇA (2014), o edifício comercial alugado ao Banco Crefisul de investimentos se deparou com um incêndio em fevereiro de 1974 (Figura 1), ocasionado por um curto circuito de um aparelho de ar condicionado no 12º andar. O fogo se espalhou rapidamente aos pavimentos superiores por apresentarem materiais combustíveis como móveis de madeira, causando a morte de 191 pessoas e ferindo outras 300 pessoas.

Figura 1 – Edifício Joelma durante o incêndio (a) e após o incêndio (b)



Fonte: ANDRADE e GODINHO (2014)

Atualmente, situações de incêndio ainda ocorrem com bastante frequência. Segundo Portal incêndio ([s.d.]), as principais causas de incêndio podem ocorrer por meio da eletricidade (como curto circuito, mau contato e super aquecimento), chama exposta, presença de líquidos ou gases inflamáveis, centelhas e faíscas.

Pontes e viadutos também podem ser alvos da ação do fogo, por meio de situações de incêndio que podem ocorrer em suas proximidades. Tal situação

pode trazer como consequências impedimento do trânsito, comprometimento da estrutura ou riscos às pessoas próximas.

Na ponte José Sarney, em São Luis, casebres debaixo da estrutura foram totalmente consumidos por um incêndio (Figura 2), não sendo apontados neste caso danos severos a estrutura (IMIRANTE, 2021; IMPARCIAL, 2021).

Figura 2 - Incêndio em casebres debaixo da ponte José Sarney



Fonte: IMIRANTE (2021)

Em Roma, de acordo com Mail Online (2021), a Ponte da Indústria foi inaugurada por Papa Pio IX em 1863, servindo originalmente como uma linha ferroviária que depois foi reformada equipada para atender ao tráfego de carros e pedestres. Tal ponte, em outubro de 2021, foi atingida por um incêndio (Figura 3), sendo bastante danificada.

Segundo Mail Online (2021) e Notícias ao minuto (2021), o fogo, que pode ter sido iniciado por um curto circuito, foi alimentado por um cano de gás, danificando partes da estrutura e fez com que uma seção da passarela de pedestres externa da ponte e trecho sob o leito da estrada que transportava linhas de serviços públicos se rompessem, caindo no rio Tibre. Além de ter impedido o tráfego e a navegação próxima à ponte, houve também, corte de energia nas áreas circundantes.

Figura 3 - Ponte da Indústria danificada pelo incêndio



Fonte: NOTÍCIAS AO MINUTO (2021)

Um caso recente, em janeiro de 2022, foi o incêndio que ocorreu na costa de Big Sur, na Califórnia. De acordo com WEINSTEIN (2022), o fogo se espalhou por 1050 acres (aproximadamente 425 hectares) e conseguiu se aproximar da ponte Bixby conforme ilustra a Figura 4, danificando parte de sua estrutura.

Figura 4 - Incêndio na costa de Big Sur próximo a ponte Bixby



Fonte: WEINSTEIN (2022)

Com base em Helene, Britez e Carvalho (2019), apesar do concreto apresentar um bom comportamento em altas temperaturas, já que é um material não combustível e com baixa condutividade térmica (além de não emitir gases tóxicos quando aquecido), tal exposição acaba gerando uma queda em seu desempenho estrutural, além de possíveis danos como rachaduras e deslocamentos que podem comprometer toda a estrutura.

Segundo Helene, Britez e Carvalho (2019), além da queda de resistência, os concretos de elevada resistência submetidos à altas temperaturas são mais suscetíveis ao lascamento explosivo (também chamado de deslocamento), fenômeno o qual é, teoricamente, causado pela pressão do vapor de água presente nos poros internos do compósito. Apesar das fibras metálicas melhorarem as propriedades mecânicas e controle de fissuração tanto em temperatura ambiente quanto em elevadas temperaturas, não é capaz de evitar a ocorrência do deslocamento.

A utilização de fibras poliméricas é considerada como um meio de prevenção de deslocamento, pois, segundo Park *et al.* (2019), as fibras poliméricas apresentam uma temperatura de derretimento abaixo de 300°C (algumas abaixo de 200°C, dependendo do seu tipo) e que, após seu derretimento, criam uma rede de poros dentro do concreto que se torna, assim, meios de escape para o vapor preso.

Segundo Pierre e Habel (2017), UHPFRC é um material recente, em desenvolvimento há aproximadamente 20 anos e sua aceitação e popularidade está em crescimento entre arquitetos e engenheiros de pontes. Desde os anos 1990, diversos países, como França, Alemanha, Japão, Austrália, Estados Unidos e Coréia, começaram a estudar e desenvolver procedimentos normativos, de códigos e de orientações para uso e produção desse tipo de material.

Essa nova tecnologia ainda é vista com pouco interesse no Brasil pois, segundo Christ *et al.* (2019a), seu custo inicial é bastante elevado devido aos componentes como a sílica ativa e o aditivo superplastificante, que são utilizados em elevadas quantidades. Somado a isso, Buttignol, Sousa e Bittencourt (2017) e Nilsson (2018) apontam que o elevado consumo de cimento, uso de agregados

de alta qualidade e de fibras metálicas específicas também contribuem significativamente nesse custo.

Além disso, não existem procedimentos ou orientações normativas nacionais referentes ao UHPFRC para sua caracterização, o que gera insegurança em sua aplicação em obras. Logo, é importante haver a contribuição de estudos de caracterização do UHPFRC, trazendo normas estrangeiras e metodologias de ensaios para que se consiga uma melhor análise e compreensão do seu comportamento. Assim, estudos sobre o assunto possibilitarão futuramente a criação de normas nacionais e contribuirão para a dosagem de UHPFRC utilizando materiais locais, de modo a diminuir significativamente seu custo de produção, viabilizando sua utilização em soluções estruturais ou arquitetônicas em que o concreto convencional não seja tecnicamente ou economicamente viável.

Entretanto, é importante levar em consideração não apenas a etapa inicial, mas também os benefícios presentes durante toda a vida útil da estrutura, além de gerar um menor impacto ambiental. Segundo Dong (2018), o UHPFRC, devido à sua elevada resistência mecânica e durabilidade, permite a construção de elementos estruturais com menor seção transversal e, conseqüentemente, um menor consumo de materiais. Somado a isso, a estrutura consegue manter um tempo de serviço mais prolongado do que o concreto convencional, ao mesmo tempo em que necessita de menos manutenção, reparo e reabilitação da estrutura, gerando assim uma redução de custos ao longo de sua vida útil.

Liang (2018) e Banerji, Kodur e Solhmirzaei (2020) apontam que altas temperaturas ainda são uma ameaça para todos os tipos de concretos, inclusive para o UHPFRC. Dentre os estudos já realizados sobre a caracterização do UHPFRC, há poucos estudos que exploram a eficiência do uso simultâneo de fibras de aço e poliméricas em prevenir o efeito de deslocamento de ocorrer no UHPFRC. O uso de fibras poliméricas na composição do UHPFRC pode ajudar a prevenir o deslocamento, entretanto, também afetam seu comportamento mecânico. Frente a isso, é importante estudar e analisar os efeitos que as fibras poliméricas podem causar no desempenho do UHPFRC.

1.1. Objetivo

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades físicas e mecânicas do UHPFRC produzido com fibras metálicas e de PVA quando submetidos à elevadas temperaturas assim como analisar a influência das fibras de PVA tem sobre o UHPFRC.

1.1.2. Objetivo específico

Como objetivo específico, pretende-se:

- determinar e verificar um traço com fibras de aço e fibras de PVA que apresente um comportamento mecânico que atenda a norma NF P18-470 para classe 150/165, sendo esta a mínima para utilização em elementos estruturais;
- estudar e determinar um modelo de superfície de resposta sobre a influência de elevadas temperaturas e variação da dosagem de fibras metálicas e de PVA diante a resistência à compressão e módulo de elasticidade do UHPFRC.
- analisar a tenacidade e ductilidade do UHPFRC frente à combinação de fibras metálicas e polimérica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

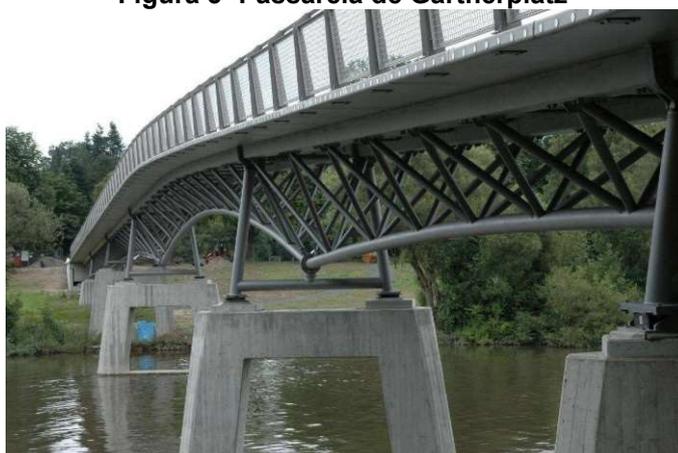
Neste capítulo são apresentadas as aplicações para o UHPFRC, suas características, o método de dosagem, a importância do uso de fibras em sua composição para melhorar as propriedades mecânicas e de resistência ao fogo, bem como apresentar uma introdução ao delineamento fatorial aplicado ao programa experimental.

2.1. Aplicações do UHPFRC

Pelo fato do UHPFRC apresentar propriedades mecânicas e de durabilidade superiores aos demais concretos, sua principal aplicação é em pontes, passarelas, viadutos, estrutura marítima e reforços estruturais. Além disso, é possível também reduzir as dimensões de peças estruturais e não estruturais, resultando em diminuição do peso próprio e economia de volume de concreto, viabilizando mais elementos arquitetônicas (ALMEIDA, 2015; ŠPAK *et al.*, 2016; TOUTLEMONDE *et al.*, 2018).

A ponte Gärtnerplatz (Figura 5), finalizada em julho de 2007, que atravessa o rio Fulda localizado em Fassel é o primeiro projeto de ponte utilizando UHPFRC na Alemanha e também é a primeira ponte com estrutura híbrida de UHPFRC e aço. (FEHLING; BUNJE; SCHMIDT, 2013).

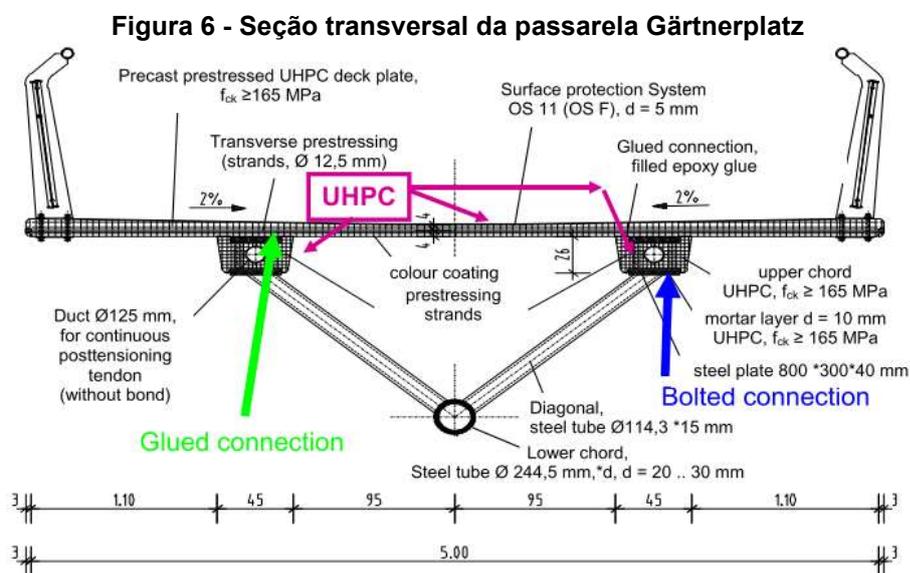
Figura 5- Passarela de Gärtnerplatz



Fonte: FEHLING, BUNJE e SCHMIDT (2013)

Segundo Fehling, Bunj e Schmidt (2013) e Stengel e Schiebl (2009), consiste em banzos superiores protendidos pré-moldadas e elementos de tabuleiro de ponte pré-moldados, ambos feitos de UHPFRC. Os banzos inferiores

e as diagonais são feitas de aço com seções tubulares. A seção transversal da passarela é apresentada na Figura 6.



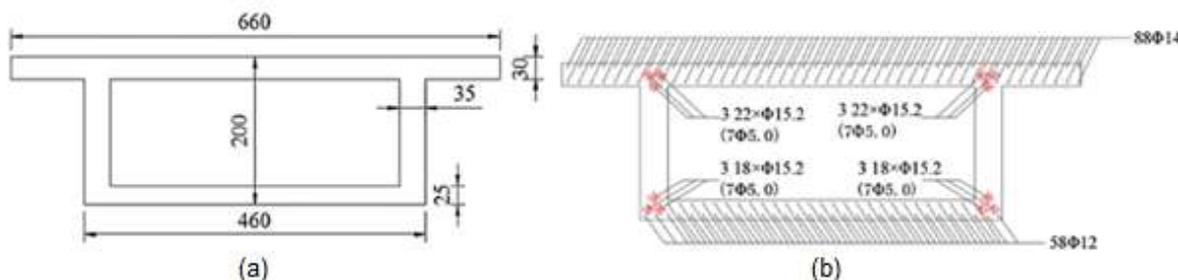
Entre as rampas que dão o acesso à passarela, há seis trechos com vãos de comprimentos entre 12 e 36 metros. A continuidade do sistema de vãos é fornecida por conexões aparafusadas das placas de aço que são fixadas nas extremidades dos banzos de UHPFRC e do banzo inferior de aço. Os tabuleiros de dimensões 2 metros de largura por 5 metros de comprimento são colados aos banzos superiores e entre si. A colagem foi selecionada porque haveria dificuldade de colocar os conectores mecânicos (aço) nos elementos esbeltos de UHPFRC (FEHLING; BUNJE; SCHMIDT, 2013; STENGEL; SCHIEBL, 2009).

Dong (2018) realizou um estudo comparativo para demonstrar os benefícios associados ao uso de UHPFRC na construção de pontes. Foi comparado o desempenho de uma ponte apoiada sobre duas transversinas produzidas com concreto convencional (classe C50) e outra com UHPC. As pontes foram dimensionadas para ter o mesmo índice de confiabilidade associada à falha por flexão e também foram utilizados os mesmos tipos de aço, tanto para reforço quanto para proteção, permitindo assim, a comparação entre elas.

A área da seção transversal no vão médio da ponte considerada para a utilização do concreto convencional juntamente com o posicionamento da armadura está apresentada na Figura 7, enquanto para o UHPFRC está

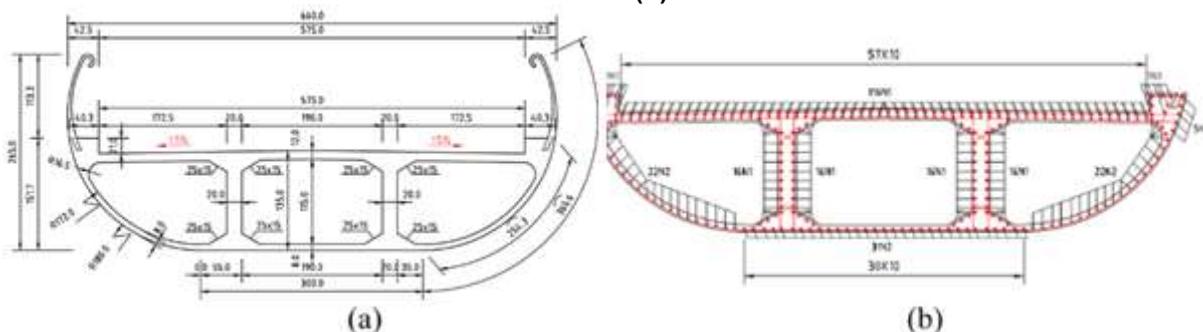
apresentado na Figura 8. Segundo Dong (2018), as áreas necessárias de concreto convencional, armadura de reforço e de protensão foram, respectivamente, $4,145\text{m}^2$, 20106mm^2 e 33360mm^2 . Enquanto as áreas necessárias de concreto, armadura de reforço e de protensão utilizando UHPFRC foram, respectivamente, $2,1511\text{m}^2$, 12267mm^2 e 18626mm^2 .

Figura 7 - Seção transversal no vão médio da ponte com concreto convencional (a) e o posicionamento da armadura (b)



Fonte: DONG (2018)

Figura 8 - Seção transversal no vão médio da ponte com UHPFRC (a) e o posicionamento da armadura (b)



Fonte: DONG (2018)

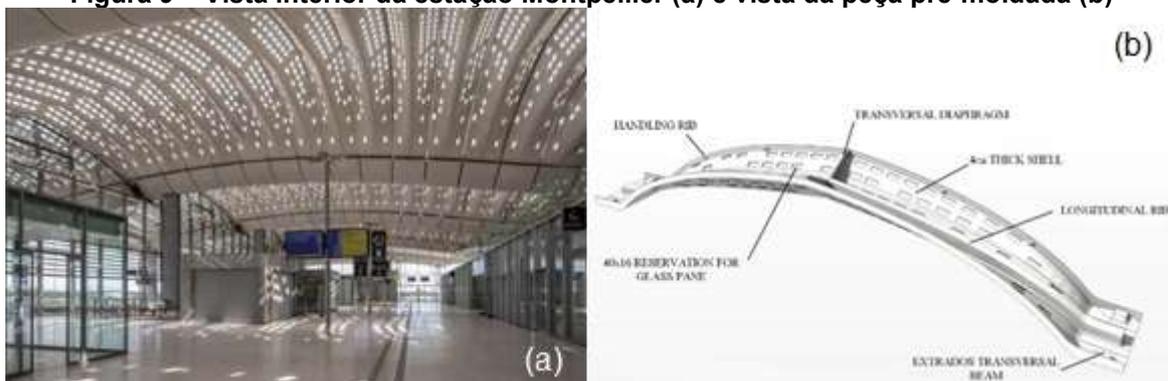
De acordo com Dong (2018), o volume de concreto pode ser reduzido em 48% e a redução da armadura em 39%. Foi estimada também, uma possível redução do peso da superestrutura da ponte de UHPFRC de 51,3% em relação à superestrutura de concreto convencional, permitindo assim ser considerada uma redução das dimensões da infraestrutura.

Um exemplo arquitetônico que tira proveito dessa redução do peso próprio é a cobertura da estação Montpellier, localizado no sul da França (Figura 9). Aberto em 2018, recebe trens de alta velocidade vindos de Paris, Lyon e Marseille e com destino a Barcelona Sants.

A cobertura é formada por 115 peças modulares de pré-moldados de dupla curvatura feitas de UHPFRC com 4cm de espessura, cobrindo um vão de

20m por uma extensão de 54m. Cada peça apresenta perfurações com painéis de vidro em seu comprimento que permitem a entrada de luz natural ao ambiente interno e ao mesmo tempo protege contra entrada de água (BUITELAAR, 2020; MIMRAM et al., 2017).

Figura 9 – Vista interior da estação Montpellier (a) e vista da peça pré-moldada (b)



Fonte: MIMRAM et al. (2017) e BUITELAAR (2020)

Toutlemonde *et al.* (2018) apontam que, devido à leveza dos elementos estruturais feitos de UHPC, os custos de transporte, instalação e fixação podem ser reduzidos. Segundo Ductal (2018) e Mimram *et al.* (2017), todos os elementos de cobertura foram pré-fabricados em um período de 4 meses e instalados na edificação em uma única fase de montagem, sendo finalizado em apenas 2 semanas.

Além da cobertura, outros três tipos de elementos decorativos de UHPFRC foram instalados para garantir o revestimento da estrutura metálica em que se apoia a cobertura: os para-brisas presentes em toda a periferia da ferrovia; os elementos de revestimento das vigas e conchas de cumeeira que envolvem a viga periférica da estrutura, conforme apontado na Figura 10.

Figura 10 – Instalação do revestimento de UHPFRC na estrutura



Fonte: MIMRAM et al. (2017)

Outro grande potencial para seu uso do UHPFRC é na reparação estrutural. Sua aplicação pode resultar em uma proteção da antiga estrutura contra intempéries e contribuir para aumentar a resistência aos esforços solicitantes, resultando assim em um aumento da vida útil.

Um exemplo dessa aplicação é a rodovia Hooper citados por Doiron (2017) e Seibert, Perry e Corvez (2019). Localizada em Nova Iorque, Estados Unidos, é um pavimento urbano que suporta um grande volume de tráfego e foi construído em 1964. Devido aos vários anos de contínuas cargas de veículos e a exposição contínua à saís de degelo, a estrutura do viaduto sofreu uma severa deterioração (Figura 11). Nessa aplicação, a superestrutura e o topo dos pilares foram substituídos mantendo o restante dos pilares e fundação intactos, sendo utilizado o UHPFRC para realizar a união dessas duas estruturas.

Figura 11 - Juntas com vazamento (à esquerda) e pedestal deteriorado (à direita)



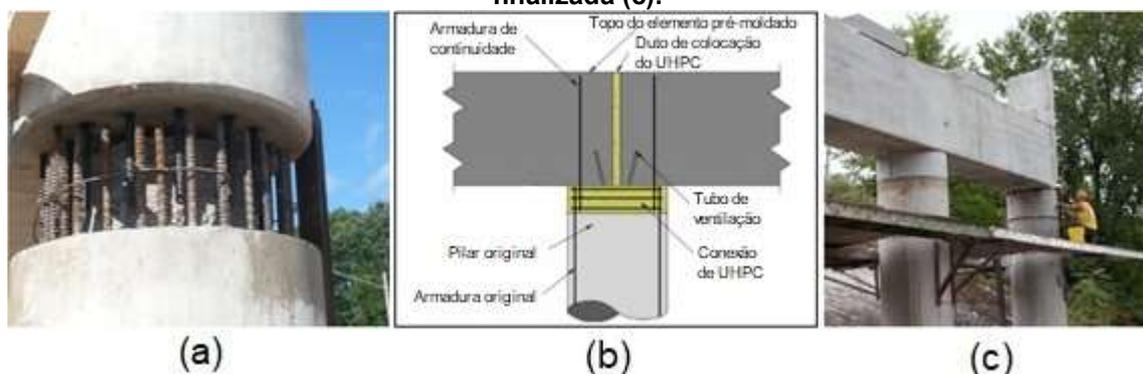
Fonte: SEIBERT, PERRY e CORVEZ (2019)

De acordo com Doiron (2017) e Seibert, Perry e Corvez (2019), o método especificado exigia quatorze dutos de 75 mm nos novos calços de pilares

pré-moldados e a necessidade de combinar novos orifícios de 50 mm de diâmetro, a serem perfurados em uma profundidade de 1.070 mm nas colunas existentes, sendo necessário um total de 84 buracos. A armadura dos pilares existentes foi exposta para dar a continuidade da estrutura com a nova estrutura pré-moldada (Figura 12(a)).

Ainda segundo Doiron (2017) e Seibert, Perry e Corvez (2019), foi determinado que uma profundidade de 280 mm era suficiente para que o volume a ser preenchido por UHPFRC conseguisse atingir a transferência de carga necessária. Ao deixar um pedestal de concreto no centro das colunas existentes, calços de aço foram usados para ajustes finais de altura e para fornecer espaçamento para que o UHPFRC fluísse para baixo do duto de colocação central (Figura 12(b)). Também foi estimado que essas conexões realizadas utilizando UHPFRC (Figura 12(c)) economizaram dois dias na programação.

Figura 12 – Armaduras originais e de continuidade (a), colocação do UHPFRC (b) e conexão finalizada (c).



Fonte: DOIRON (2017) e SEIBERT, PERRY e CORVEZ (2019).

2.2. Materiais componentes do UHPFRC

A seleção de materiais utilizados para a produção do UHPFRC necessita de maior atenção e cuidado para se conseguir as propriedades físicas e mecânicas desejadas. São utilizados além da areia fina, granulometrias diversas de filler, que podem ser de quartzo ou calcáreo. Também são usadas adições minerais como sílica ativa, metacaulim ou cinza de casca de arroz. Devido ao uso destes materiais finos e para manter uma relação água/aglomerante baixa, próximo de 0,2, faz-se necessário o uso de aditivos a base de éter poli carboxilato (SOHAIL *et al.*, 2018).

2.2.1. Metodologia de empacotamento de partículas

Segundo Christ *et al.* (2019a), mesmo com o crescimento da aplicação de UHPFRC em diversos países, ainda não existe uma metodologia científica para a dosagem deste tipo de concreto. De acordo com GANESH e MURTHY (2018), os procedimentos de dosagem adotados são baseados no método empírico.

Entretanto, diversos autores (Arora *et al.* (2018), Christ (2019b), Christ *et al.* (2019b), Dingqiang *et al.* (2020), Kardec *et al.* (2018), Reginato (2011), Sharma, Ray e Iqbal (2019) e Wang *et al.* (2019)) se utilizam do princípio do empacotamento para a determinação das quantidades dos materiais constituintes da matriz cimentícia, sendo adicionado posteriormente as fibras. Este procedimento é largamente utilizado para a dosagem de CAA e visa obter um empacotamento bastante denso das partículas e uma mistura altamente homogênea, eliminando o máximo possível a presença de vazios em sua estrutura interna (CAMPOS, 2017). Outro fator importante na produção do UHPFRC é, de acordo com Zhang *et al.* (2018), o melhoramento das propriedades dos materiais para que se tenha uma melhor homogeneização mecânica.

Com base em Campos (2017) e Castro e Pandolfelli (2009), o empacotamento denso de partículas consiste na seleção da dimensão e proporção de materiais particulados com o intuito de preencher o máximo de espaços vazios presentes na mistura. Segundo Castro e Pandolfelli (2009), Ferét, em 1892, apresentou a possibilidade da seleção de tipos adequados de agregado e a relação entre a porosidade do material e a resistência à compressão do material em estado endurecido, mostrando assim que é obtida resistência máxima quando a densidade de partículas é máxima. Desde então, muitos estudos teóricos e experimentais sobre o empacotamento de partículas apresentam dois modelos diferentes: discreto e contínuo.

Segundo Campos (2017), Castro e Pandolfelli (2009), Dingqiang *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2019), a abordagem discreta baseia-se em todas as partículas presentes são consideradas individualmente, apresentando um

tamanho específico. Na abordagem contínua leva-se em consideração os diferentes tamanhos das partículas, sendo apresentados como distribuições contínuas.

No método de Furnas, baseado no modelo discreto, o empacotamento de partículas pode ser considerado como um conjunto de monodispersões, para o qual, o melhor empacotamento é obtido quando as partículas menores preenchem os espaços vazios presentes entre as partículas maiores. Pode-se considerar como uma distribuição contínua composta por um sistema multicomponente de N monodispersões, formando uma progressão geométrica (ORDOÑEZ, 2015).

O modelo discreto de Furnas é calculado por meio da seguinte equação:

$$CPFT = 100 \times \left(\frac{r^{\log D - r^{\log D_S}}}{r^{\log D_L - r^{\log D_S}}} \right) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde (DAMINELI, 2013):

CPFT = percentual acumulado do diâmetro avaliado, em %

r = razão de volume de partículas de um tamanho com relação ao volume do seguinte;

D = tamanho de uma partícula, em mm;

D_S = menor tamanho de partícula, em mm;

D_L = maior tamanho de partícula, em mm;

Segundo Lopes, Peçanha e Castro (2020), o empacotamento aleatório de partículas esféricas de mesmo tamanho apresenta um único fator de empacotamento. Entretanto, as partículas dos materiais granulares que compõem o concreto não apresentam tal configuração, sendo mais utilizado o modelo contínuo.

Segundo Christ (2019b) e Ordoñez (2015), o modelo contínuo proposto por Andreasen e Andersen tem como base teórica uma condição de similaridade,

por meio de uma lei de potências observada na Equação (2), que consiste em todas as partículas apresentarem uma mesma forma de acomodamento. Por meio de estudos experimentais baseados no método de empacotamento de Fuller, acrescentaram um fator de ajuste q (coeficiente de distribuição) que varia entre 0 e 1, sendo os valores q compreendidos entre 0,33 e 0,50 que permitem a obtenção de um empacotamento ótimo.

$$CPFT = \frac{D^q}{D_{max}^q} \quad \text{Equação (2)}$$

CPFT = percentual acumulado do diâmetro avaliado, em %

D = tamanho da partícula a ser avaliado, em mm;

D_{max} = maior tamanho de partícula da distribuição, em mm;

De acordo com Castro e Pandolfelli (2009) e Damineli (2013), os modelos de Furnas e Andreasen e Andersen, levando em conta algumas considerações, se convergem matematicamente para uma mesma equação. Conhecida como modelo de Funk e Dinger ou Alfred ou Andreasen e Andersen modificado, descrito na Equação (3), é um aperfeiçoamento dos modelos anteriores e mostra que ambas podem ser vistas como duas formas diferentes de se expressar a mesma coisa (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Nele, há o conceito do tamanho mínimo de partículas com relação ao modelo original de Andreasen e Andersen, assim como envolve uma revisão matemática do modelo de Furnas. De acordo com Oliveira et al. (2018), o modelo de Andreasen e Andersen modificado se destaca dentre os procedimentos de dosagens para concretos, por apresentar uma maior eficiência no empacotamento das partículas e também por condizer melhor com o sistema particulado real.

$$CPFT = \frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde

CPFT = percentual acumulado abaixo de D , em %

D = tamanho da partícula, em mm;

D_s = menor tamanho de partícula da distribuição, em mm;

D_L = maior tamanho de partícula da distribuição, em mm;

q = coeficiente de distribuição

Através de modelos computacionais, pode-se determinar maiores densidade de empacotamento com base no valor do coeficiente de distribuição q . Considerando distribuições infinitas, para valores de $q = 0,37$ ou menores, o coeficiente de distribuição favorece um empacotamento máximo de partículas, enquanto valores acima favorecem a presença de porosidades residuais. No caso de concretos, recomendam-se valores menores ou iguais a 0,30 devido a uma maior quantidade de finos em sua composição, o que causa influência na interação entre as partículas. Valores de q próximos de 0,30 favorecem quando o adensamento é realizado por vibração enquanto valores entre 0,20 e 0,25 para os concretos autoadensáveis (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009; DAMINELI, 2013; OLIVEIRA et al., 2018). Com base nos estudos de literatura de Goes *et al.* (2020), diferentes autores utilizaram valores de q variando entre 0,10 e 0,25 para a produção do UHPC, sendo que a maioria utiliza valores de $q = 0,23$.

2.2.2. Concreto reforçado com fibras

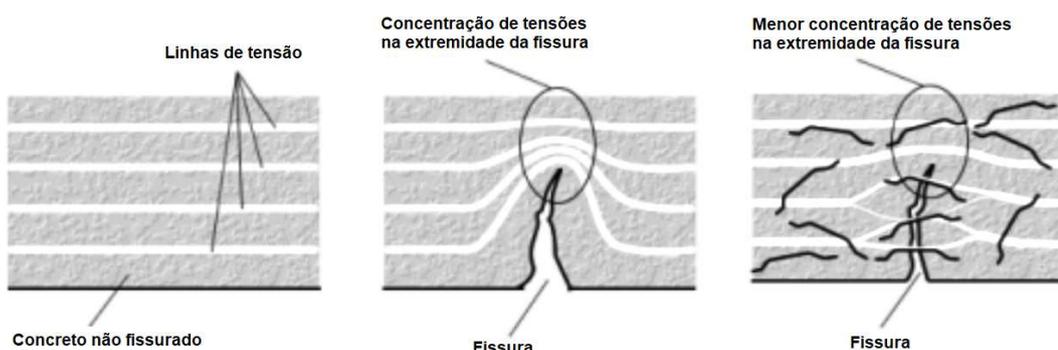
A incorporação de fibras metálicas provê ao UHPFRC uma alta ductilidade, reduzindo assim a sua fragilidade e também impede que ocorra uma fratura repentina do corpo de prova (VIGNESHWARI *et al.*, 2018). Por isso a NF P18-710 (AFNOR, 2016b) recomenda reforço com fibras metálicas para uso estrutural no UHPC

De acordo com Figueiredo (2011), a propagação das tensões vindas dos esforços solicitantes ocorre por toda a seção transversal do concreto. Entretanto, no momento em que ocorre uma fissura, esta impede com que as tensões nessa seção mantenham sua propagação anterior à fissuração. Logo, provocará um desvio da propagação para a extremidade da fissura, gerando uma região com grande concentração de tensões, como mostra a Figura 13.

Para combater tal fragilidade, a adição de fibras é incorporada à mistura, pois conduzem a um aumento no desempenho em termos da capacidade

de absorção de energia e na capacidade de tração, conduzindo a altas deformidades (cerca de 1%) com uma fase pseudo-plástica (múltiplas fissuras) e um aumento na capacidade de tração antes da fissura localizada (BUTTIGNOL; SOUSA; BITTENCOURT, 2017).

Figura 13 – Esquema da concentração de tensões para concreto com e sem reforço com fibras



Fonte: Adaptado de BRAZ e NASCIMENTO (2015)

A utilização de fibras, segundo Alsalman, Dang e Micah Hale (2017), tem como sua principal função incorporar a propriedade da ductilidade no material, evitando desse modo que o UHPFRC apresente um repentino colapso gerado pela concentração de tensões na extremidade da fissura. Segundo Braz e Nascimento (2015) e Figueiredo (2011), as fibras agem como pontes de transferências de tensões, permitindo com que a propagação das tensões de um lado da fissura passe para o outro lado, evitando o desvio de propagação e, conseqüentemente, a concentração de tensões na extremidade da fissura.

É necessário que as fibras estejam bem aderidas ao concreto. De acordo com Caratin (2014), a interface fibra/matriz é a região localizada no contato entre a superfície da fibra com o concreto onde ocorre a transferência dos esforços sofridos pelo concreto para as fibras por meio da aderência. Caso não haja uma aderência adequada, ocorrerá um escorregamento das fibras na estrutura, resultando na perda de sua função como reforço.

2.3. Caracterização do UHPC

2.3.1. Propriedades Físicas

Para o estudo de concretos, a determinação de propriedades como massa específica, importante para cálculo do peso da estrutura e propriedades

como índice de vazios, capacidade de absorção de água e permeabilidade a gases são de fundamental importância para definição da vida útil da estrutura.

A norma francesa NF P18-470 indica que o máximo valor de índice de vazios aos 90 dias deve ser menor ou igual a 9% e não apresenta limites para a massa específica e para a capacidade de absorção de água. Entretanto, esta norma define parâmetros para a permeabilidade máxima a gases $9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ e também para o coeficiente máximo de difusão de íons cloretos de $0,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, ambos aos 90 dias. Com esses limites, a expectativa de vida das estruturas pode ser de 50 a 100 anos. É possível aumentar a vida útil para 150 anos caso os limites de índice de vazios, permeabilidade máxima a gases e coeficiente de difusão de íons cloretos serem reduzidos para, respectivamente, 6,0%, $1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ e $0,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

2.3.2. Propriedades Mecânicas

A resistência à compressão do UHPFRC é o principal critério de avaliação e definição do desempenho deste concreto (ALMEIDA, 2015). Segundo Almeida (2015) e Eide e Hisdal (2012), a presença de fibras na composição do UHPFRC não contribui significativamente na resistência à compressão, tendo maior influência no comportamento dúctil de ruptura.

A norma francesa NF P18-470 indica as classes de resistência características f_{ck-cyl} por meio de corpos de prova cilíndricos de dimensões nominais $\phi 110 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ e $f_{ck-cube}$ medidas por meio de corpos de prova cúbicos de 100mm de aresta aos 28 dias. As classes de resistência à compressão característica do UHPFRC, são especificadas pela NF P18-470 conforme apresentado na Tabela 1, e as resistências de projeto devem ser maior ou igual ao valor característico mínimo da classe especificada no projeto de tal modo que não exceda o valor característico mínimo somado de 40 MPa.

Tabela 1 - Classe de resistência do UHPFRC segundo NF P18-470

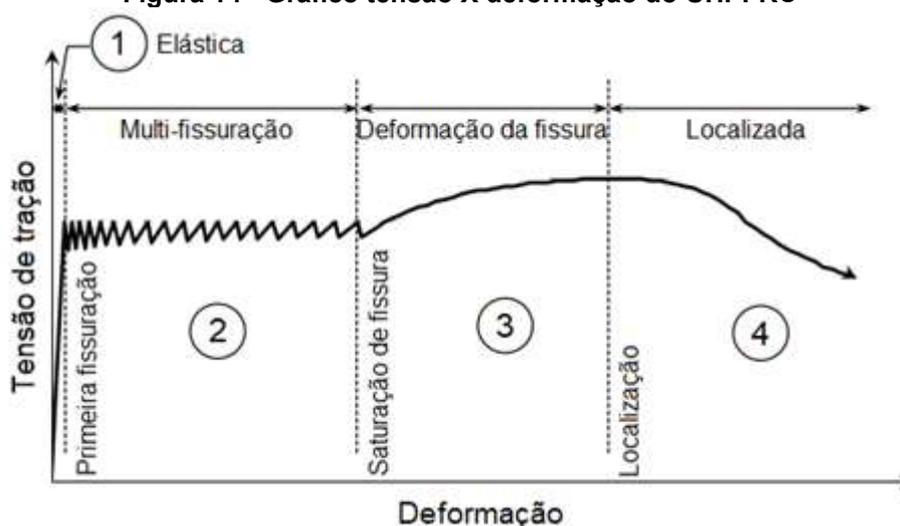
Classe de resistência à compressão	Resistência mínima característica para cilindro	Resistência mínima característica para cubo
	f _{ck-cyl} (MPa)	f _{ck-cube} (MPa)
UHPFRC 130 / 145	130	145
UHPFRC 150 / 165	150	165
UHPFRC 175 / 190	175	190
UHPFRC 200 / 215	200	215
UHPFRC 225 / 240	225	240
UHPFRC 250 / 265	250	265

Fonte: Adaptada de AFNOR (2016a)

A norma americana ASTM C1856 apresenta práticas aplicadas para UHPFRC com resistência à compressão de 120 MPa ou superior. A determinação da resistência à compressão do UHPFRC, deve estar de acordo com a norma ASTM C39, utilizando corpos de prova cilíndricos de dimensões $\phi 75$ mm x 150 mm.

Com base em Almeida (2015) e Eide e Hisdal (2012), o comportamento do UHPFRC na resistência à tração pode ser analisado por meio do gráfico carga (ou tensão) em função da deformação, conforme ilustrada na Figura 14. O diagrama pode ser dividido em função do tipo de deformação, em três regiões: elástica, conformação e deformação plástica.

Figura 14 - Gráfico tensão X deformação do UHPFRC



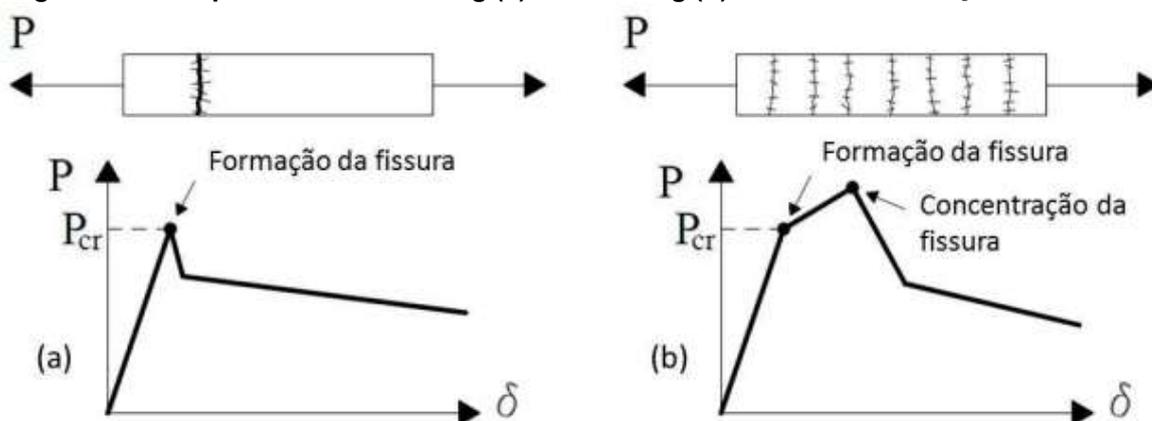
Fonte: RUSSEL, G; GRAYBEAL (2013)

A região elástica corresponde o trecho da curva onde apenas o concreto contribui para a resistência dos esforços, representado pela região 1. A

conformação é a fase de transição entre a região elástica e a da deformação plástica, onde começa a ocorrer a contribuição das fibras e a diminuição da contribuição do concreto, representado pela região 2 que começa quando múltiplas fissuras se formam na matriz do compósito. Por fim, a deformação plástica representada pelas regiões 3 e 4, em que o esforço é suportado essencialmente pelas fibras. A fase 3 ocorre quando há o aumento das fissuras, sendo improvável a formação de outras novas fissuras e a fase 4 começa quando as fibras que atravessam as fissuras começam a ser arrancadas da matriz (ALMEIDA, 2015; EIDE; HISDAL, 2012; RUSSEL, G; GRAYBEAL, 2013).

Segundo Figueiredo (2014) e Monte (2015), o concreto reforçado com fibras, após a sua fissuração, pode apresentar dois tipos de comportamentos diferentes: *softening* ou *hardening* (Figura 15). O comportamento *softening* ocorre quando a carga resistente está abaixo da carga que determina o final do trecho linear elástico, diminuindo assim sua capacidade resistente conforme o aumento da abertura da fissura, sendo característico a aparição de apenas uma fissura no compósito. No caso do comportamento *hardening*, ocorre quando a carga resistente está acima da carga que determina o final do trecho linear elástico, aumentando assim sua capacidade resistente conforme ocorre o aumento da abertura da fissura, sendo característico a aparição de múltiplas fissurações antes de uma fissura principal no compósito.

Figura 15 - Comportamento *softening* (a) e *hardening* (b) do concreto reforçado com fibras



Fonte: Figueiredo (2014)

A resistência à tração do UHPFRC é uma das propriedades mais importantes, pois apresenta valores bastante elevados tanto antes da formação

da primeira fissura quanto depois desta, devido a sua ductilidade por causa da existência das fibras.

De acordo com a norma NF P18-470, o valor característico da resistência à tração na fase elástica, $f_{ctk,el}$ aos 28 dias para UHPFRC deve ser maior que 6,0 MPa. Além disso, o UHPFRC deve ter um comportamento suficiente de deformação hardening devido à flexão que satisfaça a inequação seguinte:

$$\frac{1}{w_{0,3}} * \int_0^{w_{lim}} \frac{\sigma(w)}{1,25} dw \geq \max(0,4f_{ctm,el}; 3 MPa) \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$w_{0,3}$ = abertura da boca de fissura de 0,3 mm;

$f_{ctm,el}$ é o valor médio da resistência a tração na fase elástica em MPa;

$\sigma(w)$ é a tensão pós fissuração característica em relação a abertura de fissura w , em MPa;

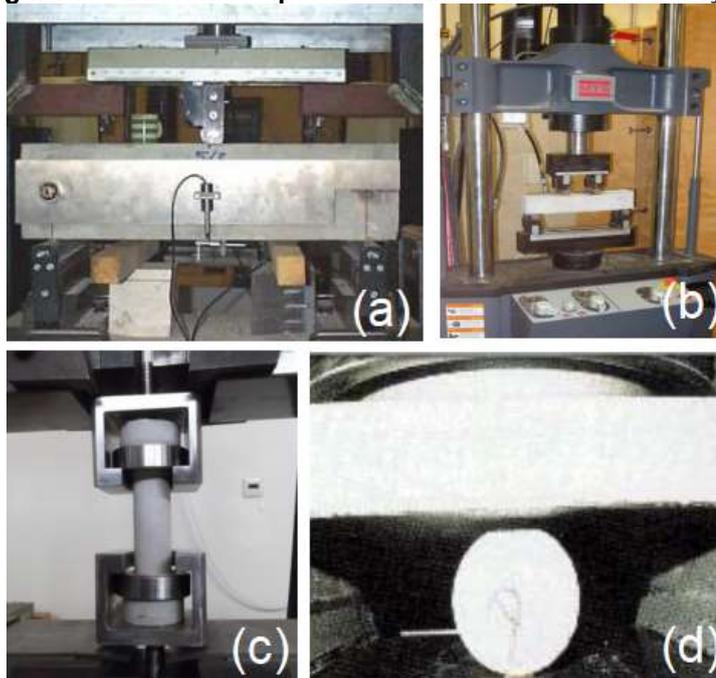
A norma NF P18-470 ainda determina a classe do comportamento à tração do UHPFRC, obtido pela comparação entre a resistência à tração na fase elástica $f_{ct,el}$ e a resistência pós fissuração f_{ctf} para a curva média e para a curva característica. É determinado a princípio pela inclusão do fator de orientação global K_{global} na fase pós-fissuração expressando o efeito de colocação do UHPFRC na estrutura, do produto ou componente da estrutura.

Existem diferentes propostas de procedimentos para a determinação da resistência à tração, como por exemplo, o ensaio de flexão em três pontos aplicado em prisma com entalhe (Figura 16 (a)), o ensaio de flexão em quatro pontos aplicado em prisma sem entalhe (Figura 16 (b)), o ensaio de tração direta com corpo de prova tipo “osso de cachorro” (Figura 16 (c)) e o ensaio para determinação da resistência a tração por compressão na diametral (Figura 16 (d)) em corpos de prova cilíndricos (PERRY, 2020).

O ensaio de resistência à tração direta apresenta dificuldades de execução do ensaio como o uso de corpos de prova com formatos específicos e alinhamento do corpo de prova com a prensa durante a aplicação de carga,

refletindo na confiabilidade dos resultados adquiridos. Por conta disso, os ensaios de resistência à tração indireta são os mais realizados, sendo o ensaio para determinar a resistência à tração por flexão de corpos de prova prismáticos o mais empregado para determinar o comportamento de um concreto reforçado com fibras (FARIAS et al., 2008; FIGUEIREDO, 2012).

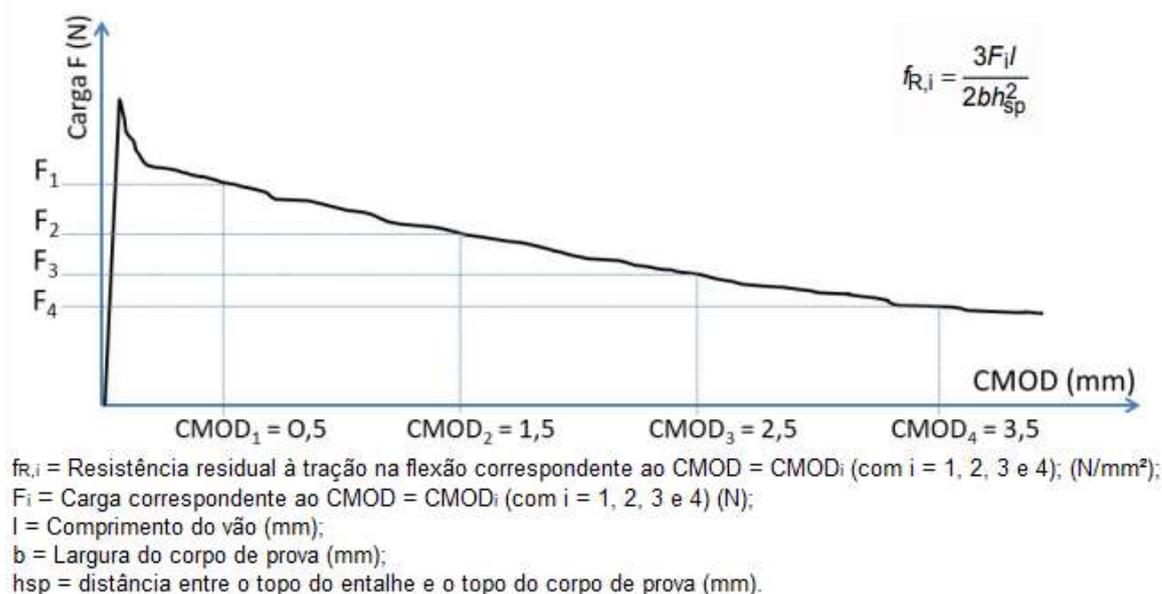
Figura 16 - Diferentes tipos de ensaio de resistência à tração



Fonte: Autoria própria

Dos ensaios de flexão utilizados para a determinação do comportamento mecânico pós-fissuração de um concreto com fibras, há os que utilizam corpos de provas prismáticos com um entalhe na seção tracionada e os que utilizam corpos de prova sem entalhe. No primeiro caso, é colocado um sensor para determinar a abertura de fissura (ou CMOD – Crack Mouth Opening Displacement). Conforme ocorre a aplicação de carga, obtem-se uma curva Carga-CMOD que, a partir dela, é possível determinar a resistência residual. A Figura 17 ilustra o gráfico e o cálculo para a resistência residual à tração na flexão conforme ABNT NBR 16940:2021.

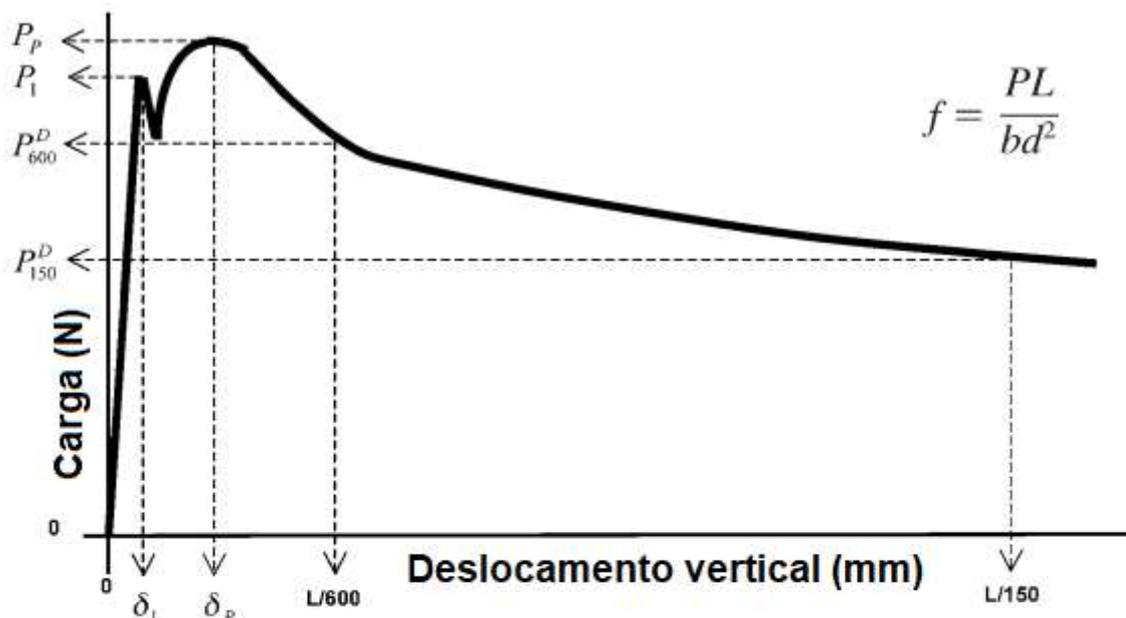
Figura 17 - Diagrama de Carga x CMOD, identificando as cargas residuais e método de cálculo da resistência residual



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16940:2021

No segundo caso, é utilizado um sensor de deslocamento para determinar o deslocamento vertical do corpo de prova conforme há a aplicação de carga, sendo possível obter uma curva Carga-Deslocamento vertical, o qual é possível determinar a tenacidade por meio do cálculo da área sobre a curva. A Figura 18 ilustra o gráfico, o cálculo das resistências residuais e da área para determinar a tenacidade, segundo ASTM C1609/C1609M-12.

Figura 18 - Diagrama de Carga x Deslocamento vertical, identificando as cargas residuais e método de cálculo da resistência residual



b = Largura do corpo de prova (mm)

d = Altura do corpo de prova (mm)

L = Vão de ensaio (mm);

P_1 = Carga de primeiro pico (N);

P_p = Carga de pico (N);

δ_1 = Deslocamento vertical na carga de primeiro pico (mm);

δ_p = Deslocamento vertical na carga de pico (mm);

P_{600} = Carga residual à tração na deflexão de $L/600$ (N);

f_{600} = Resistência residual na deflexão de $L/600$ (N/mm²);

P_{150} = Carga residual à tração na deflexão de $L/150$ (N);

f_{150} = Resistência residual na deflexão de $L/150$ (N/mm²);

T_{150} = Tenacidade = Área sobre a curva de 0 a $L/150$ (N.mm)

Fonte: Adaptado de ASTM C1609/C1609-12

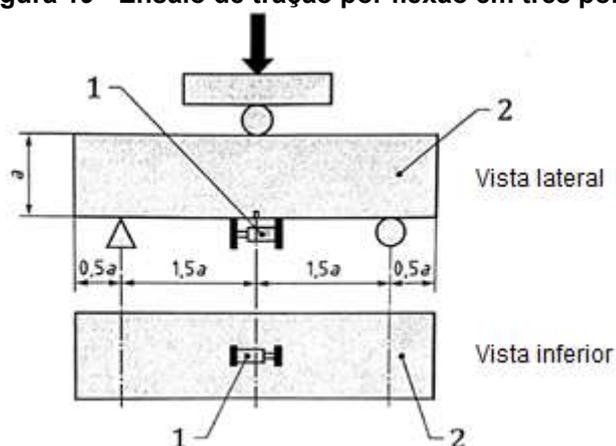
De acordo com a norma NF P18-470, existem dois tipos de ensaios para a caracterização do desempenho à tração do UHPC:

1. Ensaio de resistência à tração por flexão em 3 pontos para determinação do comportamento pós fissuração pela análise inversa;
2. Ensaio de resistência à tração por flexão em 4 pontos para a determinação do limite elástico sob tensão.

Os corpos de prova devem, em ambos os casos, ser prismáticos de seção transversal com dimensões $a \times a$ e comprimento $4a$. A dimensão a , entre 7 cm e 20 cm, deve estar entre 5 e 7 vezes o comprimento da fibra mais longa utilizada.

Para o ensaio de flexão em três pontos, um sensor que mede a abertura do entalhe é fixado ao prisma em torno da fibra mais baixa tensionada do prisma (Figura 19).

Figura 19 - Ensaio de tração por flexão em três pontos



Fonte: AFNOR (2016a)

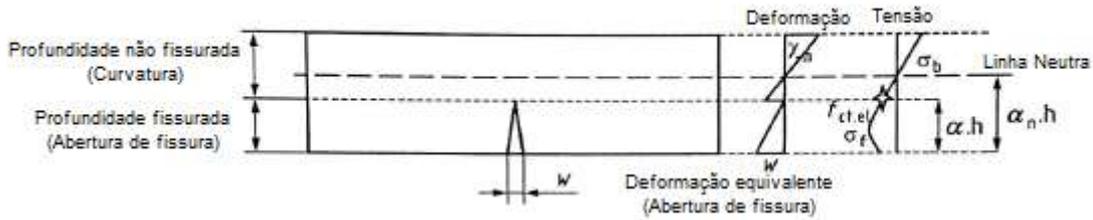
Onde:

- 1 Extensômetro
- 2 Corpo de prova

A análise do ensaio pelo método inverso torna possível obter a expressão para a tensão de tração em função da abertura de fissura por meio de resultados experimentais correlacionando o momento aplicado à abertura de fissura. O método deve ser aplicado para os dados filtrados de maneira a obter uma convergência numérica estável considerando a curva média e a curva características da série de resultados do ensaio.

O corpo de prova prismático sob flexão, conforme ilustra a Figura 20, é separado em duas partes: seção não fissurada e seção fissurada. A seção não fissurada apresenta uma distribuição da tensão corresponde a um comportamento elástico linear. E a seção fissurada, em que a distribuição da tensão depende diretamente da eficiência das fibras

Figura 20 - Distribuição da deformação e tensão das seções fissuradas e não fissuradas



Fonte: AFNOR (2016a)

O equilíbrio mecânico da seção do corpo de prova é determinada pelas Equações 5 a 10, em que é levado em consideração a contribuição da seção não fissurada (designada pelo índice b) e da seção fissurada (designada pelo índice f).

$$N = N_b + N_f = 0 \quad \text{Equação (5)}$$

$$N_b = \frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^2}{2} \cdot [(1 - \alpha_n)^2 - (\alpha - \alpha_n)^2] \quad \text{Equação (6)}$$

$$N_f = \frac{\alpha \cdot h \cdot b}{w} \cdot \int_0^w \sigma_f \cdot dw \quad \text{Equação (7)}$$

$$M = M_b + M_f \quad \text{Equação (8)}$$

$$M_b = \frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^3}{3} \cdot [(1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3] + h \cdot \alpha_n \cdot N_b \quad \text{Equação (9)}$$

$$M_f = \alpha \cdot h \cdot N_f - \frac{(\alpha \cdot h)^2 \cdot b}{w^2} \cdot \int_0^w \sigma_f \cdot w \cdot dw \quad \text{Equação (10)}$$

Onde

M é o momento resistente, M , M_b e M_f , em MN.m;

N é a força normal, igual a 0, N_b e N_f , em MN;

α é a profundidade relativa da fissura;

α_n é a profundidade relativa da linha neutra dada por:

$$\sigma_t = E_{cm} \cdot \chi_m \cdot h \cdot (\alpha - \alpha_n);$$

χ_m é a curvatura da parte não fissurada, em m^{-1} ;

$f_{ct,el}$ = é o limite de tensão elástica, em MPa;

E_{cm} é o valor médio do módulo de elasticidade, em MPa;

b é o comprimento da seção, em m

h é a altura da seção (depois de deduzir a profundidade do entalhe), em m;

A abertura da fissura está ligada à curvatura da parte não fissurada através da seguinte relação cinemática:

$$w = [\chi_m + 2 * \chi_e] * \frac{2 * (\alpha * h)^2}{3} \quad \text{Equação (11)}$$

$$\chi_e = \frac{M}{E_{cm} * I} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde

χ_e é a curvatura elástica equivalente em m^{-1} , dada por: $\chi_e = M / (E_{cm} * I)$, onde.

I é a inércia da seção transversal retangular, em m^4

A relação entre a altura da fissura e a profundidade da linha neutra é deduzida através da Equação 13:

$$f_{ct,el} = (\alpha_n - \alpha) * h * \chi_m * E_m \quad \text{Equação (13)}$$

Através da resolução iterativa, é possível definir a tensão em função da abertura de fissura por meio de uma aproximação trapezoidal (Equação 14). A expressão para determinar a força normal e o momento na seção fissurada são mostradas, respectivamente, nas Equações 15 e 16. Ao final da resolução iterativa, é realizado uma correção nos valores de iteração i após ser calculado a iteração $i+1$, conforme a Equação 17.

$$\int_0^{w_{i+1}} \sigma_f * dw = \int_0^{w_i} \sigma_f * dw + \left(\frac{\sigma_{f_i} + \sigma_{f_{i+1}}}{2} \right) * (w_i - w_{i+1}) \quad \text{Equação (14)}$$

$$N_{f_{i+1}} = N_{f_i} * \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} * \frac{w_i}{w_{i+1}} + b * h * \left(\frac{\sigma_{f_i} + \sigma_{f_{i+1}}}{2} \right) * \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) \quad \text{Equação (15)}$$

$$M_{f_{i+1}} = M_{f_i} * \left(\frac{\alpha_{i+1} * w_i}{\alpha_i * w_{i+1}} \right)^2 + \alpha_{i+1} * h * N_{f_{i+1}} * \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) - \frac{(\alpha_{i+1} * h)^2 * b}{2} * \left(1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 * \sigma_{f_{i+1}}$$

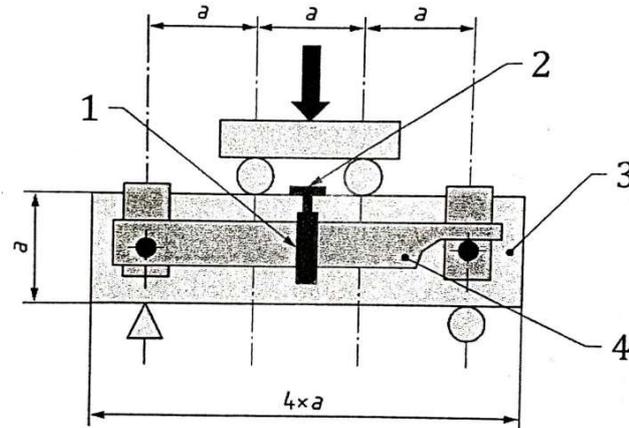
Equação (16)

$$\sigma_{f_i} = \frac{(2 * \sigma_{f_i} + \sigma_{f_{i+1}})}{3}$$

Equação (17)

Para ensaio de flexão em quatro pontos, um sensor de deslocamento deve ser fixado por um dispositivo específico na amostra de modo que colete medidas de seu deslocamento vertical em torno da fibra mais baixa do prisma durante o ensaio (Figura 34).

Figura 21 - Ensaio de tração por flexão em quatro pontos



Fonte: AFNOR (2016a)

Onde:

- 1 Sensor de deslocamento
- 2 Placa intermediária fixada feita de alumínio
- 3 Corpo de prova
- 4 Yoke para medir a deflexão central

A curva do gráfico força-deslocamento vertical para o ensaio de resistência à tração por flexão em quatro pontos permite determinar o valor da força (F_{nl}), correspondente à perda da linearidade do comportamento. A tensão correspondente, chamada de limite elástico na flexão, é calculada pela Equação 18:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 * F_{nl}}{b * a}$$

Equação (18)

Onde F_{nl} é a força em N e $f_{ct,fl}$ está em MPa, a é a altura do prisma em mm e b é a largura do prisma, em mm.

Para obter uma resistência à tração limite na fase elástica, estimada a partir da resistência à tração na flexão obtida em ensaio de flexão de 4 pontos, o limite de tensão elástica $f_{ct,el}$ é calculado através da Equação 19 a seguir:

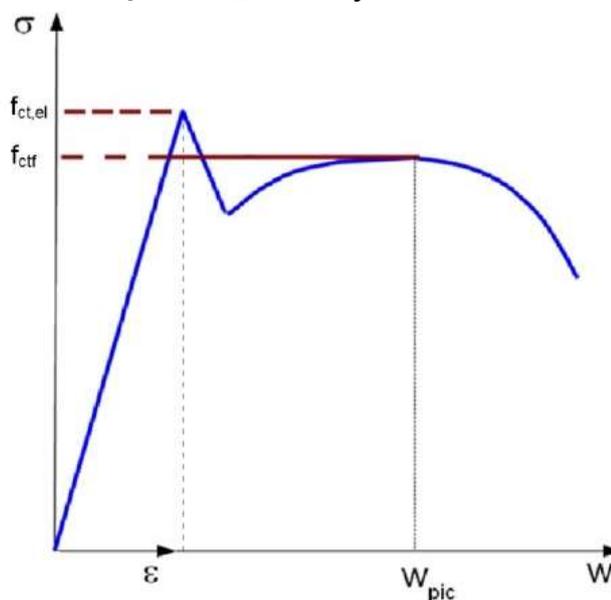
$$f_{ct,el} = f_{ct,fl} * \frac{k*a^{0,7}}{1+k*a^{0,7}} \quad \text{Equação (19)}$$

Onde $k = 0,08$ e “ a ” é a altura do prisma em mm.

A resistência pós-fissuração (f_{ctf}), segundo a NF P18-710, é determinada a partir de curvas experimentais de acordo com a norma NF P18-470. É igual ao valor máximo medido se for maior que o limite de elasticidade, caso contrário, são dois possíveis cenários:

- se um máximo local for observado, f_{ctf} refere-se ao máximo valor de ruptura, conforme mostrado na Figura 22 abaixo:

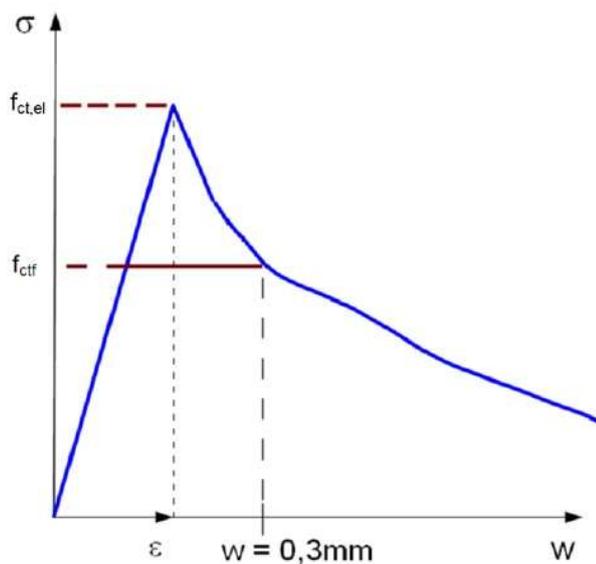
Figura 22 - Definição do f_{ctf} caso haja um máximo local da curva



Fonte: AFNOR (2016b)

- se não há pico localizado, f_{ctfk} é a resistência associada à fissura de abertura de 0,3mm, como mostrado na Figura 23:

Figura 23 - Definição do f_{ctf} no caso não haja um máximo local da curva



Fonte: AFNOR (2016b)

A classe do comportamento do UHPC é obtido pela comparação do limite de tensão elástica $f_{ct,el}$ e da resistência pós-fissuração f_{ctf} para a curva média e a curva característica. As classes definidas pela NF P18-470 são:

T1 (Deformação softening sobre tensão direta): quando $f_{ctf}/1,25 < f_{ct,el}$ tanto para a curva média quanto para a curva característica;

T2: (Deformação hardening limitada): quando $f_{ctf}/1,25 \geq f_{ct,el}$ para a curva média e $f_{ctf}/1,25 < f_{ct,el}$ para a curva característica;

T3 (Deformação hardening significativa): quando $f_{ctf}/1,25 \geq f_{ct,el}$ tanto para a curva média quanto para a curva característica.

2.4. Resistência ao fogo

A durabilidade do UHPFRC está relacionada à resistência do material frente a agressividade do ambiente, o que se dá em função de algumas propriedades de sua matriz cimentícia. Segundo Alexander, Bentur e Mindess (2017), a deterioração do concreto pode ser química, física ou mecânica, sendo que, muitas vezes, ocorre de maneira simultânea. No caso de exposição a elevadas temperaturas como, por exemplo, em situações de incêndio, a durabilidade consiste na integridade da estrutura frente à ação do fogo, sendo

capaz de resistir por um período considerável antes de alcançar o colapso, pois o objetivo é garantir tempo para que as vidas sejam salvas.

O concreto apresenta um bom comportamento sob elevadas temperaturas por não ser um material combustível e apresenta baixa condutividade térmica (BRITTEZ; CARVALHO; HELENE, 2019). Entretanto, as mudanças em sua microestrutura causadas pela exposição a elevadas temperaturas afetam sua resistência e sua deformabilidade.

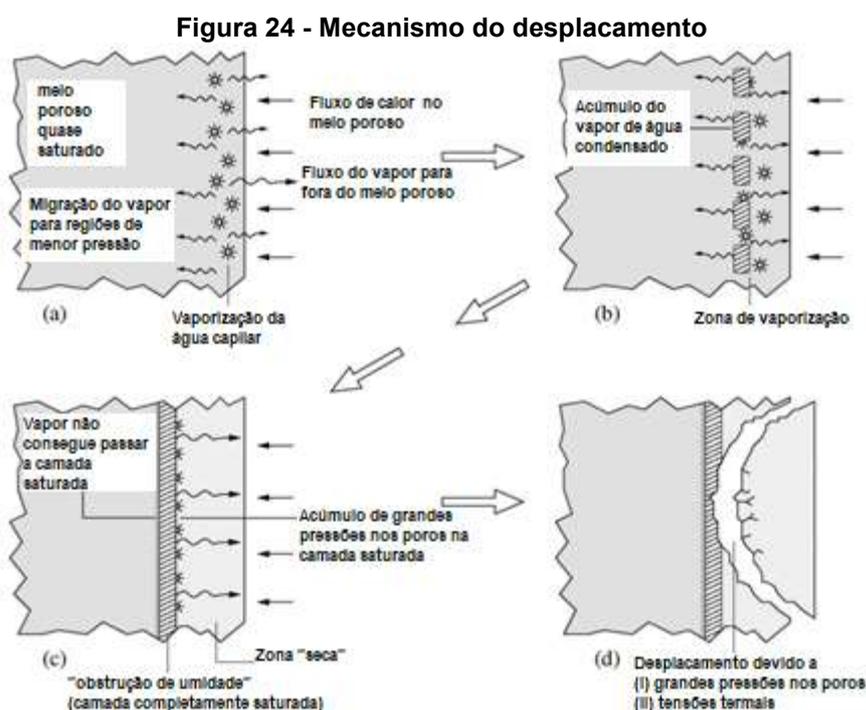
Costa (2008), Iffat e Bose (2016), Oliveira e Júnior (2009) e Helene, Brittez e Carvalho (2019) apontam algumas dessas mudanças conforme o aquecimento. Até 100°C, há a ocorrência da evaporação da água absorvida do ambiente e também da água quimicamente combinada. Entre 100°C até 300°C, ocorre a desidratação do gel e também início da perda de resistência e aparecimentos de fissuras e deslocamento (ou “spalling”), causadas por tensões internas provocadas pela contração da pasta de cimento e da expansão dos agregados. Na faixa de 300°C e 600°C, ocorre a carbonatação e dilatação dos poros da matriz, decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e decomposição do CaCO_3 , formando o CaO . Como resultado, ocorre a redução do volume e aumento de fissuras e o concreto perde sua capacidade de carga. Para temperaturas acima de 1000°C, ocorre o processo de sinterização do concreto.

De acordo com Ganasini (2019), o concreto em altas temperaturas apresenta um aumento de porosidade interna devido à evaporação da água que deixa de ocupar os espaços vazios e também devido a formação de microestruturas causadas por tensões geradas pela dilatação do material. Por estes motivos, a resistência mecânica do concreto tende a diminuir.

No caso de concretos de elevada resistência, como é o caso do UHPC, um dos maiores problemas que ocorre quando exposto a elevadas temperaturas é a ocorrência do deslocamento mais profundo, devido à sua estrutura compactada e de baixa porosidade (LIANG, 2018). Com base em Helene, Brittez e Carvalho (2019) e Iffat e Bose (2016), o deslocamento causa uma redução de seção devido a perda de camadas superficiais de um elemento estrutural exposto a altas temperaturas e taxas de aquecimento rápidas, expondo assim, camadas

mais interiores ao ambiente e diminuindo sua capacidade resistente devido à redução da seção transversal.

O efeito de deslocamento, com base em Missemer *et al.* (2019) e Zhu *et al.* (2021), pode ocorrer por meio de dois mecanismos diferentes, de maneira isolada ou simultânea: tensão térmica induzida e obstrução de umidade. A tensão térmica induzida ocorre devido ao aumento da temperatura do concreto, causando uma dilatação térmica nos diferentes materiais que o compõe, gerando um gradiente de tensão interna da estrutura, podendo assim atingir o limite de resistência à ruptura. Esse fenômeno pode ocorrer também em casos onde há uma possível restrição externa desse dilatamento térmico, como elementos engastados, confinados ou sofrendo alguma aplicação de carga externa.



Fonte: Zeiml *et al.* (2006)

A segunda maneira, de acordo com Banerji, Kodur e Solhmirzaei (2020); Zeiml *et al.* (2006) e ilustrada na Figura 24, ocorre devido à água presente nos poros e capilares e também pela água quimicamente ligada. Com o aumento da temperatura, a água presente nas camadas mais superficiais se transforma em vapor e se desloca através dos poros, tanto para o exterior do compósito quanto para seu interior (Figura 24 (a)). No interior do UHPC, onde as temperaturas são menores que as camadas mais superficiais, o vapor de água se condensa,

criando assim uma “barreira” que impede a permeabilidade de gases (Figura 24 (c)).

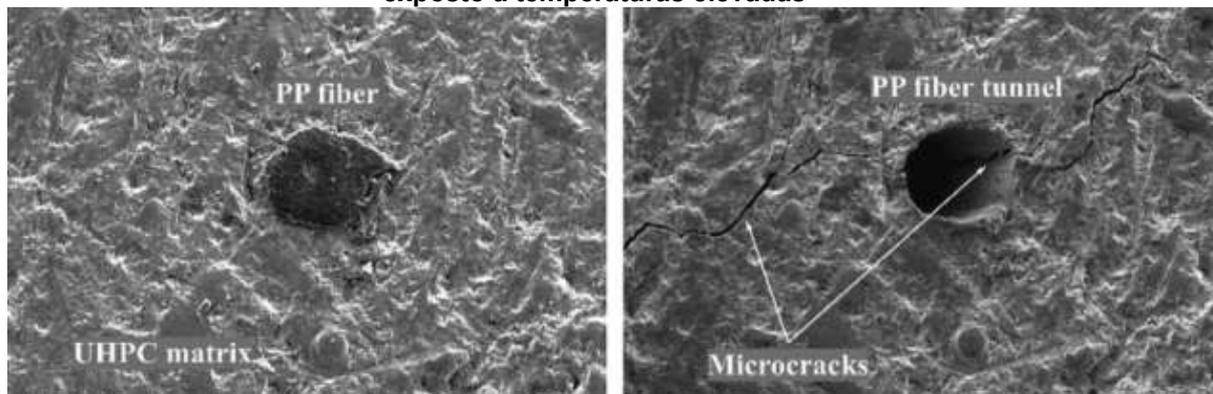
Somado a isso, de acordo com Wu, Lin e Zhou (2020); Zhu *et al.* (2021), o UHPFRC é um compósito que apresenta uma microestrutura bastante densa (devido ao uso de materiais bastante finos), tendo uma quantidade bastante reduzida de capilares e, conseqüentemente, acaba dificultando ainda mais a fluidez de gases. Logo, a pressão dos gases internos aumenta, gerando tensões internas até atingir o limite de resistência, levando assim ao deslocamento.

Como o UHPFRC é um material reforçado com fibras, o seu comportamento durante o aquecimento pode variar dependendo do tipo de fibra utilizado em sua produção. De acordo com Wu, Lin e Zhou (2020) e Zhu *et al.* (2021), o reforço das fibras de aço proporciona um melhor desempenho das propriedades mecânicas do concreto, permitindo resistir ainda mais contra as tensões geradas durante o processo de aquecimento.

Além disso, as fibras de aço podem contribuir contra a ocorrência do deslocamento melhorando a condutividade do UHPFRC. Como um excelente condutor de calor e distribuídos de maneira aleatória pelo compósito, as fibras de aço podem melhorar a condutividade térmica deste e, assim, reduzir as tensões provocadas pela diferença de temperatura. De acordo com Liang (2018), a diferença de temperatura entre diferentes partes do concreto (como entre sua superfície exposta ao fogo e o interior, região mais resfriada) pode resultar em fissurações internas devido a aparição de tensões térmicas quando sujeitas a um rápido aquecimento.

Segundo estudos de Li *et al.* (2019), Liang (2018) e Wu, Lin e Zhou (2020), o benefício das fibras poliméricas contra a ocorrência do deslocamento está ligada à sua temperatura de fusão ser considerada baixa. O derretimento das fibras poliméricas ilustrada na Figura 25 promove um aumento de porosidade e também induz a passagem das microfissuras por esses poros, aumentando assim a permeabilidade do UHPFRC. Desse modo, há uma maior facilidade da liberação do vapor, diminuindo assim a chance da ocorrência do deslocamento.

Figura 25 - Micrografia de UHPFRC com fibras de polipropileno antes (a) e depois (b) de exposto à temperaturas elevadas



Fonte: Zhu *et al.* (2021))

Com base em Sanchayan e Foster (2016) e Wu, Lin e Zhou (2020), o uso combinado das fibras de aço e poliméricas melhoram o desempenho do UHPFRC, pois é possível aproveitar os benefícios que ambas as fibras trazem, sendo capazes de reduzir a probabilidade da ocorrência e intensidade do deslocamento e também de apresentar um desempenho mecânico em altas temperaturas.

Segundo trabalhos experimentais realizados por Sanchayan e Foster (2016), Yoo *et al.* (2020), Ozawa *et al.* (2019) e Li *et al.* (2019), traços de UHPFRC contendo somente fibras de aço apresentam um deslocamento explosivo quando submetidos a altas temperaturas. Além disso, os traços desenvolvidos por esses autores mostram que a adição ou substituição parcial de fibras de aço por PVA e polipropileno na composição do UHPFRC amenizam tal comportamento.

O intervalo de valores para as fibras de PVA foi selecionado com base em estudos experimentais de Sanchayan e Foster (2016) que, ao substituir 0,25% em volume de fibras de aço por fibras de PVA, não obtiveram nenhum corpo de prova com deslocamento, e de Meng e Khayat (2018) que, para a substituição de 0,50% por fibras de PVA, obtiveram um comportamento mecânico superior em comparação com UHPFRC produzido somente com fibras de aço. Entretanto, muitos estudos mostram que, em geral, a substituição de fibras de aço por sintética causa uma queda no comportamento mecânico, sendo mais acentuado conforme se aumenta o teor de substituição.

2.5. Planejamento experimental

Em qualquer área de pesquisa, é de grande interesse identificar as diferentes variáveis que estão presentes no estudo, buscando entender como elas influenciam na resposta desejada de um objeto em análise.

Com base em Breitreitz, Souza e Poppi (2014), Elias (2014) e Fontes (2012), um dos métodos estatísticos mais adequados para se tratar de múltiplas variáveis é a realização de um experimento fatorial, que consiste na investigação dos efeitos gerados pela combinação entre os níveis de dois ou mais fatores (ou variáveis) em um determinado experimento. Os resultados gerados são, então, utilizados para a construção de modelos matemáticos que descrevem o comportamento do sistema em estudo.

Segundo Breitreitz, Souza e Poppi (2014), o método traz vantagens como:

- estudo das interações entre os fatores, apontando quando o efeito de um dos fatores depende do efeito de outro fator;
- possibilidade de, a partir de modelos de regressão, a construção de uma superfície, chamada superfície de resposta, que descreve o comportamento da propriedade de interesse diante a variação dos níveis dos fatores, permitindo assim prever, de modo probabilístico, diferentes pontos dentro do domínio experimental e não apenas aqueles que foram realizados;
- fornecer informações mais ricas sobre o sistema em estudo, permitindo localizar condições ótimas do sistema com um número reduzido de experimentos, economizando tempo, custo e geração de resíduos.

2.5.1. Planejamento fatorial 2^k

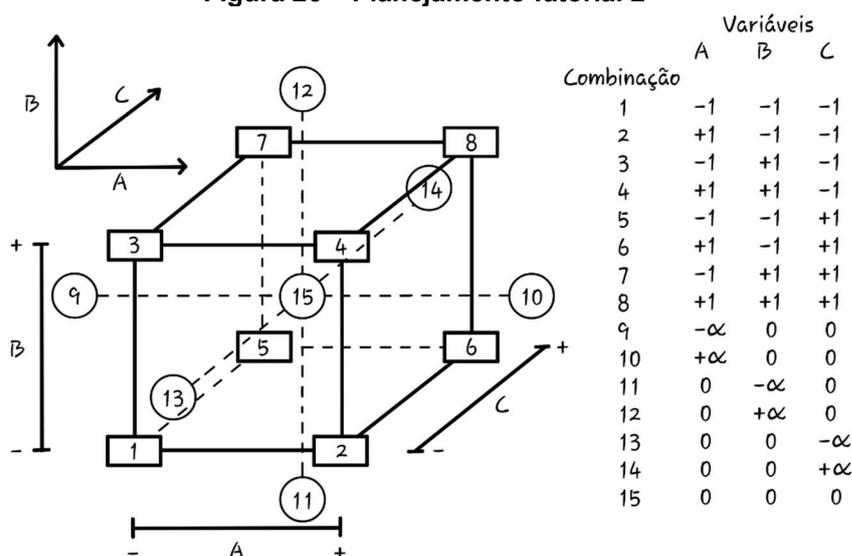
Segundo Fontes (2012), um experimento fatorial é representado por N^k , onde k é o número de fatores em estudo e N é a quantidade de níveis para cada fator. Nesse planejamento, segundo Teodosio (2015), são investigadas todas as

combinações possíveis dos níveis existentes em cada fator, sendo avaliada de modo quantitativo a influência dos fatores sobre as variáveis de resposta de interesse, além de ponderar quanto às possíveis interações entre os fatores que são relevantes.

É indicado o planejamento fatorial em dois níveis (2^k) para a quantificação da influência de cada fator na resposta, pois, além de fornecer um menor número de observações, permite a construção de modelos lineares ou quadráticos nos fatores para descrever o sistema estudado (BREITKREITZ; SOUZA; POPPI, 2014; SANTOS, 2017; TEODOSIO, 2015). A construção gráfica desses modelos é denominada superfície de resposta.

Segundo Fontes (2012) e Teodosio (2015), um procedimento utilizado para a otimização do sistema é o Delineamento Composto Central Rotacional. Esse tipo de delineamento é de característica simétrica e de segunda ordem, apresentando 2^k pontos fatoriais, um ou mais pontos centrais e 2^*k pontos axiais, sendo necessário um menor número de ensaios a serem realizados em comparação ao delineamento fatorial completo.

No planejamento fatorial em dois níveis, cada fator apresenta dois níveis, sendo convencionalmente representado como “-“ ou “-1” para o valor mínimo e “+” ou “+1” para o valor máximo. No caso do ponto central, sua representação é “0” enquanto para os pontos axiais, sua representação é $\pm\alpha$, sendo α igual a $2^{(k/4)}$, recebendo o sinal positivo para seu valor máximo positivo e sinal negativo para seu valor mínimo. Com a utilização da codificação numérica ($\pm\alpha$, 0 e ± 1), é possível representar o planejamento fatorial por meio de pontos em um sistema cartesiano. Conforme a Figura 26, é possível ver, por exemplo, a representação gráfica do planejamento fatorial de três fatores (2^3).

Figura 26 – Planejamento fatorial 2^3 

Fonte: Adaptado de BOX, HUNTER e HUNTER (2005)

A adição de pontos centrais e de suareplicação oferece um meio de testar a linearidade da região entre os níveis dos fatores, para o qual o valor resposta obtido nesse ponto é comparado com o valor previsto pelo modelo linear e, indicará a necessidade de se realizar um ajuste na curva se houver diferença estatisticamente significativa. Também é eficaz na obtenção de respostas entre os níveis atribuídos aos fatores. Apesar de melhorar a qualidade no processo em termos de precisão e exatidão, não se consegue adicionar pontos centrais quando se tem variáveis qualitativas, apenas em variáveis quantitativas. (BREITKREITZ; SOUZA; POPPI, 2014; SANTOS, 2017; TEODOSIO, 2015; TEÓFILO; FERREIRA, 2006)

O experimento fatorial composto central é montado de forma a atender a ortogonalidade, rotatividade e precisão uniforme, necessários para a validade do método de superfície de resposta (CAMARGO; MOREIRA; VACCARO, 2010). Segundo Fontes (2012) e Teófilo e Ferreira (2006), a metodologia de superfície de resposta é bastante utilizada para desenvolver, melhorar e aperfeiçoar processos, dando condições de explorar (modelar e deslocar) o sistema até sua otimização, ou seja, encontrar os valores das variáveis que irão produzir a(s) melhor(es) resposta(s) desejadas.

Segundo Teodosio (2015), o modelo matemático utilizado para gerar a superfície de resposta representa a relação da função de resposta e dos níveis dos fatores, podendo ser um modelo de primeira ordem (linear) ou de segunda ordem

(quadrática), sendo a última utilizada para otimização, já que se utiliza do ponto central. A equação para o modelo de segunda ordem é apresentada abaixo:

$$\gamma = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i X_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{i=2, i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad \text{Equação (20)}$$

Onde:

X_1, X_2, \dots, X_K são as variáveis independentes que tem influência na resposta Y ;

β_0 é o coeficiente de interceptação (deslocamento)

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são os coeficientes lineares (primeira ordem)

$\beta_{11}, \beta_{22}, \dots, \beta_{kk}$ são os coeficientes quadráticos (segunda ordem)

$\beta_{1j}, \beta_{2j}, \dots, \beta_{kj}$ são os coeficientes de interação

ε é o erro experimental.

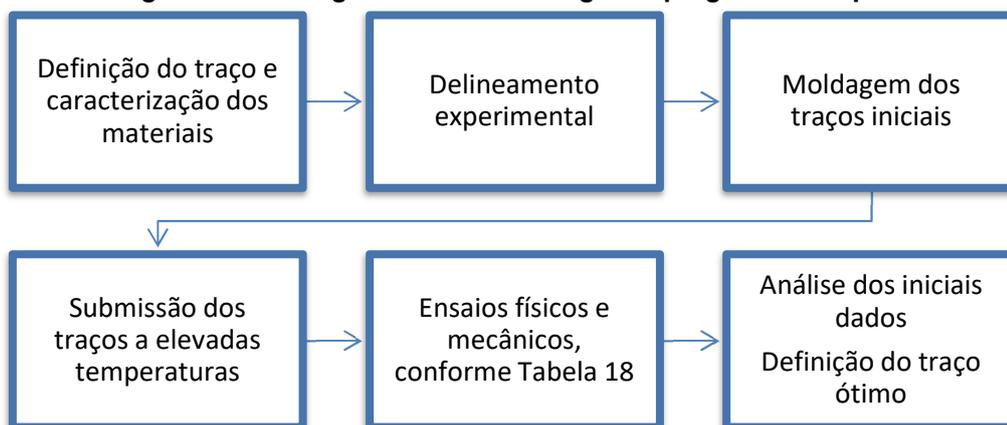
Uma etapa muito importante é a adequação às respostas obtidas experimentalmente, que ditará sua capacidade de previsão. Tal avaliação pode ser realizada de diversas maneiras, sendo as mais comuns a Análise de Variância (ANOVA), a avaliação do gráfico de resíduos (diferença entre os valores obtidos experimentalmente e aqueles previstos pelo modelo) e o gráfico de valores experimentais versus os valores previstos pelo modelo. (BREITKREITZ; SOUZA; POPPI, 2014)

A qualidade de ajuste do modelo também pode ser verificada a partir de seu Coeficiente de Correlação (R) e Coeficiente de Determinação (R^2). Com base em Devore (2012), Coeficiente de Correlação (R) aponta uma aceitabilidade sobre a correlação entre os valores experimentais e preditos do modelo. O valor do Coeficiente de Determinação (R^2) é uma proporção da variação total dos valores observados de atividade sobre a média explicada, indicando o quão próximo os valores obtidos em experimento estão dos resultados preditivos. Quanto mais próximo de 1, mais o modelo consegue explicar toda a variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média, enquanto que quanto mais próximo de 0 menos o modelo consegue explicar tal variabilidade.

3. METODOLOGIA

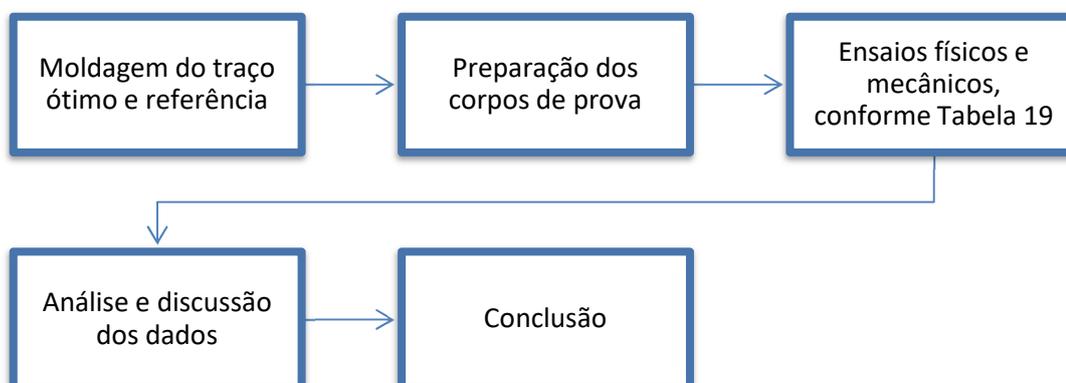
Este trabalho propõe um estudo de caracterização do UHPFRC com dois tipos de fibras, de aço e de PVA, sob ação de elevadas temperaturas (variáveis independentes), avaliando seu comportamento quanto às propriedades físicas e mecânicas (variáveis dependentes). A metodologia adotada foi dividida em duas etapas ilustradas por meio de fluxogramas. Na etapa inicial, avaliou-se o comportamento do UHPFRC em elevadas temperaturas em função das dosagens de fibras de aço e PVA (Figura 27). Na Figura 28, apresentou-se as etapas de caracterização do traço ótimo em relação a resistência a tração e a resistência residual.

Figura 27 - Fluxograma da metodologia empregada na etapa 1



Fonte: Autoria própria

Figura 28 - Fluxograma da metodologia empregada na etapa 2



Fonte: Autoria própria

3.1. Determinação do traço

O traço desenvolvido por Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018) foi escolhido para ser utilizado, pois obtiveram resistência à compressão, com corpo de prova cúbicos submetidos à cura em água a temperatura ambiente, variando entre 137 MPa e 175 MPa aos 28 dias, sendo compatível a classe 150/165, especificada pela norma NF P18-470.

Na Tabela 2, são apresentados os consumos de materiais do traço referência produzido por Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018) e que será replicado neste estudo inserindo-se diferentes teores de fibras de aço e de PVA. Nesta tabela também pode-se observar os materiais utilizados pelos autores e as especificações dos materiais utilizados nesta pesquisa. Buscou-se adotar materiais com características mais similares possíveis aos do traço referência.

Tabela 2 - Traço de referência de UHPFRC utilizado

Material	Traço unitário	Traço (kg/m³)	Especificação	
			Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018)	Adotados neste estudo
Cimento	1,00	922,880	Cimento portland comum de grau 53	CP-VARI
Sílica ativa	0,19	179,160	-	-
Areia	1,10	1015,168	Quartzo	Quartzo
Pó de quartzo	0,10	92,288	Quartzo	Quartzo
Aditivo	0,04	36,915	Policarboxilato	Policarboxilato
Água	0,19	179,160	-	-
Fibra de aço	0,02	157,000	Aço	Aço

Fonte: Autoria própria

As especificações dos materiais utilizados por Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018) são: Cimento Portland Comum de grau 53, segundo a norma indiana IS 12269:1987, os limites físicos e mecânicos indicados para este tipo de cimento se assemelham mais ao cimento CP V especificado pela ABNT NBR 16697:2019, areia de quartzo de dimensões entre 150µm e 600µm e pó de quartzo com diâmetro médio de 10µm.

3.1.1. Caracterização dos materiais

O cimento utilizado para esse estudo foi o CPV ARI, a água utilizada foi proveniente da rede pública de distribuição da SANASA e a areia e o pó de quartzo fornecidos pela empresa Beneficiamento de Minérios Rio Claro (BMRC). As propriedades químicas do cimento são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do cimento

Constituintes	Composição química (%)	
	Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018)	LIZ (*)
Dióxido de silício (SiO ₂)	20.10	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	5.62	-
Óxido de ferro III (Fe ₂ O ₃)	2.17	-
Óxido de cálcio (CaO)	62.92	-
Óxido de magnésio (MgO)	1.14	1,63
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0.30	0,07
Óxido de potássio (K ₂ O)	2.92	0,73
Trióxido de enxofre (SO ₃)	0.85	2,72
Anidrido carbônico (CO ₂)	-	1,89
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	-	6,909
Resíduo insolúvel	-	1,09
Perda ao fogo	3,98	2,73
Equivalencia alcalino	-	0,55

(*) FREITAS (2020). Fonte: Autoria própria

A partir de então, foram caracterizados em laboratório o cimento, a areia de quartzo, pó de quartzo e a sílica ativa, conforme procedimentos de caracterização indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Ensaio e normas de caracterização para os materiais

Material	Característica	Norma de ensaio
	Distribuição granulométrica	Granulometria à laser
Cimento	Resistência à compressão	ABNT NBR 7215:2019
	Massa específica	ABNT NBR 16605:2017
Sílica ativa	Distribuição granulométrica	Granulometria à laser
	Massa específica	Termogravimetria (TGA)
Areia de quartzo	Distribuição granulométrica	Granulometria à laser
	Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009
Pó de quartzo	Distribuição granulométrica	Granulometria à laser
	Massa específica	ABNT NBR 16605:2017

Fonte: Autoria própria

A resistência à compressão do cimento foi determinada utilizando corpos de prova cilíndricos de dimensões $\phi 50 \times 100$ mm para idades de 1, 3, 7 e 28 dias e os resultados obtidos são apresentados pela Tabela 5.

Comparando com os valores obtidos Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018), aos 7 dias a resistência do cimento obtida em laboratório ficou próxima, porém, não houve um aumento significativo da resistência aos 28 dias como ocorreu com os autores, apresentando assim uma resistência mais baixa. Apesar disso, pode-se observar que o cimento CP V utilizado atende aos limites exigidos pela norma de requisitos do cimento Portland ABNT NBR 16697:2018.

Tabela 5 - Resistência à compressão do cimento Portland

Idade	Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018)	Obtidos em laboratório	Limite segundo ABNT NBR 16697:2018
1 dia	-	14,64	$\geq 14,0$
3 dias	-	32,43	$\geq 24,0$
7 dias	43,4	40,23	$\geq 34,0$
28 dias	56,8	45,69	-

Fonte: Autoria própria

Para a determinação de sua massa específica foram utilizadas duas amostras para o cimento, de sílica ativa, de areia de quartzo e de pó de quartzo. Os resultados são apresentados na Tabela 6. Os materiais apresentados têm valores de massa específica próximas dos mesmos utilizados por Vigneshwari,

Arunachalam e Angayarkanni (2018), sendo uma diferença menor que 5% com relação ao dos autores, com excessão do pó de quartzo, cuja diferença é de 12%.

Tabela 6 - Massa específica do cimento, sílica ativa, areia de quartzo e pó de quartzo

Material	Massa específica (g/cm³)	
	Vigneshwari, Arunhachalam e Angayarkanni (2018)	Obtidos em laboratório
Cimento	3,100	2,985
Sílica ativa	2,170	2,110
Pó de quartzo	2,680	2,358
Areia de quartzo	2,600	2,656

Fonte: Autoria própria

A sílica ativa utilizada foi Centrilit Fume S fornecida dispersa em solução aquosa, por isso se fez necessário verificar seu teor de sólidos. Nesse caso, tanto o teor de sólidos como a massa específica foram determinados por meio do ensaio de termogravimetria, uma análise térmica que consiste na medição da massa de uma amostra em função da temperatura. Por meio da curva termogravimétrica, é possível determinar no trecho analisado os pontos onde ocorre o início e o fim da perda de massa e onde se inicia a constância de massa da amostra (MARCONCINI; OLIVEIRA, 2007; NITA; JOHN, 2007).

O procedimento para a determinação do teor de sólidos e da massa específica da sílica ativa está descrito no Anexo A. O teor de sólidos obtido foi de 52,34% e a massa específica determinada está presente na Tabela 6.

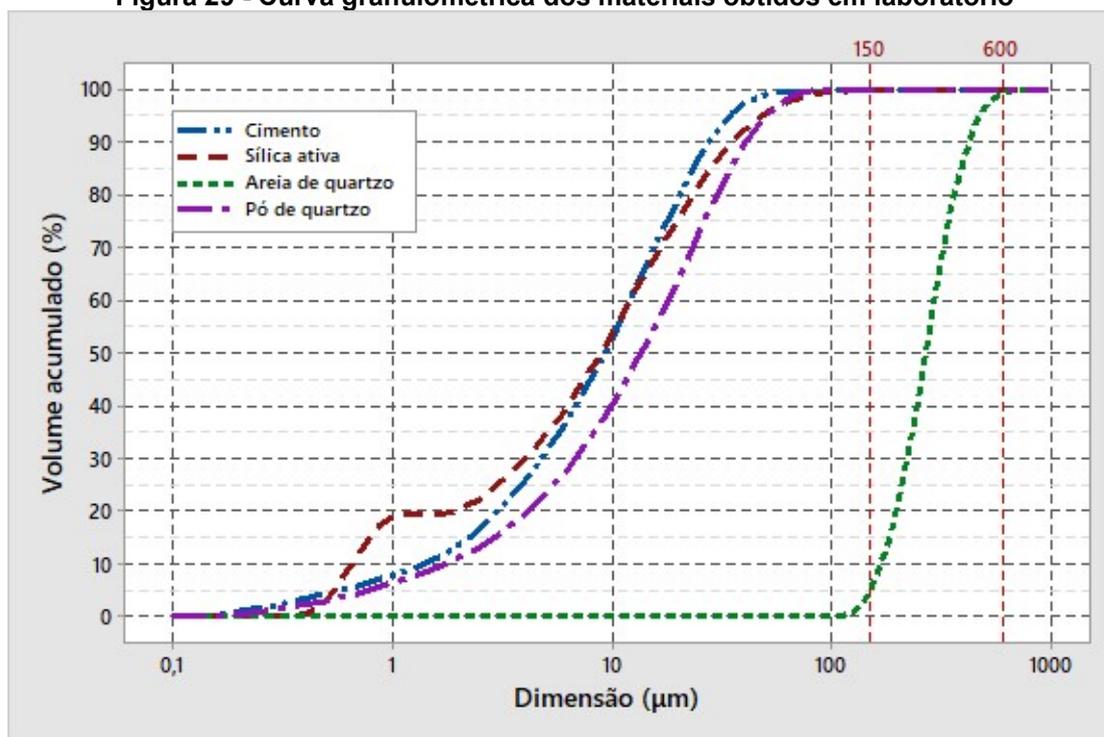
A granulometria dos materiais foi realizada utilizando um Analisador de Tamanho de Partículas por Difração à Laser – MASTERSIZER-3000. Os resultados estão presentes na Tabela 7 e Figura 29.

Tabela 7 - Resultados da granulometria

Material	Obtidos em laboratório	
	Vigneshwari, Arunhachalam e Angayarkanni (2018)	Dv(50) (µm)
Cimento	-	9,232
Sílica ativa	-	11,511
Areia de quartzo	Entre 150µm e 600µm	266,7
Pó de quartzo	Diâmetro médio de 10µm	13,63

Fonte: Autoria própria

Figura 29 - Curva granulométrica dos materiais obtidos em laboratório



Fonte: Autoria própria

No gráfico da areia de quartzo (Figura 29), é possível observar que a curva obtida se enquadra bem no intervalo apresentado por Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018), mesmo que o valor intermediário desse intervalo (375 μm) seja um pouco superior ao valor obtido em laboratório. No caso do pó de quartzo, ambos apresentam um diâmetro médio próximo.

O aditivo utilizado foi o MC-Powerflow 4001, um superplastificante líquido de base policarboxilato que fornece uma excelente trabalhabilidade para concretos que necessitam de uma baixa relação água/cimento. Os dados presentes na Tabela 8 foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 8 - Características do aditivo

Tipo	Coloração	Base	Densidade (kg/L)	Dosagem recomendada
Superplastificante	Marron avermelhado	Policarboxilato	1.12	≥ 0,2% e ≤ 5,0% (sobre a massa do cimento)

Fonte: Autoria própria

No caso de Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018), o aditivo superplastificante utilizado apresenta uma base policarboxilado, a mesma que o aditivo utilizado nesse trabalho.

As fibras metálicas utilizadas são de aço da marca DRAMIX OL 13/.20 com fator de forma igual a 65, que fornece um alto desempenho e resistência à fissuração, além de ductilidade para o compósito. As fibras poliméricas utilizadas são de PVA da marca KURALON, que fornece aumento de resistência à flexão, controle de rachaduras e ductilidade ao material. As características de ambas as fibras foram fornecidas pelos respectivos fabricantes e estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Características das fibras

Fibra	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Massa específica (g/cm³)
Aço (*)	0,20	13	2160	210	7,850
PVA (**)	0,04	12	1600	41	1,300

(*) BELGO BEKAERT ARAMES (**) KURARAY. Fonte: Autoria própria

No caso das fibras, Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018) utilizaram fibras de aço de 6mm de comprimento, 0,12mm de diâmetro e fator de forma de 50 e resistência à tração de 2250 MPa. Comparando com os da DRAMIX, elas apresentam menores dimensões, tanto em comprimento quanto em diâmetro, porém tem uma resistência à tração bastante próxima.

A escolha do uso das fibras de PVA dentre os outros tipos de fibras poliméricas se deu por suas propriedades mecânicas serem maiores que as de outros tipos de fibras poliméricas. Com isso esperou-se que, ao ser inseridas no UHPFRC, não diminua a resistência do concreto quando comparado ao UHPFRC produzido apenas com fibra de aço. Outra característica importante da fibra de PVA é sua temperatura de fusão, em torno de 240°C, que pode possibilitar a diminuição da ocorrência do deslocamento frente a ação do fogo.

Na Tabela 10 é possível observar os diferentes tipos de fibras poliméricas que já foram utilizados em estudos recentes de UHPC, sendo destacado na primeira linha a fibra de PVA utilizada nesse trabalho. Observando

as propriedades citada pelos autores, as fibras de PVA apresentam os maiores valores de resistência à tração e de módulo de elasticidade (com exceção do polietileno). As fibras de polietileno, apesar de apresentar as melhores propriedades mecânicas, apresentam um alongamento superior aos demais, que pode prejudicar na resistência à tração na pós-fissuração.

Tabela 10 - Propriedades de fibras poliméricas utilizadas em estudos de UHPFRC

Autor	Tipo de fibra	Resistência à tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm³)
Kuraray (2015)	Poliacetato de vinila (PVA)	1.60	41.0	1.300
Park <i>et al.</i> (2019)	Poliacetato de vinila (PVA)	1.20	-	1.300
Sanchayan e Foster (2016)		1.00	29.0	
Meng e Khayat (2018)		1.40	-	
Buitelaar e Müller (2020)		entre 0,88 e 1,60	entre 25,0 e 41,0	
Eide e Hisdal (2012)		entre 0,80 e 0,90	entre 26,0 e 30,0	
Park <i>et al.</i> (2019)	Polipropileno	entre 0,30 e 0,75	> 1,4	0.910
Buitelaar e Müller (2020)		entre 0,60 e 1,20	entre 2,0 e 9,0	
Rasul <i>et al.</i> (2020)		0.45	3.5	
Kim e Wang (2019)		0.66	-	
Xiong e Liew (2015)		≥ 0,45	-	
Christ <i>et al.</i> (2019)		entre 0,50 e 0,70	5	
Liang (2018)		≥ 0,40	≥ 3,5	
Eide e Hisdal (2012)	entre 0,45 e 0,70	entre 7,5 e 12,0	0.980	
Park <i>et al.</i> (2019)	Polietileno	entre 2,9 e 3,16	-	0.960
Kang <i>et al.</i> (2016)		2.70	88.0	
Park <i>et al.</i> (2019)	Nylon	entre 0,75 e 0,90	entre 3,9 e 4,9	1.100

Fonte: Autoria própria

Segundo Figueiredo (2011), com elevada resistência à tração e módulo de elasticidade, as fibras, além de conseguir resistir a maiores esforços, para começar a atuar como reforço não precisarão que o compósito apresente grandes deformações após sua ruptura.

A dosagem de fibras de aço utilizada para a produção dos traços variou de 1,5% a 2% do volume total do concreto, estes limites foram adotados, baseados nas pesquisas de Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018). Para a fibra de PVA foram utilizadas dosagens variando de 0% a 0,5%, estes valores foram definidos no delineamento fatorial 2^k e apresentados no item 3.4.

3.2. Procedimento de mistura, moldagem e cura

A mistura dos materiais foi realizada utilizando um misturador vertical de alta intensidade com capacidade de até 10 litros da marca Perfecta e com três velocidades: baixa (95 rpm), média (180rpm) e alta (280rpm). O procedimento adotado consiste nos seguintes passos:

- 1) Adição de 50% do cimento+ adição de 100% da sílica + adição de 100% de água e misturar por 5 minutos em velocidade baixa;
- 2) Adição de 25% do cimento + adição de 100% do aditivo e misturar por 5 minutos em velocidade média;
- 3) Adição de 25% do cimento e misturar por 5 minutos em velocidade alta;
- 4) Adição de 100% da areia + adição de 100% do pó de quartzo misturar por 5 minutos em velocidade alta;
- 5) Adição das fibras de maneira uniforme e misturar por 5 minutos, sendo que a velocidade foi baixa durante a inserção das fibras e alta logo após.

O procedimento de mistura foi adotado com base em Hiremath e Yaragal (2017), que realizaram um estudo sobre o efeito do método de mistura dos materiais nas propriedades de concretos de pós reativos no estado fresco e endurecido, levando em consideração a ordem dos materiais, velocidade do misturador e tempo de mistura.

Nesse estudo, foi realizado cinco métodos diferentes de mistura, como mostra a Tabela 11 e foi verificado que o método 3 foi aquele que apresentou a maior fluidez e também maior resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 11 - Procedimentos de mistura, fluidez e resistência a compressão estudados por Hiremath e Yaragal (2017)

Mistura	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Fluidez (mm)	Resistência à compressão (MPa)
1	Todos os ingredientes secos (cimento, sílica ativa, areia e pó de quartzo)	50% da água e 50% do aditivo superplastificante	Restante da água com metade do superplastificante	-	185	105
2	Cimento e sílica ativa	Areia e pó de quartzo	80% da água e 100% do aditivo superplastificante	20% da água	190	111
3	Cimento e sílica ativa	80% da água e 100% do aditivo superplastificante	Areia e pó de quartzo	20% da água	210	128
4	Cimento, areia e pó de quartzo	80% da água e 100% do aditivo superplastificante	Sílica ativa	20% da água	195	117
5	Cimento, sílica ativa e pó de quartzo	80% da água e 100% do aditivo superplastificante	Areia de quartzo	20% da água	205	120

Fonte: Autoria própria

Como a sílica estava dispersa em água em proporções iguais em massa, a adição de toda a água foi realizada na primeira etapa. Para manter essas quatro etapas de mistura, foi fracionado a adição de cimento, de modo que a maior parte fosse inserida inicialmente e o restante adicionado igualmente nas duas etapas seguintes.

Já que Hiremathe Yaragal (2017) não apresenta o uso de fibras em seu estudo, foi adicionado uma nova etapa para a adição das fibras, sendo essa a última, assim como Buchman e Badea (2015), que apresentam um método de mistura semelhante ao método 3 apresentado na Tabela 11, tendo como diferença apenas a separação da etapa 3 em duas etapas (uma para os agregados mais finos e outra para os mais graúdos).

Finalizada a mistura dos materiais, os moldes são preenchidos totalmente em uma única camada e o adensamento é realizado por meio de uma mesa vibratória. O tempo de vibração adotado foi 2 ± 1 minutos, em que a variação do tempo é decorrente da fluidez da mistura, necessitando de um menor tempo para os traços que apresentaram maior fluidez e maior tempo para o caso de menor fluidez.

Para o procedimento de cura, os corpos de prova foram mantidos submersos em água com cal à temperatura ambiente, conforme ilustra a Figura 30.

Figura 30 - Cura dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria

3.3. Estudo do traço piloto

Com o intuito de verificar se o traço de UHPFRC escolhido adquire resistência à compressão que se enquadre na classificação da norma NF P-18 470, foi realizado um traço piloto e moldados dois corpos de prova cilíndricos com dimensões $\phi 10 \times 20$ cm para ruptura à idade de 7 dias.

Os resultados estão apresentados pela Tabela 12, assim como os resultados obtidos em corpos de provas cúbicos pelos autores que desenvolveram o traço. Como a dosagem de fibras de aço utilizada em ambos os casos são os mesmos (2,00% em relação ao volume), entende-se que a comparação dos resultados é válida.

Tabela 12 - Resistência à compressão do traço piloto e obtidos por Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018)

	Idade	Resistência à compressão (MPa)	Cura
Traço piloto	7	132,11	Submerso em água (Temp. ambiente)
Vigneshwari, Arunachalam e Angayarkanni (2018)	7	114,30	Submerso em água (Temp. ambiente)
	28	136,90	
	7	122,30	Vapor de água (90°C)
	28	146,90	

Fonte: Autoria própria

Para a idade de 7 dias, o traço piloto se classifica, segundo NF P-18 470, como 130/145 MPa, enquanto os resultados obtidos por VIGNESHWARI,

ARUNACHALAM e ANGAYARKANNI (2018) se enquadram apenas na classificação 130/145 para o traço com a cura em vapor de água. Essa diferença de resultado pode ter sido causada pela diferença do tipo de fibra de aço utilizada pelos autores, pois os autores utilizam fibras com um menor fator de forma. De acordo com BRAZ e NACIMENTO (2015), quanto maior o fator de forma que a fibra possui, maior tenacidade o concreto tende a apresentar, pois tendo um maior comprimento de fibra consegue garantir uma melhor ancoragem no concreto.

Portanto, pode-se concluir que aos 28 dias a resistência à compressão do traço piloto seria capaz de obter valores ainda maiores e, assim, se enquadrar em uma classificação acima de faixa de resistência (150/165 MPa) da NF P18-470.

3.4. Comportamento do UHPFRC a temperaturas elevadas

Após a verificação da resistência do traço piloto (Tabela 12), foram realizadas as moldagens de traços com diferentes dosagens de fibras de aço e de PVA para o estudo do comportamento do UHPFRC sob elevadas temperaturas, com teores de fibras conforme apresentado na Tabela 15 (resultante do delineamento 2³). Foram moldados corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 7,5 cm e altura de 15cm, utilizando formas elaboradas com cano de PVC.

Após 28 dias de cura por imersão, os CPs foram secos em temperatura ambiente por 24 horas e, em seguida, secos em estufa a 60 °C por 48 horas (Figura 31). O tempo de secagem foi limitado em função do reduzido período de tempo para a realização dos ensaios no laboratório, ocorrido devido às restrições impostas pela pandemia.

Figura 31 - Corpos de prova secos em estufa



Fonte: Aatoria própria

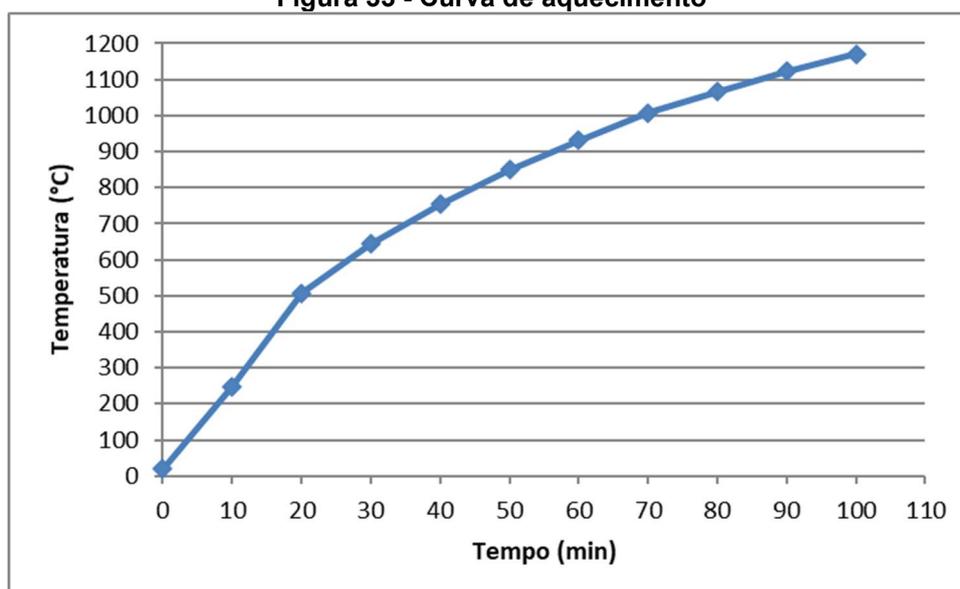
Figura 32 - Mufla utilizada



Fonte: Aatoria própria

Depois, foram retirados da estufa e esfriados até atingirem temperatura ambiente para que fossem inseridos dentro de uma mufla da marca Quimis, ilustrada na Figura 32 e com sua curva de aquecimento na Figura 33, segundo seu manual técnico.

Figura 33 - Curva de aquecimento



Fonte: Aatoria própria

Começando pela temperatura ambiente, os corpos de prova foram aquecidos até atingirem uma temperatura específica determinada pelo método de delineamento fatorial, apresentado no item 2.5.1. e indicadas na Tabela 13 do item 3.4.1. Tal temperatura foi mantida constante por uma hora e, após esse tempo, a mufla foi desligada e mantida fechada para que os corpos de prova esfriassem lentamente, evitando que sofressem choque térmico. Os corpos de prova foram retirados no dia seguinte para a realização dos ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade.

3.4.1. Delineamento experimental

Para se estudar os efeitos que a fibra de PVA pode provocar no comportamento do UHPC, foi realizado um delineamento experimental com o intuito de definir uma superfície de resposta para, assim, determinar um traço ótimo que será estudado posteriormente.

O método de planejamento adotado foi o delineamento composto central rotacional 2^3 + dois pontos centrais + seis pontos axiais. Os fatores estudados (variáveis independentes) foram a temperatura (Vi1), em °C, a qual os corpos de prova foram submetidos por um período de tempo de uma hora, os teores de fibras de aço (Vi2) e de fibras de PVA (Vi3) presentes na composição do UHPFRC. As respostas desejadas (variável dependente ou resposta) foram a resistência à compressão (Vr1) e módulo de elasticidade (Vr2). Na Tabela 13 são apresentados as variáveis e os intervalos de valores (no caso das variáveis independentes).

Tabela 13 - Variáveis e intervalos de valores adotados

Variável	Símbolo	Tipo	Intervalo de valores	
			Mínimo	Máximo
Temperatura (°C)	Vi1	Independente	20	600
Fibra de Aço (%)	Vi2	Independente	1,5	2,0
Fibra de PVA (%)	Vi3	Independente	0	0,5
Resistência à compressão (MPa)	Vr1	Dependente	-	-
Módulo de elasticidade (MPa)	Vr2	Dependente	-	-

Fonte: Autoria própria

No caso das fibras de aço, o intervalo determinado foi de 1,5% a 2%, possibilitando o estudo da superfície de resposta para o caso de substituição de até 0,5% das fibras de aço (valor máximo do intervalo das fibras de PVA) e também a adição de fibras de PVA mantendo-se constante a dosagem de 2% da fibras de aço.

Por fim, para estudar o comportamento mecânico conforme o aumento de temperatura, foi adotada a temperatura ambiente (20°C) como inicial e foi elevado até 600°C, pois, com base em Brites, Carvalho e Helene (2019), Costa

(2008), Iffat e Bose (2016) e Oliveira e Júnior (2009), atingindo temperaturas próximas de 600°C, o concreto começa a perder sua capacidade de resistir à carga, situação na qual a resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto podem atingir valores abaixo da metade das verificadas inicialmente, antes de submetidos a elevadas temperaturas. Desse modo, o ponto central acabará tendo uma temperatura próxima de 300°C, a partir da qual, a velocidade de redução da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto começa a aumentar e também quando há o aparecimento de fissuras e a ocorrência de deslocamento de camadas superficiais.

Foram determinadas as combinações dos níveis das variáveis por meio da definição dos níveis codificados apresentados na Tabela 14, com a repetição de dois pontos centrais, conforme mostra a Tabela 15. Os níveis codificados foram definidos conforme explicado no item 2.5 sobre o delineamento fatorial.

Tabela 14 - Variáveis codificadas

Variáveis	Variáveis codificadas				-1,68179
	-1,68179	-1	0	1	
Vi1	20	138	310	482	600
Vi2	1,50	1,60	1,75	1,90	2,00
Vi3	0,00	0,10	0,25	0,40	0,50

Fonte: Autoria própria

A Tabela 15 apresenta a composição em termos de porcentagens de fibras de aço (Vi2) e PVA (Vi3) e a qual temperatura (Vi1) o traço deverá ser submetido para atender ao delineamento experimental adotado, sendo que os traços são indicados em numeração sequencial conforme é montado uma combinação, totalizando assim 16 traços.

Tabela 15 - Combinação das variáveis codificadas e identificação dos traços

	Traço	Variáveis codificadas			Variáveis Experimentais		
		Vi1	Vi2	Vi3	Vi1	Vi2	Vi3
Pontos fatoriais	T1	-1	-1	-1	138	1,60	0,10
	T2	-1	-1	1	138	1,60	0,40
	T3	-1	1	-1	138	1,90	0,10
	T4	-1	1	1	138	1,90	0,40
	T5	1	-1	-1	482	1,60	0,10
	T6	1	-1	1	482	1,60	0,40
	T7	1	1	-1	482	1,90	0,10
	T8	1	1	1	482	1,90	0,40
Pontos axiais	T9	-1,682	0	0	20	1,75	0,25
	T10	1,682	0	0	600	1,75	0,25
	T11	0	-1,682	0	310	1,50	0,25
	T12	0	1,682	0	310	2,00	0,25
	T13	0	0	-1,682	310	1,75	0,00
	T14	0	0	1,682	310	1,75	0,50
Pontos centrais	T15	0	0	0	310	1,75	0,25
	T16	0	0	0	310	1,75	0,25

Fonte: Autoria própria

A Tabela 16 identifica os diferentes traços com base em sua dosagem de fibras de aço e de PVA.

Para cada combinação, foram moldados cinco corpos de prova cilíndricos ($\phi 7,5 \times 15$ cm), sendo utilizados três deles para obtenção da resistência à compressão conforme ABNT NBR 5739:2018 e dois deles para obtenção do módulo de elasticidade conforme a ABNT NBR 8522:2017. Foram moldados também para cada traço dois corpos de prova cilíndricos ($\phi 5 \times 10$ cm) para a determinação do índice de vazios conforme a ABNT NBR 9778:2009.

Tabela 16 - Dosagem de fibras de cada traços

Traços	Fibra de Aço (%)	Fibra de PVA (%)
T1 e T5	1,60	0,10
T2 e T6	1,60	0,40
T3 e T7	1,90	0,10
T4 e T8	1,90	0,40
T11	1,50	0,25
T12	2,00	0,25
T13	1,75	0,00
T14	1,75	0,50
T9, T10, T15 e T16	1,75	0,25

Fonte: Autoria própria

Após a obtenção dos resultados desses ensaios, foram desenvolvidas as superfícies de resposta por composição para que seja possível assim determinar um traço com fibras de PVA e de aço que apresente um comportamento mecânico próximo ou superior ao de um traço com 2% fibra de aço e que ao mesmo tempo apresente um comportamento mecânico residual satisfatório, após ter sido submetido a elevadas temperaturas.

Para determinar esse traço, foi levado em consideração as superfícies de respostas referentes a resistência à compressão e ao módulo de elasticidade. Inicialmente foi localizada as regiões de valores máximos de resistência à compressão e, em seguida, analisado os valores de módulo de elasticidade, verificando também se são os maiores resultados obtidos.

3.4.2. Caracterização do UHPFRC

As propriedades do UHPFRC estudadas em seu estado fresco e a metodologia de ensaio são apresentadas na Tabela 17.

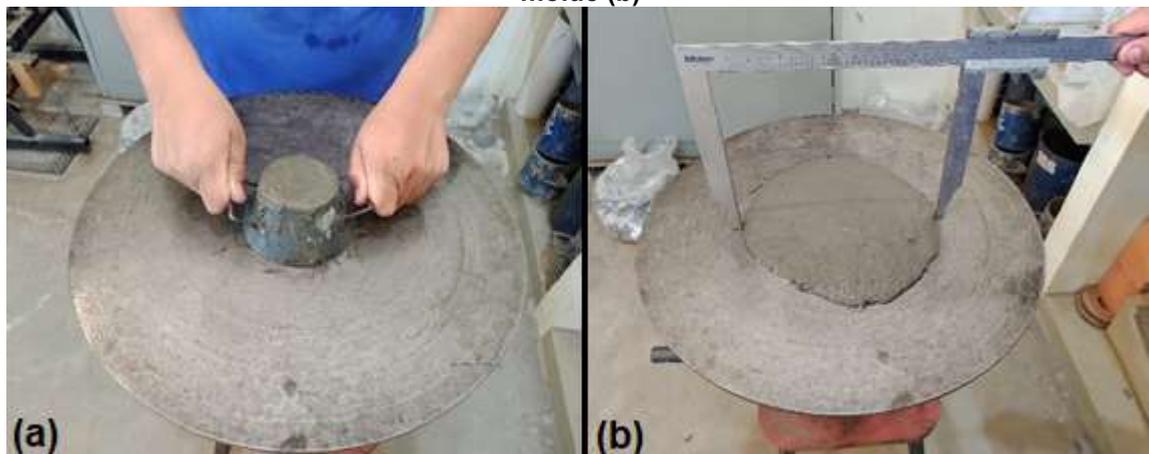
Tabela 17- Ensaios e normas utilizados em UHPFRC no estado fresco

Ensaio	Norma de referência	Adaptação
Teor de ar	ABNT NBR 13278:2005	-
Índice de consistência (Flow table)	ABNT NBR 7215 (Anexo A):2019	ASTM C1856/C1856M

Fonte: Autoria própria

Para a determinação do índice de consistência, foi utilizada uma mesa constituída por uma superfície horizontal lisa e plana. O molde rígido, tronco cônico, utilizado com as dimensões de diâmetro da base, diâmetro do topo e altura sendo, respectivamente, 125 mm \pm 0,5 mm, 80 mm \pm 0,5 mm e 65 mm \pm 0,5 mm, conforme ABNT NBR 7215:2019. O procedimento de ensaio realizado foi conforme ASTM C1856/C1856M, o qual logo após a produção do UHPFRC o molde foi preenchido em uma única camada (Figura 34(a)). Após o rasamento do topo, foi retirado o molde verticalmente e aguardado 2 minutos para o espalhamento do UHPFRC sem a realização da queda vertical da mesa. Após o tempo decorrido, foi realizada a medição do maior e do menor diâmetro e o valor da fluidez foi obtido através da média dos dois diâmetros obtidos (Figura 34(b)).

Figura 34 - Molde preenchido com UHPFRC (a) e determinação do diâmetro após retirada do molde (b)



Fonte: Autoria própria

No estado endurecido foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas indicadas na Tabela 18, que apresentam também a respectiva norma de ensaio e os tipos e quantidades dos corpos de prova.

Tabela 18 - Características e respectivas normas de ensaio para UHPFRC no estado endurecido

Característica	Norma de referência	Tipos e quantidades de Corpo de prova
Massa específica, Absorção de água e Índice de vazios	ABNT NBR 9778:2009	2 Cilindros φ5x10 cm
Resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739:2018	3 Cilindros φ7,5x15 cm
Módulo de elasticidade	ABNT NBR 8522:2017	2 Cilindro φ7,5x15 mm

Fonte: Autoria própria

3.5. Caracterização dos Traços finais

Nesta etapa foram determinadas a resistência a tração e a resistência residual, completando a caracterização mecânica dos traços referência (2% de fibra de aço) e do traço com mistura dos dois tipos de fibra que apresentou melhor comportamento a elevadas temperaturas.

Tabela 19 - Características, normas e corpo de provas para avaliação do UHPFRC

Característica	Norma de referência	Tipos e quantidades de Corpo de prova
Massa específica, Absorção de água e Índice de vazios	ABNT NBR 9778:2005	2 Cilindros φ75x150 mm
Resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739:2018	4 Cilindros φ75x150 mm
Módulo de elasticidade	ABNT NBR 8522:2017	4 Cilindro φ75x150 mm
Resistência à tração por flexão em 3 pontos	NF P18-470:2016	3 Prismas 100x100x400 mm
Resistência à tração por flexão em 4 pontos	NF P18-470:2016	3 Prismas 100x100x400 mm

Fonte: Autoria própria

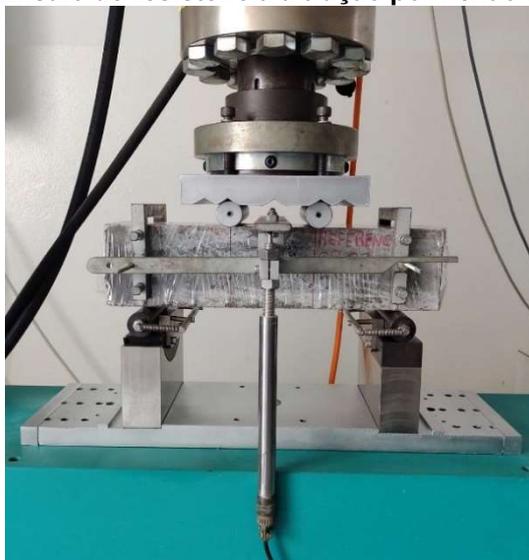
Foram realizados os ensaios indicados na Tabela 19, que indica também as normas de ensaio e os tipos dos corpos de prova a serem ensaiados.

3.5.1. Resistência à tração por flexão

O ensaio de resistência à flexão em 4 pontos foi realizado com base na norma NF P18-470 – Anexo D, a Figura 35 ilustra o procedimento de ensaio. Foi

determinado utilizando três corpos de prova prismáticos 100x100x400mm com idade de 28 dias, para cada traço (ótimo e de referência) sendo o vão entre os apoios de 300mm.

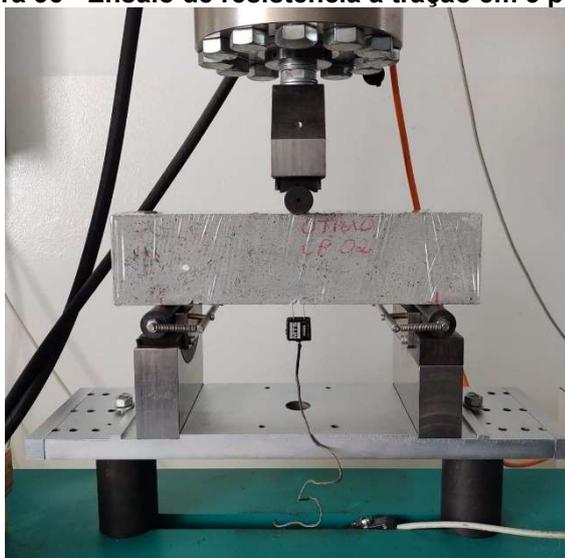
Figura 35 - Ensaio de resistência à tração por flexão em 4 pontos



Fonte: Autoria própria

O ensaio de resistência à flexão em 3 pontos foi realizado com base na norma NF P18-470 – Anexo D, ilustrada na Figura 36. Foi determinado utilizando três corpos de prova prismáticos 100x100x400mm com idade de 28 dias, sendo o vão entre os apoios de 300mm.

Figura 36 - Ensaio de resistência à tração em 3 pontos



Fonte: Autoria própria

Foi realizado um entalhe no centro do corpo de prova, na face onde seria tracionada durante o ensaio. Nessa face, foram coladas duas placas

metálicas que serviriam de apoio para o sensor, sendo assim possível realizar a medição da abertura do entalhe durante o ensaio (Figura 37).

Figura 37 - Posicionamento do sensor sob o entalhe



Fonte: Autoria própria

Para cada ensaio de resistência à tração por flexão, foram utilizados 3 corpos de prova 100x100x400mm e o vão de ensaio entre os apoios dos corpos de prova foi de 300mm.

3.6. Análise dos resultados

Os resultados obtidos, nas duas etapas, foram organizados em tabelas e gráficos e, para uma primeira análise, foram calculados os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação. Em uma segunda análise, foi aplicado o método de Grubbs para a verificação da presença de valores espúrios para cada amostra ensaiada. Por fim, a análise de variância multifator (MANOVA) foi realizada com o intuito de verificar se as características dos traços estudados se diferem significativamente com um nível de significância de 5%.

3.6.1. Método de Grubbs

Segundo Ellison, Barwick e Farrant (2009), o método de Grubbs é um teste estatístico usado para detectar outliers em um conjunto de dados univariados, assumindo que são provenientes de uma população normalmente distribuída. Detecta dentro de um conjunto de dados dispostos em ordem crescente um outlier por vez, para um nível de significância escolhido (α). Esse

outlier é removido e o teste é iterativo até não se detectar mais outliers. Entretanto, múltiplas iterações mudam as probabilidades de detecção.

O teste é definido para as hipóteses:

1. H_0 : Não há outliers nos dados versus
2. H_a : Há exatamente um outlier nos dados

Se o interesse do observador for somente a verificação do valor extremo inferior ser um outlier, então a estatística de teste de Grubbs (ou teste G) é dada pela Equação 21. Caso o interesse seja a verificação do valor extremo superior ser um outlier, então a estatística de teste G é dada pela Equação 22 (ELLISON; BARWICK; FARRANT, 2009).

$$G_{min} = \frac{\bar{y} - y_{min}}{s} \quad \text{Equação (21)}$$

$$G_{max} = \frac{y_{max} - \bar{y}}{s} \quad \text{Equação (22)}$$

Onde:

\bar{y} = média aritmética da amostra;

y_{min} = menor valor da amostra;

y_{max} = maior valor da amostra;

s = desvio padrão da amostra

Com base em Ellison, Barwick e Farrant (2009), caso o interesse seja em um outlier que possa ser ou a extremidade inferior ou a superior, mas não ambos os casos de forma simultânea, nesse caso, o nível de significância é 2α por estar considerando as duas possibilidades (por exemplo, para $\alpha = 2,5\%$, o nível de significância do teste será de 5%). G é dado pela Equação 23.

$$G = \max \left\{ \frac{\bar{y} - y_{min}}{s}, \frac{y_{max} - \bar{y}}{s} \right\} \quad \text{Equação (23)}$$

O valor de G calculado é comparado com um valor crítico para um nível de significância escolhido. Um outlier é detectado se G_{min} , G_{max} ou G forem maiores que $G_{crítico}$.

3.6.2. Análise de variância multifator (MANOVA)

O método estatístico MANOVA, com base em Devore (2012), envolve uma análise de dados amostrais para testar a igualdade das médias entre duas ou mais populações ou tratamentos diferentes associadas a diferentes níveis de dois ou mais fatores de interesses. Fatores são as características que diferenciam populações ou tratamentos em estudos e níveis são as diferentes populações ou tratamentos presentes dentro de cada fator. Com os fatores e níveis definidos, é determinado para cada amostra um tratamento a ser realizado, sendo este uma combinação entre os níveis dos fatores. O número de observações (K) para cada tratamento de cada amostra dos traços iniciais é igual a 2.

Segundo Devore (2012), é utilizado um conjunto equivalente de médias que revela mais claramente o papel das interações. A definição do modelo estatístico é dada pela Equação 24:

$$\mu_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} \quad \text{Equação (24)}$$

Onde:

μ = resposta média esperada sobre todos os níveis de ambos os fatores (também chamada de grande média);

α_i = efeito do fator A no nível i, sendo a diferença entre a resposta média sobre todos os níveis do fator B quando o fator A é fixo no nível i e a grande média;

β_j = efeito do fator B no nível j, sendo diferença entre a resposta média sobre todos os níveis do fator A quando o fator B é fixo no nível j e a grande média;

γ_{ij} = interação entre o fator A no nível i e fator B no nível j.

Existem três hipóteses nulas (H_0) a serem considerados:

1. H_{0AB} : $\gamma_{ij} = 0$ para todo i,j versus H_{aAB} : ao menos um $\gamma_{ij} \neq 0$;
2. H_{0A} : $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_i = 0$ versus H_{aA} : ao menos um $\alpha_i \neq 0$;
3. H_{0B} : $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_j = 0$ versus H_{aB} : ao menos um $\beta_j \neq 0$;

No caso das hipóteses H_{0A} e H_{0B} serem verdadeiras, as médias das respostas para cada fator não apresentarão uma diferença significativa, seus valores F estarão fora da zona de rejeição de uma distribuição F e o valor P terá um valor maior ou igual ao nível de significância. Quando a hipótese de não interação H_{0AB} não é rejeitada e pelo menos uma entre as duas hipóteses nulas do efeito principal for rejeitada, o método de múltiplas comparações (ou método de Tukey) pode ser usado para identificar diferenças significativas entre os níveis dos fatores (DEVORE, 2012).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Inicialmente é apresentada a análise da superfície de resposta para os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade da primeira etapa. Na sequência são apresentados os resultados da etapa 2, onde foi realizado uma análise do comportamento mecânico do traço referência e do traço ótimo por meio dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à flexão, tanto em três pontos quanto em quatro pontos.

4.1. Avaliação do comportamento do UHPFRC frente a elevadas temperaturas

4.1.1. Comportamento no estado fresco

Durante o procedimento de moldagem, foi realizado o ensaio para a determinação do índice de consistência (flowtable) e do teor de ar incorporado conforme descrito no item 3.4.2. Os resultados estão presentes na Tabela 20 e a consistência obtida permitiu classificar cada traço conforme a NF P18-470 em:

1. Ca: UHPFRC que pode ser autoadensável (diâmetro ≥ 270 mm). É capaz de ser moldado sem vibração ou sem auxílio mecânico de fluxo;
2. Cv: UHPFRC viscoso (230 mm \leq diâmetro < 270 mm). É capaz de ser moldado sem vibração, mas necessita de um auxílio mecânico de fluxo;
3. Ct: UHPFRC com limite de fluidez (diâmetro < 230 mm). Geralmente capaz de fluir sob o efeito de cisalhamento dinâmico, mas cuja superfície livre em repouso pode continuar inclinada.

Tabela 20 - Índice de consistência e teor de ar incorporado

Traço	Índice de consistência (Flow Table)		Teor de ar incorporado	
	Diâmetro (mm)	Classificação (NF P-18 470)	Densidade no estado fresco (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)
1 e 5	203,33	Ct	2,401	1,74
2 e 6	175,40	Ct	2,433	0,32
3 e 7	257,93	Cv	2,405	2,20
4 e 8	162,40	Ct	2,461	-0,21
9	278,05	Ca	2,391	2,39
10	251,70	Cv	2,402	1,95
11	204,45	Ct	2,409	1,15
12	191,23	Ct	2,459	0,13
13	250,80	Cv	2,419	1,37
14	215,08	Ct	2,410	1,50
15 e 16	328,53	Ca	2,348	4,16

Fonte: Autoria própria

De maneira geral, todos os traços apresentaram um teor de ar incorporado abaixo de 5% e observa-se que os traços com maior teor de ar apresentam maior fluidez. No caso dos traços 4 e 8, o valor do teor de ar obtido foi negativo, tal fato indica que pode ter ocorrido algum erro de medição durante o ensaio, necessitando realizá-lo novamente para verificação. Além disso, a variação das dosagens de fibras entre os traços não influenciou na densidade no estado fresco, visto que todos apresentaram valores bem próximo uns dos outros.

Para melhor visualização do comportamento a fluidez com a variação do teor de fibras, foi construído uma superfície de resposta, apresentada pela Equação 25 e na Figura 38.

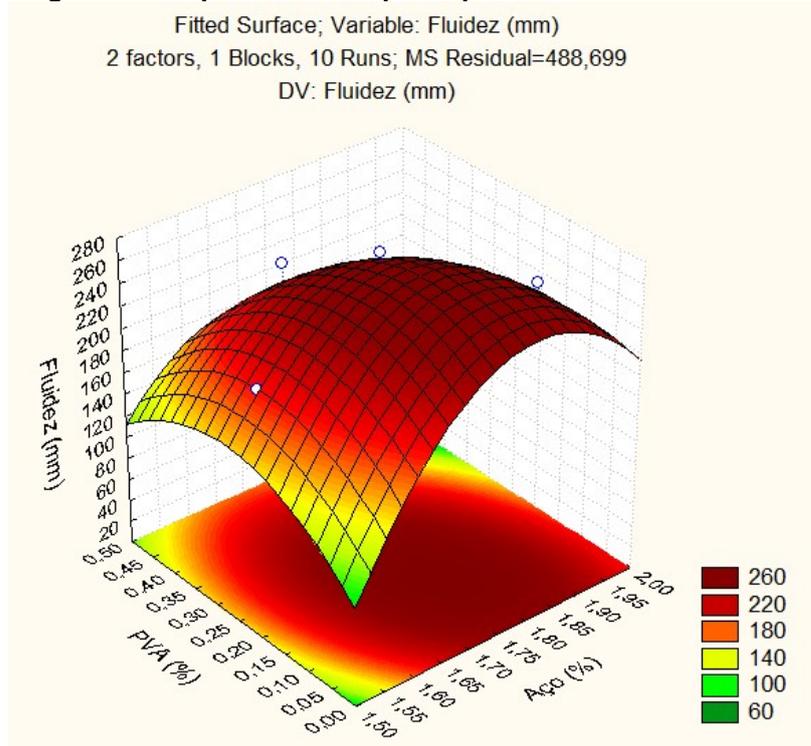
$$D = - 5210,0499444322 + 6028,525299141*A - 1663,3333333329*A^2 + 1611,1337948474*P - 883,33333333313*P^2 - 751,11111111085*A*P \quad \text{Equação (25)}$$

Onde:

D = fluidez, em mm.

A = dosagem de fibras de aço, em %;

P = dosagem de fibras de PVA, em %;

Figura 38 - Superfície de resposta para índice de consistência

Fonte: Autoria própria

A superfície de resposta gerada apresenta um valor de $R^2 = 0,85446$ e apresenta um ponto de máximo quando a porcentagem de aço é igual a 1,78 e a porcentagem de PVA é igual a 0,16%, tendo a fluidez máxima calculada de 271,91mm. É possível observar que as fibras de PVA geram uma diminuição da fluidez em função do aumento de sua dosagem.

Segundo Mayhoub *et al.* (2021), as fibras geram um intertravamento no estado fresco, o que gera perda de trabalhabilidade, além de que, maiores inclusões de volume de fibras também gerariam tais perdas. A superfície de resposta obtida, neste sentido, não é condizente com o esperado, ou seja, o modelo resultante da análise não se mostra adequado.

É possível observar também que as regiões de extremidade da superfície de resposta, com exceção da extremidade 0% de PVA e 2,00% de aço, apresentam valores abaixo do diâmetro da base do molde utilizado no ensaio ($125\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$), sendo, portanto, inconsistentes, uma vez que não é possível o UHPFRC em estado fresco diminuir seu diâmetro inicial assim que o molde é retirado.

4.1.2. Comportamento no estado endurecido

4.1.2.1. Massa específica e índice de vazios

O ensaio de massa específica, absorção de água e índice de vazios foi realizado conforme a norma ABNT NBR 9778:2009, utilizando dois corpos de prova $\phi 50 \times 100$ mm. Os resultados são apresentados na Tabela 21

Tabela 21 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios

Traço	Massa específica seca (kg/m ³)	Massa específica saturada (kg/m ³)	Massa específica real (kg/m ³)	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
1	2506,27	2532,92	2574,89	1,06	2,66
2	2517,46	2543,33	2584,32	1,03	2,59
3	2450,88	2484,30	2535,62	1,36	3,34
4	2518,56	2546,66	2591,38	1,12	2,81
5	2504,75	2531,77	2574,31	1,08	2,70
6	2500,55	2528,26	2571,81	1,11	2,77
7	2501,87	2535,54	2589,04	1,35	3,37
8	2521,92	2551,81	2599,61	1,19	2,99
9	2444,97	2474,18	2518,54	1,19	2,92
10	2449,39	2489,22	2550,98	1,63	3,98
11	2496,52	2521,69	2560,98	1,01	2,52
12	2536,56	2563,52	2606,84	1,06	2,70
13	2577,87	2601,98	2641,55	0,94	2,41
14	2508,03	2532,96	2572,16	0,99	2,49
15	2478,74	2531,62	2617,16	2,13	5,29
16	2395,43	2455,11	2547,46	2,49	5,97

Fonte: Autoria própria

Todos os traços apresentaram valores de massa específica próximas, variando entre 2450 kg/m³ e 2600 kg/m³. Isso mostra que a variação da dosagem das fibras não provoca grandes variações na massa específica do UHPC. Além disso, todos os traços estão de acordo com a norma NF P18-470, que especifica que a massa específica seca do UHPFRC deve estar entre 2200 kg/m³ e 2800 kg/m³.

Com relação a absorção de água e índice de vazios, todos os traços também apresentaram valores bem próximos entre si, com excessão dos traços 15 e 16 que apresentaram valores bastante superiores que os demais, provavelmente em função de ter maior teor de ar incorporado durante a

moldagem, como observado na Tabela 20, refletindo assim em maiores quantidades de poros e, portanto, adquirindo maiores valores de absorção de água e índices de vazios.

Conforme a norma NF P18-470, o índice de vazios deve apresentar valores abaixo de 9,0% e, portanto, todos os traços atendem a essa condição.

4.1.2.2. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Foi utilizado o software STATISTICA 7 para a construção de uma superfície de resposta. Na Tabela 22, estão os valores inseridos das variáveis independentes e das respostas obtidas para resistência à compressão. Alguns valores não foram possíveis de se obter experimentalmente devido a ocorrência de deslocamento (Figura 39) e a impossibilidade de uso do laboratório frente aos problemas causados pela pandemia de COVID 19.

Tabela 22 - Dados inseridos no software STATISTICA 7 para resistência à compressão

	1	2	3	4	5
	T. (°C)	AÇO (%)	PVA (%)	fc (MPa)	E (GPa)
1	138	1.60	0.10	169.47	48.83
2	138	1.60	0.40	196.71	59.71
3	138	1.90	0.10	182.66	46.98
4	138	1.90	0.40	176.81	51.04
5	482	1.60	0.10		
6	482	1.60	0.40		
7	482	1.90	0.10		
8	482	1.90	0.40		
9	20	1.75	0.25	186.22	44.27
10	600	1.75	0.25	163.10	
11	310	1.50	0.25		
12	310	2.00	0.25		
13	310	1.75	0.00	229.29	53.13
14	310	1.75	0.50	249.91	42.21
15	310	1.75	0.25	195.00	36.91
16	310	1.75	0.25	189.10	30.86

Fonte: Autoria própria

Figura 39 - Desplacamento ocorrido durante aquecimento



Fonte: Autoria própria

Os traços 13 e 14 foram ensaiados após serem submetidos à uma temperatura de 310°C e os valores de resistência à compressão obtidos foram, respectivamente, 23% e 34% superiores em relação ao traço 9, este ensaiado em temperatura ambiente (20°C). Entretanto, de acordo com Britez, Carvalho e Helene (2019) e Lima (2005), para temperaturas acima de 200°C, há uma tendência de uma diminuição da resistência à compressão devido à alteração química de sua estrutura, ao contrário do que foi observado para os traços 13 e 14. Em função disso, os traços 13 e 14 foram desconsiderados do delineamento fatorial, e elaboração da superfície de resposta.

Devido ao período de suspensão e limitação das atividades dos laboratórios decorrentes da pandemia e também a ocorrência de deslocamento para alguns corpos de prova submetidos a 310 e 418 °C, não foram obtidos resultados de resistência a compressão e módulo de elasticidade para todos os traços. Portanto, em relação a esses traços, foram estimados valores de resistências por meio dos procedimentos descritos no Anexo B, e também foi determinado um modelo matemático de segunda ordem, sendo verificado por meio de análise MANOVA.

4.1.2.2.1. Desenvolvimento da superfície de resposta para resistência a compressão

O modelo matemático obtido para resistência à compressão é apresentado na Equação 26, com R^2 igual a 0,99457. Os resultados dos traços

calculados pelo modelo, obtidos em laboratório e estimados (#) são apresentados na Tabela 23.

$$f_c^* = -1513,6719920032 + 0,0883464082*T - 0,0002067771*T^2 + 1849,9247355629*A - 505,4942376002*A^2 + 678,7990434340*P + 0,0017623997*P^2 - 0,0000006460*T*P - 367,5148148148*A*P$$

Equação (26)

Onde:

A = dosagem de fibras de aço, em %;

P = dosagem de fibras de PVA, em %;

T = temperatura de exposição, em °C.

Tabela 23 - Resistência à compressão obtida no modelo e no laboratório

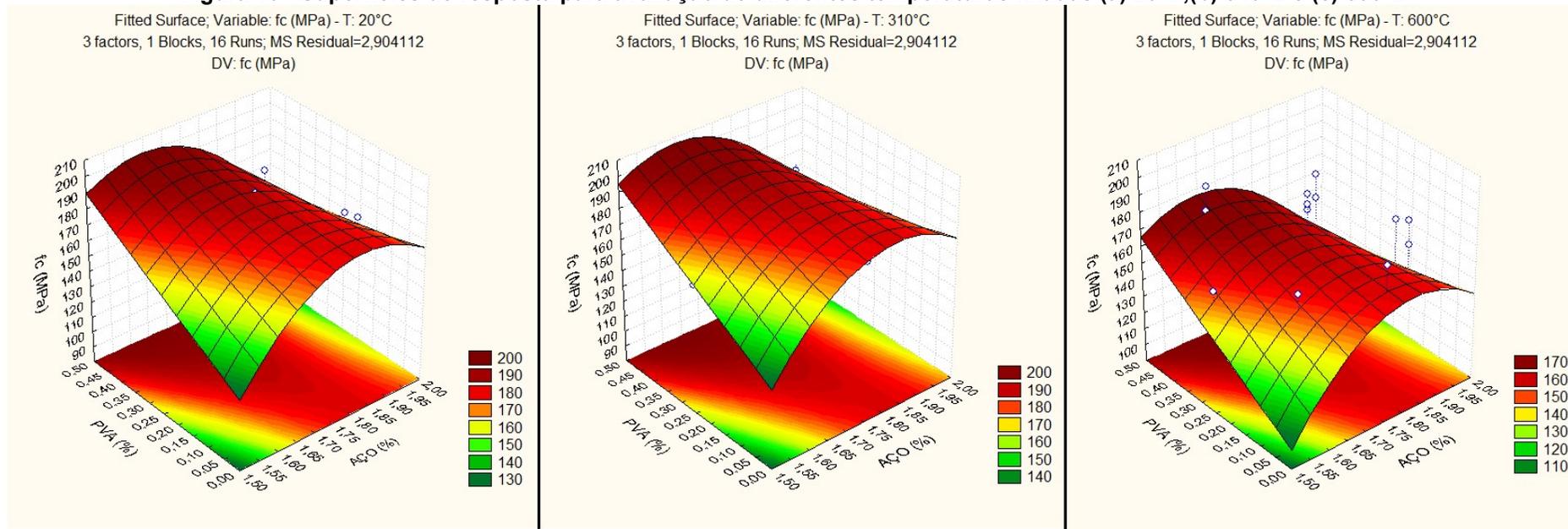
Traço	Temp. (°C)	Aço (%)	PVA (%)	Sup. Resposta f_c^* (MPa)	Laboratório f_c (MPa)
1	138	1,60	0,10	169,47	169,47
2	138	1,60	0,40	196,71	196,71
3	138	1,90	0,10	182,66	182,66
4	138	1,90	0,40	176,81	176,81
5 #	482	1,60	0,10	155,76	155,76
6 #	482	1,60	0,40	183,00	183,00
7 #	482	1,90	0,10	168,95	168,95
8 #	482	1,90	0,40	163,10	163,10
9	20	1,75	0,25	186,22	186,22
10	600	1,75	0,25	163,10	163,10
11 #	310	1,50	0,25	163,25	163,25
12 #	310	2,00	0,25	157,66	157,66
13 #	310	1,75	0,00	183,14	183,14
14 #	310	1,75	0,50	200,96	200,96
15	310	1,75	0,25	192,05	195,00
16	310	1,75	0,25	192,05	189,10

Traço com resistência à compressão estimada

Fonte: Autoria própria

Os valores obtidos pelo modelo se aproximam bastante dos resultados obtidos em laboratório e dos valores estimados, sendo então apropriado para descrever os dados. Foram construídas três superfícies de respostas (Figura 40) para verificar o comportamento da resistência à compressão do UHPFRC a uma determinada temperatura (20°C, 310°C e 600°C) frente à variação das dosagens de fibras de aço e de PVA.

Figura 40 - Superfícies de resposta para avaliação de diferentes temperaturas fixadas (a) 20°C, (b) 310°C e (c) 600°C



Fonte: Autoria própria

As três superfícies de resposta geradas apresentaram um mesmo comportamento, tendo um formato de sela bastante semelhante, apresentando seu ponto de sela na região onde a quantidade de fibras de aço varia entre 1,80% e 1,85% e a quantidade de fibras de PVA varia entre -0,05% e 0,00%, estando, portanto, fora do intervalo determinado e não sendo possível ser visto nos gráficos gerados.

O aumento da quantidade de fibras de PVA no traço de UHPFRC gera uma tendência de aumento da resistência à compressão. Entretanto, para quantidades de fibras de aço acima de 1,90%, essa tendência se inverte, tendo maiores perdas de resistência conforme maiores quantidades de fibras de PVA são inseridas. Ao observar a dosagem de fibras de aço, o comportamento da resistência apresenta um comportamento parabólico, em que os menores valores se encontram nas extremidades.

No caso estudado, a região que concentra os maiores valores de resistência à compressão em todos os casos de temperatura é delimitada pelas dosagens de PVA entre 0,35% e 0,50% e dosagens de fibra de aço inferiores a 1,90%. O ponto de máximo valor encontrado apresenta valores de 0,50% e 1,65% para, respectivamente, dosagem de fibras de PVA e de aço.

Também é possível observar o comportamento do UHPFRC frente à adição de fibras de PVA mantendo-se constante a fibra de aço em 2%, dosagem a qual é usualmente utilizado. Nesse caso, a adição acaba prejudicando a resistência, tendo maiores quedas conforme há o aumento de fibras de PVA.

Pensando em uma substituição de fibras de aço por PVA (mantendo-se constante a soma das fibras igual a 2%). O comportamento é o inverso da adição: apresenta um maior crescimento da resistência conforme aumenta-se o teor de substituição.

Analisando o efeito da elevação da temperatura sobre o UHPFRC a elevação da temperatura ambiente até 310°C causou uma baixa variação de resistência à compressão, tendo um acréscimo abaixo de 5%. Entretanto, para temperaturas mais elevadas, é nítida a queda da resistência, sendo esta entre 10% e 20% comparada com o comportamento obtido em temperatura ambiente. A

redução da resistência à compressão para as temperaturas mais elevadas pode ter sido causada pela deteriorização da pasta de cimento.

É possível observar na Tabela 24 tal comportamento nos estudos de Sanchayan e Foster (2016) e Liang *et al.* (2018), onde os traços de UHPFRC que foram expostos a uma temperatura entre 200°C e 400°C e obtiveram uma resistência à compressão superior à que foi obtida em temperatura ambiente. Com base nesses dois autores, tal fato pode ter ocorrido devido à condição hidrotérmica que prevalece devido ao acúmulo de pressão dos poros em altas temperaturas, induzindo mudanças de fase nos produtos de hidratação que podem tornar a estrutura interna mais compacta e, assim, aumentar sua resistência à compressão.

Tabela 24 - Resultados de resistência à compressão do estudo de Sanchayan e Foster (2016) e de Liang *et al.* (2018)

Autor	Fibra de aço	Fibra polimérica	Resistência à compressão, em MPa (Temp. de exposição em °C)			
			Temp. ambiente	20°C ~ 200°C	200°C ~ 400°C	400°C ~ 600°C
Sanchayan e Foster (2016)	2,00%	-	170,00 (20°C)	188,68 (200°C)	172,87 (300°C)	-
	1,00%	1,08% (PVA)	158,00 (20°C)	170,46 (200°C)	161,12 (300°C)	48,51 (600°C)
	-	2,23% (PVA)	134,00 (20°C)	143,81 (200°C)	128,34 (300°C)	69,08 (600°C)
Liang et al (2018)	2,00%	-	187,50 (20°C)	204,80 (200°C)	-	-
	-	2,00% (PP)	125,50 (20°C)	132,50 (200°C)	163,50 (400°C)	112,30 (600°C)
	1,00%	2,00% (PP)	162,10 (20°C)	176,20 (200°C)	230,10 (400°C)	153,80 (600°C)

Fonte: Autoria própria

4.1.2.2.2. Comportamento no estado endurecido – desenvolvimento da superfície de resposta para módulo de elasticidade

O modelo matemático obtido para módulo de elasticidade é apresentado na Equação 27, com R² igual a 0,99805. Os resultados dos traços calculados pelo modelo, obtidos em laboratório e estimados são apresentados na Tabela 25.

$$E^* = 38,6743290512 + 0,1399743729*T - 0,0003268141 *T^2 + 1,4122540478*A - 0,0003231396*A^2 + 84,7319703553*P + 220,5596768604*P^2 - 0,0000000311*T*A - 0,2717441860*T*P - 75,77777778*A*P$$

Equação (27)

Onde:

A = dosagem de fibras de aço, em %;

P = dosagem de fibras de PVA, em %;

T = temperatura de exposição, em °C.

Tabela 25 – Módulo de elasticidade obtido no modelo e no laboratório

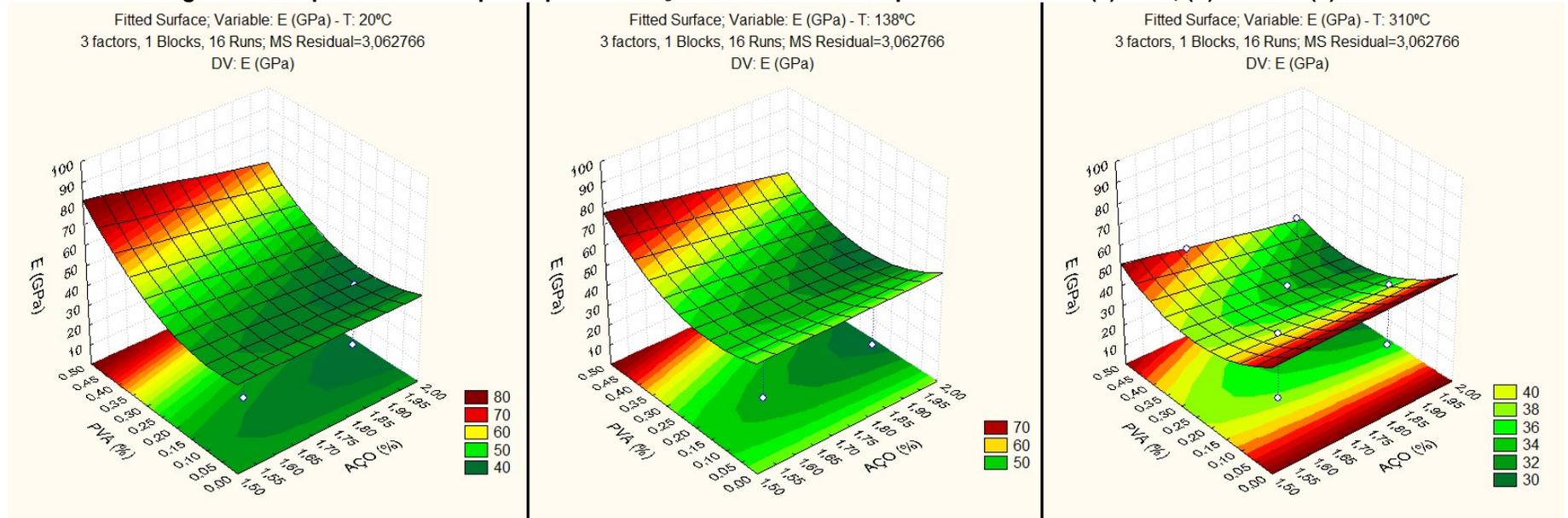
Traço	Temp. (°C)	Aço (%)	PVA (%)	Sup. Resposta E* (GPa)	Laboratório E (GPa)
1	138	1,60	0,10	48,83	48,83
2	138	1,60	0,40	59,71	59,71
3	138	1,90	0,10	46,98	46,98
4	138	1,90	0,40	51,04	51,04
5 #	482	1,60	0,10	17,93	17,93
6 #	482	1,60	0,40	0,77	0,77
7 #	482	1,90	0,10	16,08	16,08
8 #	482	1,90	0,40	-7,90	-7,90
9	20	1,75	0,25	44,27	44,27
10 #	600	1,75	0,25	-31,47	-31,47
11 #	310	1,50	0,25	38,27	38,27
12 #	310	2,00	0,25	29,50	29,50
13	310	1,75	0,00	53,13	53,13
14	310	1,75	0,50	42,21	42,21
15	310	1,75	0,25	33,89	36,91
16	310	1,75	0,25	33,89	30,86

Traço com módulo de elasticidade estimado

Fonte: Autoria própria

Os valores obtidos pelo modelo se aproximam bastante dos resultados obtidos em laboratório e dos valores estimados, sendo então apropriado para descrever os dados. Foram construídas três superfícies de respostas (Figura 41) para verificar o comportamento do módulo de elasticidade do UHPFRC a uma determinada temperatura (20°C, 138°C e 310°C) frente à variação das dosagens de fibras de aço e de PVA. Entretanto, por não ter sido obtido valores acima de 310°C, as superfícies de resposta obtidas para o módulo de elasticidade apresentam um comportamento bastante variado, causando uma maior dificuldade para a sua análise.

Figura 41 - Superfícies de resposta para avaliação de diferentes temperaturas fixadas (a) 20°C, (b) 138°C e (c) 310°C

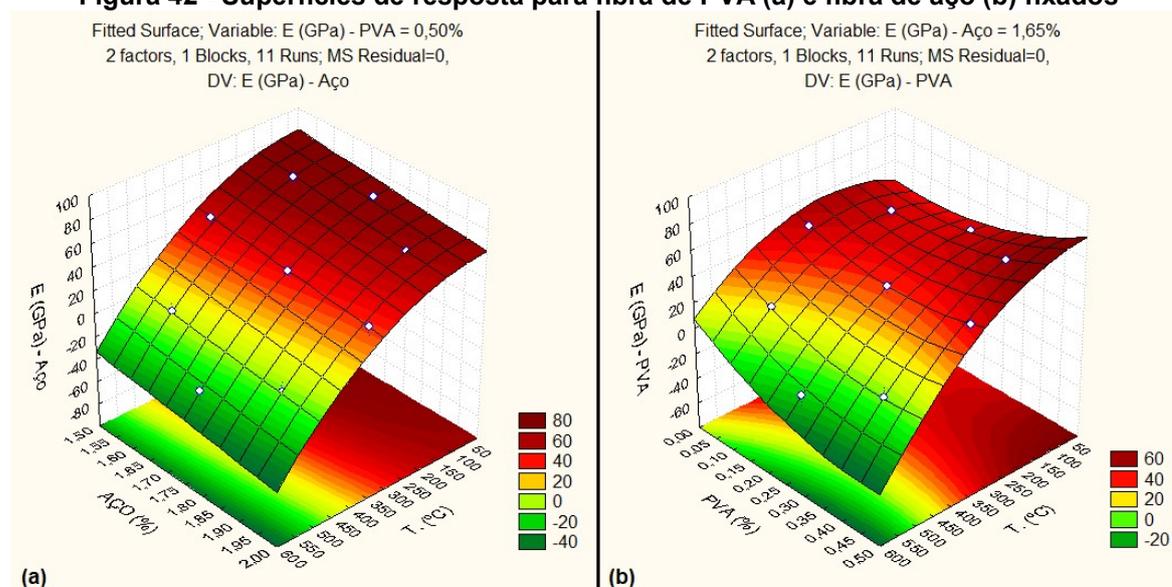


Fonte: Autoria própria

Logo, a análise dessa propriedade mecânica foi realizada por meio de um delineamento fatorial 2^2 , fixando os teores de fibra de PVA em 0,50% e de fibra de aço igual a 1,65%, valores relativos ao ponto de máximo valor encontrado para resistência a compressão, no item anterior. Como o delineamento fatorial 2^2 necessita de apenas duas variáveis e nesse caso há três, foi necessário fixar uma das variáveis em estudo.

Com o intuito de verificar o comportamento do módulo de elasticidade conforme a variação da temperatura, foram criadas duas superfícies de resposta, em que foram fixadas a dosagem de fibra de PVA e a de fibra de aço para, respectivamente a primeira e segunda superfície de resposta apresentadas na Figura 42.

Figura 42 - Superfícies de resposta para fibra de PVA (a) e fibra de aço (b) fixados



Fonte: Autoria própria

As duas superfícies de resposta geradas apresentam um formato parabólico em que o ponto de mínimo para o gráfico da esquerda se localiza fora do intervalo estudado, enquanto para o da direita se localiza quando a temperatura é igual a 140°C e a dosagem de PVA é igual a 0,178%.

Fixando a dosagem de PVA em 0,50%, é possível observar que o módulo de elasticidade do UHPFRC apresenta uma queda conforme há o aumento da dosagem de fibras de aço. Os valores de máximos dentro do intervalo estudado são encontrados quando a dosagem de fibra de aço é mínima

e, portanto, o valor máximo obtido nesse caso ocorre quando a dosagem de fibra de aço é igual a 1,50%.

Observando o gráfico 42(b), ao fixar a dosagem de aço em 1,65%, devido ao seu formato de sela, há duas regiões de máximos valores que ocorrem quando a dosagem de PVA é 0% ou 0,50%, sendo o segundo caso a região com os máximos valores obtidos.

Em ambos os casos, é notável que, conforme ocorre o aumento da temperatura do UHPC, o módulo de elasticidade tende a diminuir, sendo de maior intensidade quando se tem maiores dosagens de fibras.

Entretanto, por conta da falta de dados experimentais para temperaturas acima de 310°C, a queda acentuada do módulo de elasticidade ilustrada nos gráficos da Figura 42(a) e (b), torna-se equívoca quando se observa valores de temperatura mais elevadas, encontrando assim valores abaixo de 0 GPa, o que não condiz com a realidade. Tal fato pode ter ocorrido devido à acentuada queda do módulo para as maiores dosagens de PVA conforme aumenta a temperatura de exposição, fazendo assim com que o modelo tenha previsto valores bem baixos para temperaturas mais elevadas.

Na Tabela 26, é possível observar pelos resultados obtidos por Sanchayan e Foster (2016) e Rasul *et al.* (2020) que houve uma queda do módulo de elasticidade conforme o aumento de temperatura, mas que ainda é possível obter também resultados para temperaturas mais elevadas.

Tabela 26 - Resultados de módulo de elasticidade do estudo de Sanchayan e Foster (2016) e de Rasul *et al.* (2020)

Autor	Fibra de aço	Fibra polimérica	Módulo de elasticidade, em GPa (Temp. de exposição em °C)			
			Temp. ambiente	20°C ~ 200°C	200°C ~ 400°C	400°C ~ 600°C
Sanchayan e Foster (2016)	2.00%	-	46.3	45,92 (200°C)	43,09 (300°C)	-
	1.00%	1,08% (PVA)	42.1	42,27 (200°C)	36,94 (300°C)	6,53 (600°C)
	-	2,23% (PVA)	40.8	37,30 (200°C)	33,64 (300°C)	-
Rasul <i>et al.</i> (2020)	-	0,26% (PP)	47.81	-	45,00 (300°C)	-
	-	0,52% (PP)	47.25	-	43,13 (300°C)	-
	-	0,78% (PP)	43.5	-	43,88 (300°C)	-
	-	1,04% (PP)	46.13	-	39,38 (300°C)	-

Fonte: Autoria própria

4.2. Massa específica, absorção de água e índice de vazios do traço referência e do traço ótimo

A determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios são apresentados na Tabela 27. Foi realizado com base na ABNT NBR 9778:2009, utilizando dois corpos de prova $\phi 75 \times 150$ mm.

Tabela 27 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios dos traços referência e ótimo

Traço	Massa específica seca (kg/m ³)	Massa específica saturada (kg/m ³)	Massa específica real (kg/m ³)	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
Referência	2441,48	2462,09	2492,86	0,84	2,06
Ótimo	2441,19	2460,47	2489,17	0,79	1,93

Fonte: Autoria própria

O traço ótimo apresentou uma massa específica bastante próxima do traço referência, apresentando variações abaixo de 1%. Também é notável a proximidade de valores obtidos para absorção de água e índice de vazios, sendo respectivamente 0,05% e 0,13% menor que o do traço referência.

De acordo com a norma NF P18-470, tanto o traço referência quanto o traço ótimo estão dentro da faixa de massa específica seca especificada (entre 2200 kg/m³ e 2800 kg/m³) e também apresentam um índice de vazios abaixo de 9,0%.

4.3. Análise do comportamento mecânico do traço referência e do traço ótimo

Foram determinadas as características de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por flexão para o traço referência (2,00% de fibra de aço) e para o traço ótimo (1,65% de fibras de aço e 0,50% de fibras de PVA).

4.3.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado com base na norma ABNT NBR 5739. Foi determinado utilizando quatro corpos de prova cilíndricos $\phi 75 \times 150$ com idade de 28 dias e os resultados são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 Resistência à compressão dos traços Referência e Ótimo

Resistência à compressão (MPa)		
CP	Traço referencia	Traço otimo
1	172,96	134,13
2	160,30	153,08
3	156,58	131,93
4	162,13	153,29
Média	162,99	143,11
Desvio padrão	7,04	11,67
Coefficiente de variação (%)	4,32	8,16
Método de Grubbs		
	Traço referencia	Traço otimo
y_{max} (MPa)	172,96	153,29
G_{1,max}	1,417	0,872
y_{min} (MPa)	156,58	131,93
G_{1,min}	0,912	0,958
G_{crítico}	1,481	

Fonte: Autoria própria

Por meio da análise de Grubbs, tanto para o traço referência quanto o traço ótimo não houve a indicação de valor espúrio, visto que os valores G_1 calculados são inferiores ao valor $G_{crítico}$, sendo considerados, portanto, todos os resultados obtidos.

Comparando os valores encontrados, o traço otimizado apresentou uma resistência à compressão abaixo daquela encontrada para o traço referência,

representando uma queda de 12,20%. Somado a isso, apresentou também uma maior variação nos resultados, tendo em vista valores de desvio padrão e coeficiente de variação superiores.

Conforme a norma NF P18-470, o traço referência é classificado como UHPFRC 150/165. No caso do traço ótimo, é classificado como UHPFRC 130/145. Segundo a NF P18-710, para valores de pré projeto, é indicado valores médios de resistência à compressão entre 150MPa e 200MPa. Logo, o traço referência está dentro desse intervalo de valores, podendo ser utilizado para fins estruturais visto que sua resistência alcançada está acima de 150MPa, diferentemente do traço ótimo, que está fora desse intervalo, mas sendo possível a sua utilização para fins não estruturais.

Por meio da Equação (26) que descreve a superfície de resposta da resistência à compressão obtida no item 4.1.2.2.1, a resistência à compressão prevista para o traço referência e para o traço ótimo foi, respectivamente, de 165,88 MPa e 200,38 MPa. Para o primeiro caso, o traço referência obteve valores bem próximos com o esperado, tendo uma diferença de apenas 2,89MPa. Entretanto, para o traço otimizado, apresentou uma elevada diferença, sendo 57,27 MPa abaixo do esperado.

4.3.2. Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado com base na norma ABNT NBR 8522:2017. Foi determinado utilizando quatro corpos de prova cilíndricos $\phi 75 \times 150$ com idade de 28 dias e os resultados são apresentados na Tabela 29.

Segundo o método de Grubbs, não houve indicações de valores espúrios tanto para o traço referência quanto o traço ótimo, pois os valores G_1 calculados são inferiores ao valor $G_{crítico}$, sendo considerados, portanto, todos os resultados obtidos.

De acordo com a norma NF P-18 710, é indicado que o módulo de elasticidade do UHPFRC apresente valores entre 45GPa e 65GPa, intervalo no qual, tanto o traço referência quanto o traço ótimo se enquadram.

Tabela 29 Módulo de elasticidade para Traço Referencia e Ótimo

Módulo de elasticidade (GPa)		
CP	Traço referencia	Traço otimo
1	51,71	43,74
2	52,17	48,53
3	45,70	43,33
4	39,96	47,10
Média	47,39	45,68
Desvio padrão	5,76	2,54
Coeficiente de variação (%)	12,16	5,57
Método de Grubbs		
	Traço referencia	Traço otimo
y_{max} (GPa)	52,17	48,53
G_{1,max}	0,831	1,122
y_{min} (GPa)	39,96	43,33
G_{1,min}	1,289	0,922
G_{crítico}	1,481	

Fonte: Autoria própria

Observando os valores encontrados, o traço ótimo apresentou um módulo de elasticidade próximo ao do traço referência, tendo apenas uma queda de aproximadamente 4%. Além disso, a variação dos resultados foi bem inferior, pois apresentam valores de desvio padrão e coeficiente de variação abaixo da metade de ambos apresentados pelo traço referência.

Através da Equação (27) presente no item 4.1.2.2.2, que descreve a superfície de resposta referente ao módulo de elasticidade, foi previsto que o traço referência e o traço ótimo apresentariam um valor de módulo de, respectivamente, 44,17 GPa e 75,94 GPa. Para o traço referência, foi obtido um valor médio bem próximo do esperado, tendo uma diferença de apenas 3,22 GPa. Entretanto, assim como ocorreu no item anterior, para o traço ótimo, apresentou uma elevada diferença, sendo 30,26 GPa abaixo do esperado.

4.3.3. Resistência à tração por flexão em 4 pontos

Os resultados de limite elástico na flexão $f_{ct,fl}$ e o limite de tensão elástica $f_{ct,el}$ calculados são apresentados na Tabela 30, e por meio da análise de Grubbs, não são apontados valores espúrios para o traço referência. Entretanto, é observado que o coeficiente de variação foi alto (acima de 20%), os valores obtidos estão bem distribuídos visto que foi obtido um valor acima, abaixo e

próximo da média. Com relação ao traço ótimo, também não houve a indicação de valor espúrio, visto que os valores G_1 calculados são inferiores ao valor $G_{crítico}$, além de ter um coeficiente de variação baixo (menor que 10%).

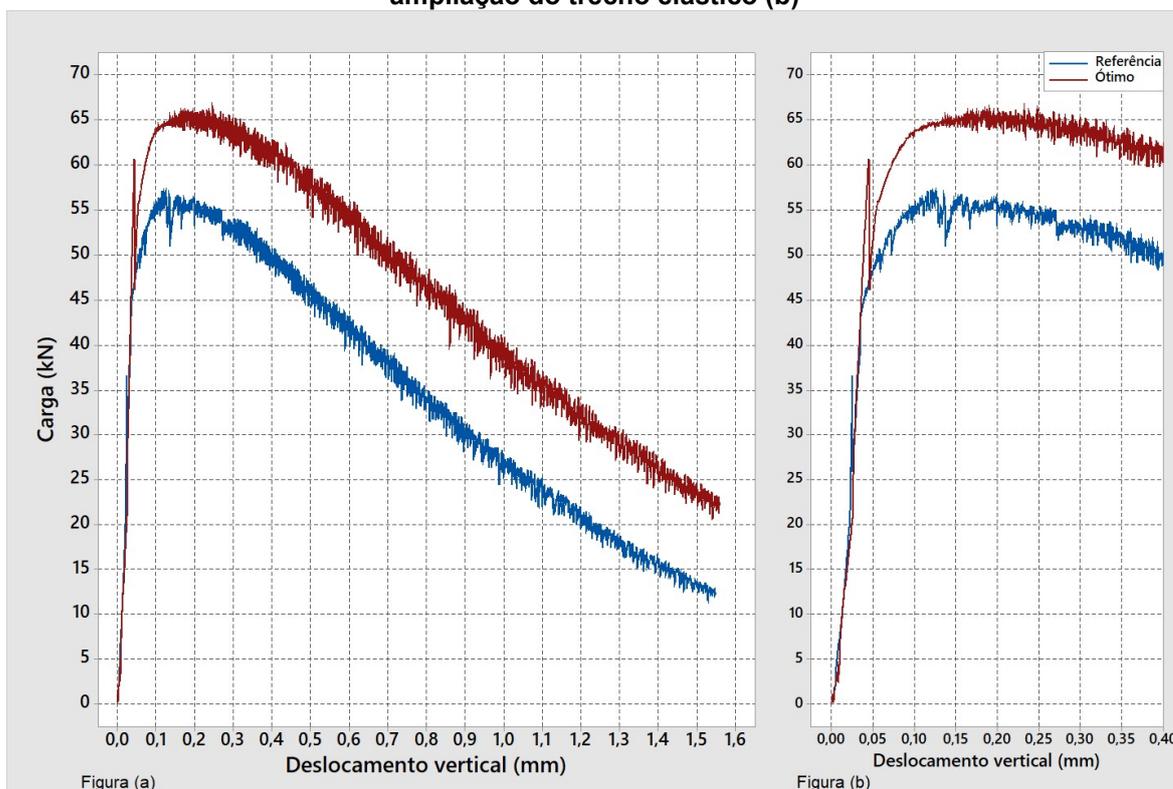
Tabela 30 - Resistência à tração por flexão em 4 pontos para os traços Referencia e Ótimo

Resistência à tração por flexão em 4 pontos(MPa)				
CP	Traço referencia		Traço otimo	
	$f_{ct,fl}$	$f_{ct,el}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ct,el}$
1	13,40	8,96	16,03	10,70
2	9,78	6,55	19,43	13,02
3	15,07	10,07	18,05	12,05
Média	12,75	8,52	17,84	11,92
Desvio padrão	2,71	1,80	1,71	1,16
Coeficiente de variação (%)	21,24	21,12	9,60	9,77
Método de Grubbs				
	Traço referencia		Traço otimo	
	$f_{ct,fl}$	$f_{ct,el}$	$f_{ct,fl}$	$f_{ct,el}$
y_{max} (MPa)	15,07	10,07	19,43	13,02
$G_{1,max}$	0,858	0,858	0,932	0,941
y_{min} (MPa)	9,78	6,55	16,03	10,70
$G_{1,min}$	1,098	1,098	1,057	1,050
$G_{crítico}$	1,154			

Fonte: Autoria própria

No gráfico da Figura 43 são apresentadas as curvas médias obtidas de cada traço (43 a), com um detalhe ampliado para o trecho elástico (43 b).

Figura 43 - Curvas médias do ensaio de resistência à tração por flexão em 4 pontos (a) e ampliação do trecho elástico (b)

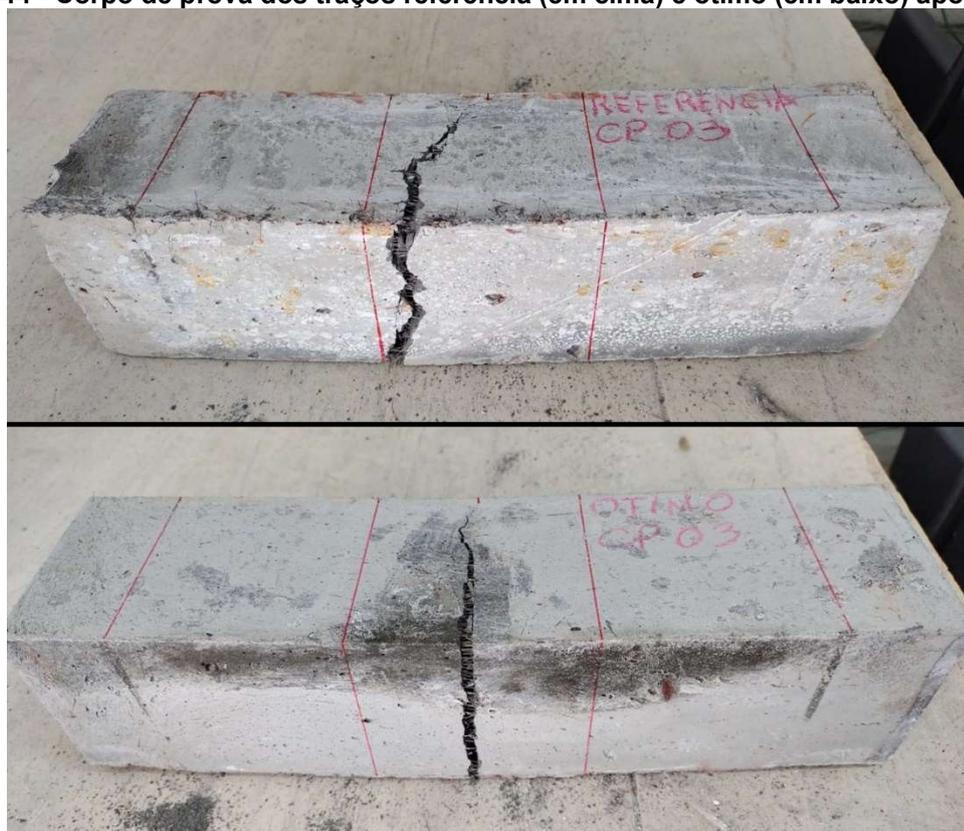


Fonte: Autoria própria

Segundo a norma NF P18-470, o UHPFRC precisa ter um valor de $f_{ct,el}$ médio ($f_{ctm,el}$) igual ou superior a 6,0 MPa. Tanto o traço referência quanto o traço ótimo atendem a esse requisito, sendo o traço ótimo aquele que apresentou o melhor desempenho durante todo o ensaio. Comparando os valores, o traço ótimo apresentou 39,9% de resistência à tração no limite elástico maior.

A curva do traço ótimo apresentou um desempenho superior ao traço referência, resistindo a cargas mais elevadas durante todo o ensaio, ao mesmo tempo em que tem um comportamento semelhante ao do traço referência. Isso mostra que a fibra de PVA forneceu uma contribuição positiva para o reforço do UHPFRC durante todo o ensaio. Somado a isso, tanto o traço referência quanto o ótimo apresentaram um comportamento hardening, tendo em vista que ambos os traços conseguiram resistir a cargas acima do limite de elasticidade após a fissuração. Entretanto, os corpos de prova não apresentaram fissuras menores ao longo da face tracionada antes da aparição da fissura principal (Figura 44), característica essa marcante em um comportamento hardening.

Figura 44 - Corpo de prova dos traços referência (em cima) e ótimo (em baixo) após ensaio



Fonte: Autoria própria

Após atingir o limite de elasticidade, o traço ótimo apresentou uma queda de carga resistente maior que o do traço referência. Isso pode ter ocorrido pela diferença da quantidade de fibras de aço presente em cada traço, uma vez que as fibras de aço conseguem atuar mais rapidamente assim que ocorre a fissuração do que as fibras poliméricas.

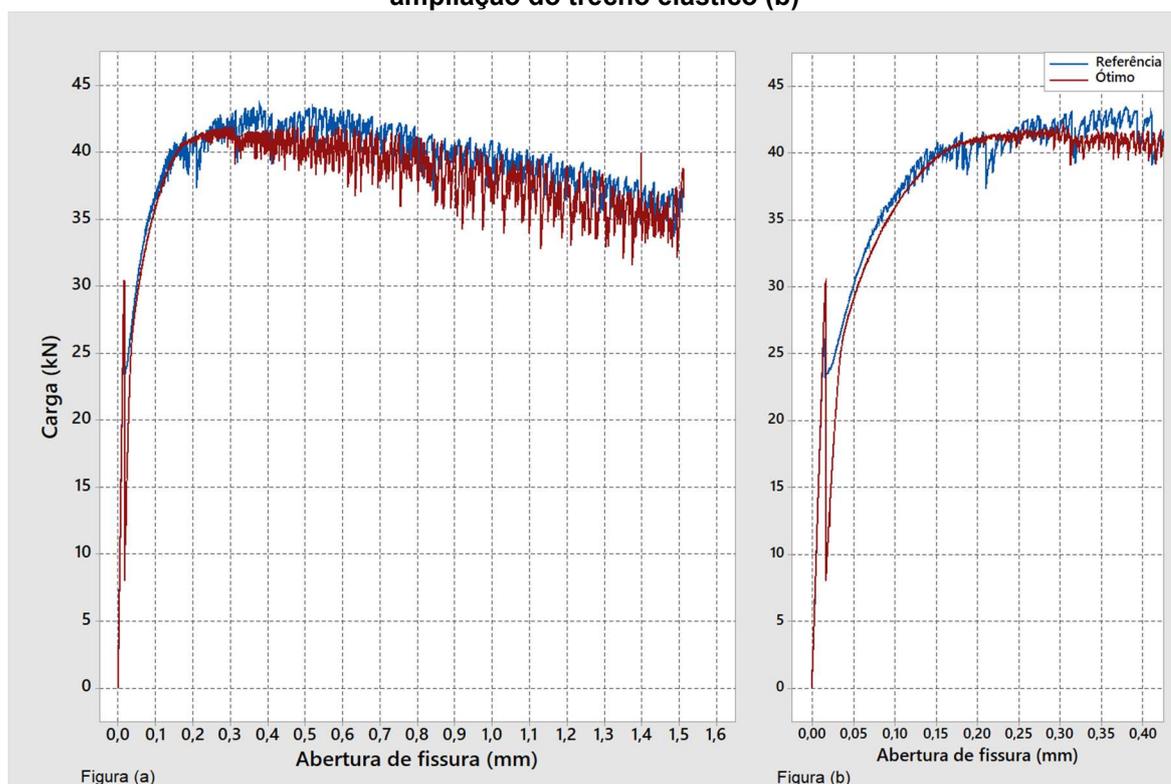
Ambos os traços apresentaram uma oscilação nos valores, durante o ensaio dos dois traços, nos momentos em que foram registrados os menores valores dessa oscilação ocorria um leve som semelhante a um estalo, podendo ser um indicativo da ocorrência do surgimento de microfissuras em torno das fibras. Com isso, causaria uma diminuição da aderência entre a fibra e a matriz, resultando assim em uma diminuição da resistência da fibra aos esforços aplicados, gerando, portanto, oscilação nos valores apresentados.

4.3.4. Resistência à tração por flexão em 3 pontos

A Figura 45 apresenta o gráfico contendo as curvas médias dos traços referência e ótimo, enquanto a Tabela 31 e a Figura 46 apresentam,

respectivamente, os valores de resistência obtidos para cada corpo de prova e o gráfico de tensão X abertura de fissura determinada pelo processo iterativo.

Figura 45 - Curvas médias do ensaio de resistência à tração por flexão em 3 pontos (a) e ampliação do trecho elástico (b)



Fonte: Autoria própria

Assim como no ensaio de flexão em 4 pontos, houve também a mesma ocorrência de oscilações nos valores durante o ensaio dos dois traços, ouvindo-se os mesmos sons semelhante a um estalo nos momentos em que foram registrados os menores valores dessa oscilação. Isso reforça a ideia da perda de aderência entre as fibras e a matriz devido à formação de microfissuras conforme o aumento da abertura da fissura.

É possível observar na Figura 45 que ambas as curvas obtiveram um comportamento bastante semelhante, tendo apenas uma notável diferença no momento em que atingem o limite de elasticidade, onde o traço ótimo mostra ter uma queda bem acentuada do valor da carga resistente. Tal semelhança no comportamento das curvas também é visto na Figura 42, sendo que o traço referência apresentou uma resistência à tração de elasticidade de 10,75 MPa, enquanto o traço ótimo, de 12,18 MPa.

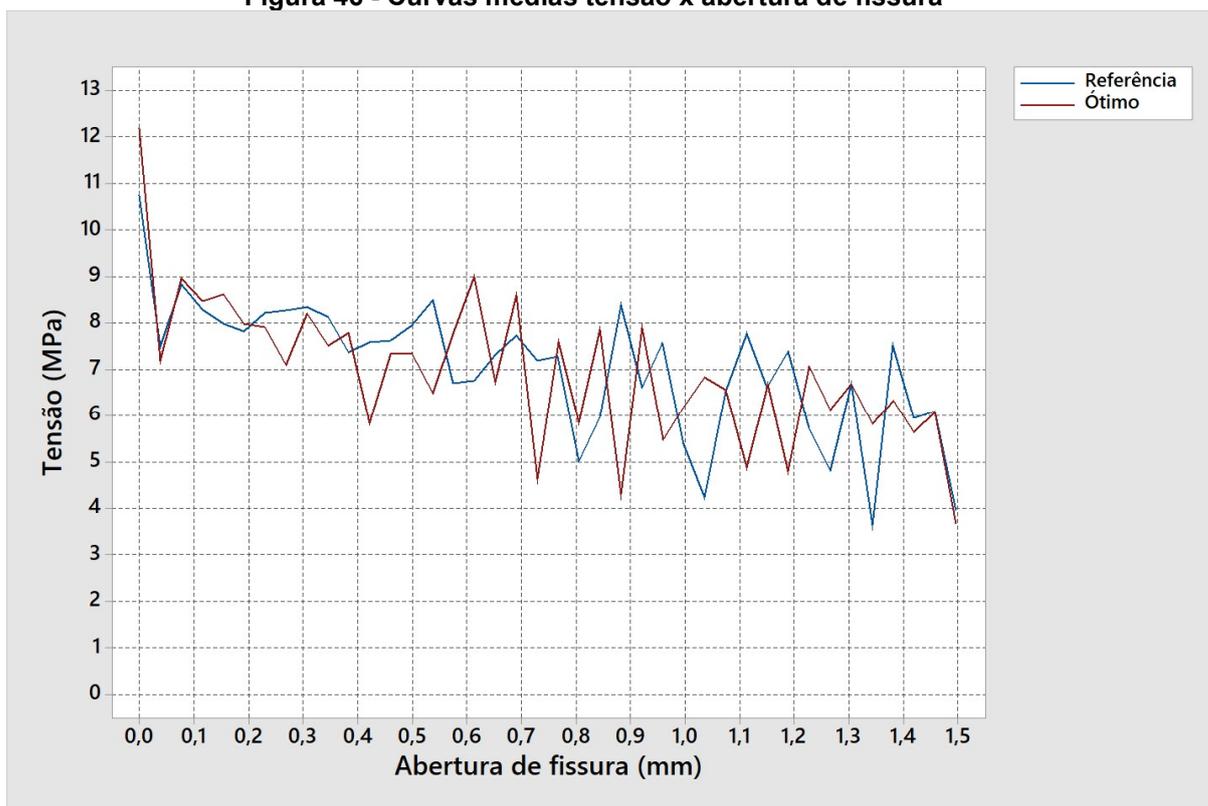
Observando a Figura 46 e a Tabela 31, o valor médio de $f_{ct,f}$ calculado na tabela é diferente do ponto de máximo encontrado no gráfico das curvas médias, pois os valores de f_{ctf} encontrados nos corpos de prova individuais se encontram em diferentes aberturas de fissuras. Ao determinar os pontos médios ao longo da abertura de fissura, gerou um novo valor de $f_{ct,f}$ que não coincide com os valor médio da curva média, sendo esses 8,49 MPa para o traço referência e 8,99 MPa para o traço ótimo. Em ambos os casos, os dois traços apresentaram uma resistência de pós fissuração que atende ao intervalo entre 7,0 e 12,0 MPa indicado pela NF P18-710.

Tabela 31 - Resistência à tração por flexão em 3 pontos				
Resistência à tração por flexão em 3 pontos(MPa)				
CP	Traço referencia		Traço otimo	
	$f_{ct,el}$	$f_{ct,f}$	$f_{ct,el}$	$f_{ct,f}$
1	11,25	11,24	12,72	11,44
2	10,33	8,81	11,98	7,74
3	10,66	9,95	11,84	12,51
Média	10,75	10,00	12,18	10,56
Desvio padrão	0,47	1,22	0,47	2,51
Coeficiente de variação (%)	4,35	12,17	3,88	23,72
Método de Grubbs				
	Traço referencia		Traço otimo	
	$f_{ct,el}$	$f_{ct,f}$	$f_{ct,el}$	$f_{ct,f}$
y_{max} (MPa)	11,25	11,24	12,72	12,51
G_{1,max}	1,081	1,020	1,141	0,778
y_{min} (MPa)	10,33	8,81	11,84	7,74
G_{1,min}	0,893	0,979	0,722	1,128
G_{crítico}	1,154			

Fonte: Autoria própria

Apesar da Figura 45 mostrar que, após o fim da linearidade da curva, a carga resistida está acima do valor de carga do limite da elasticidade, os valores de tensão apresentados na Figura 46 mostram estar abaixo da tensão obtida nesse mesmo limite, apresentando, portanto, um comportamento softening. Tal comportamento é reforçado tendo em vista os corpos de prova sem entalhe do ensaio de flexão em 4 pontos não apresentaram aparição de fissuras menores, como foi comentado no item anterior.

Figura 46 - Curvas médias tensão x abertura de fissura



Fonte: Autoria própria

Para verificar se os traços apresentam um comportamento hardening sobre flexão, foi realizado a inequação apresentada pela Equação (4), o valor de w_{lim} que delimita a integral segundo a NF P18-710 foi determinado sendo o valor da abertura de fissura igual a 0,30 mm. Os resultados presentes na Tabela 32 mostram que, tanto o traço referência quanto o traço ótimo atendem aos limites propostos pela norma.

Tabela 32 - Determinação do comportamento hardening sobre flexão

Traço	Equação (4) (MPa)	Limite
Referência	7,47	$\geq \max(0,4f_{ctm,el} = 4,30 \text{ MPa}; 3,0\text{MPa})$
Ótimo	7,42	$\geq \max(0,4f_{ctm,el} = 4,87 \text{ MPa}; 3,0\text{MPa})$

Fonte: Autoria própria

Com base na NF P18-470, tanto o traço referência quanto o traço ótimo são classificados como T2, tendo em vista o comportamento hardening apresentado pelo ensaio e o comportamento softening apresentado pela análise inversa.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou o comportamento mecânico do UHPFRC produzidos com fibras de aço e de PVA frente a temperaturas elevadas, sendo realizado em duas etapas, a primeira etapa voltada para o estudo do comportamento mecânico do UHPFRC submetido a diferentes temperaturas, por meio da análise de superfície de resposta, e a segunda, voltada para o estudo mecânico de dois traços de UHPFRC, comparando um traço com fibras de aço e PVA definido na primeira etapa com um traço referência que apresenta somente fibras de aço.

Com relação à trabalhabilidade do UHPFRC em seu estado fresco, grandes dosagens de fibras de PVA diminuem a fluidez do material, sendo preciso acrescentar maiores quantidades de aditivos que podem prejudicar em seu comportamento mecânico e durabilidade devido ao aumento de ar incorporado durante a mistura dos materiais.

Com relação ao índice de vazios e absorção de água, todos os traços produzidos durante a etapa 1 apresentaram valores bastante baixos, menores que 6,0% e 3,0%, respectivamente. Isso mostra que tanto o tipo de fibra quanto diferentes dosagens de fibras utilizados não interferem nessas propriedades. Portanto, é possível manter uma maior durabilidade contra a penetração de agentes agressivos independente do tipo e teor de fibras presente no UHPFRC.

O uso de fibras de PVA nos traços de UHPC tiveram efeito contra temperaturas até 300°C e, a partir dessa temperatura em diante, começou a ocorrer deslocamento, causando desde pequenas fissuras até a degradação total do compósito. Portanto, somente a adição de fibras de PVA nas dosagens aplicadas não foram suficientes para proteger o UHPC contra situações de elevadas temperaturas.

Através das superfícies de resposta de resistência à compressão e módulo de elasticidade, o UHPFRC tem uma redução em ambos os casos frente ao aumento da temperatura. Com a utilização das fibras de PVA, essa tendência é mais acentuada, devido ao fato de que, após atingir sua temperatura de fusão, começa a deteriorar, deixando assim de contribuir com essas duas propriedades.

Levando em consideração a etapa 1, o traço que apresentou os melhores resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade foi aquele com dosagem de 1,65% de fibra de aço e 0,50% de fibras de PVA.

Com relação a resistência à compressão, enquanto o traço referência se classifica como UHPFRC 150/165 o traço ótimo se classifica, segundo a NF P18-470, como UHPFRC 130/145 pois, o traço ótimo apresentou uma queda de 12,20% de sua resistência em comparação ao referência. O traço ótimo, por apresentar resistência a compressão inferior a 150MPa, não é considerado para uso estrutural.

No caso do módulo de elasticidade, não houve uma grande diferença entre os dois traços, sendo que ambos apresentam valores acima de 45 GPa, valor mínimo indicado pela NF P18-710 que um UHPFRC precisa apresentar.

Apesar do traço referência ter obtido uma resistência à compressão e módulo de elasticidade bastante próxima ao valor estimado pela superfície de resposta, o traço ótimo apresentou valores bem distantes. Isso mostra que a superfície de resposta não está muito adequada, pois algumas combinações do delineamento fatorial 2^3 realizado tiveram que ser estimados, podendo isso ter sido a causa dessa imprecisão.

Observando os resultados de resistência à tração por flexão em quatro pontos, o traço ótimo apresentou um desempenho bastante superior em relação ao traço referência, apresentando um limite de elasticidade 40% maior. A utilização das fibras de PVA mostraram ser benéficas quanto ao reforço do UHPFRC durante todo o ensaio, pois os dois traços apresentaram uma curva com o mesmo comportamento, sendo que o traço ótimo obteve valores de carga resistente superiores.

Através do ensaio de flexão em 3 pontos, é possível analisar a contribuição das fibras como reforço na seção fissurada. Nesse caso, o traço ótimo apresentou um comportamento bastante semelhante do traço referência, ambos atendendo as especificações da norma e apresentando um comportamento hardening limitado.

5.1. Sugestão de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros verifica-se a necessidade de estudar outros mecanismos de proteção contra incêndio para estruturas de UHPFRC, visto que o spalling é um dos maiores problemas quando se trata de um concreto com elevada resistência, já que sua ocorrência pode degradar totalmente o compósito

O comportamento térmico do UHPFRC é um assunto importante a ser estudado, a fim de analisar a dilatação térmica, as tensões internas geradas conforme o aumento da temperatura e a influência das fibras durante esse processo e também estabelecer correlações das propriedades mecânicas em função da temperatura para esse tipo de material.

A realização de um novo delineamento experimental utilizando todos os pontos experimentais e com mais corpos de prova seria bastante interessante, com o intuito de verificar o comportamento do UHPC com melhor precisão, podendo ser levado em consideração outras informações, como por exemplo, a trabalhabilidade no estado fresco, para a decisão de um novo traço ótimo.

Outro assunto não abordado nesse trabalho é a análise da durabilidade do UHPFRC com uso de fibras poliméricas e de aço diante agentes agressivos como a permeabilidade ao gás e penetração de íons cloro, verificando a influência da fibra na vida útil do compósito.

6. REFERÊNCIAS

AFNOR - Association Française de Normalisation. **NF P18-470, 2016 Concrete - Ultra-high performance fibre-reinforced concrete – Specifications, performance, production and conformity**, p. 94, 2016a.

AFNOR - Association Française de Normalisation. **NF P18-710, 2016 Edition. National addition to Eurocode 2 - Design of concrete structures: Specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC)**, p. 136, 2016b.

ALEXANDER, M.; BENTUR, A; MINDESS, S. **Durability of Concrete: Design and Construction**. Nova Iorque: Crc Press, 2017. (Modern concrete technology series).

ALMEIDA, A. F. D. **Formulação e análise de desempenho de UHPC reforçado com fibras não metálicas**. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Urbana, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2015.

ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; MICAH HALE, W. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 135–145, fev. 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.040>

ANDRADE, R. S.; GODINHO, D. S. S. **Dimensionamento comparativo de um edifício em concreto armado: ações normais x situação de incêndio**. 2014. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.

ARORA, A. et al. Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC). **Cement And Concrete Research**, [s. l], v. 103, p. 179-190, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.013>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estático à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16940: Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASTM International. **ASTM C1609/C1609M: Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).** American Society for Testing and Materials, 2012, West Conshohocken.

ASTM International. **ASTM C1856/C1856M: Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete.** American Society for Testing and Materials, 2017, West Conshohocken.

BANERJI, S.; KODUR, V.; SOLHMIRZAEI, R. Experimental behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams under fire conditions. **Engineering Structures.** Michigan, p. 1-12. nov. 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110316>.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: design, innovation and discovery.** 2. ed. Nova Jersey: Wiley-Interscience, 2005. 655 p.

BRAZ, M. C. A.; NACIMENTO, F. B. C. Concreto reforçado com fibras de aço. **Caderno de graduação - Ciências exatas e tecnológicas**, v. 3, p. 43–56, nov. 2015.

BREITKREITZ, M. C.; SOUZA, A. M. DE; POPPI, R. J. A didactic chemometrics experiment for design of experiments (DOE): evaluation of experimental conditions in the spectrophotometric determination of Iron II with o-phenanthroline. A tutorial, part III. **Química Nova**, v. 37, n. 3, p. 539–547, 2014. doi: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140092>.

BRITEZ, C.; CARVALHO, M.; HELENE, P. Ações e efeitos deletérios do fogo em estruturas de concreto. Uma breve revisão. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 1, p. 1–21, 30 dez. 2019. doi: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i1.421>.

BUCHMAN, I.; BADEA, C. The Characteristics of Ultra High Performance Concrete. In: WSEAS International Conference on Sustainability in Science Engineering, 11. 2015, Romania. **Proceeding** [...]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265677212_The_Characteristics_of_Ultra_High_Performance_Concrete>. Acesso em: 17 mar. 2020.

BUITELAAR, P. Fibres in ultra-high-performance concrete. **Concrete**, [s. l], v. 54, n. 3, p. 32-34, abr. 2020.

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 957–971, ago. 2017.

CAMARGO, L. F.; MOREIRA, V.; VACCARO, G. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de novos produtos em uma empresa de saneantes. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 5, n. 3, p. 404–420, 2010. doi: <https://doi.org/10.4013/ete.2009.53.11>.

CAMPOS, R. S. **Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas**. 2017. 209p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas-SP.

CARATIN, R. L. **Desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia com reforços contínuos de fibras de carbono e fibras de vidro**. 2014. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18–32, mar. 2009. doi: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>.

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

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. 2019. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29357.44002>.

CHRIST, R. et al. Estudio del comportamiento mecánico del hormigón de ultra-altas prestaciones (UHPC) reforzado con fibras híbridas y con consumo reducido de cemento. **Revista ingeniería de construcción**, v. 34, n. 2, p. 159–168, 2019b.

COSTA, A. C. S. S.; CABRAL, A. E. B. Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical. **Ambiente**

Construído, v. 19, n. 4, p. 289–301, dez. 2019. doi: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000400356>.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. doi:10.11606/T.3.2008.tde-04092008-155911.

CUNHA, V. M. C. F.; AL-RIKABI, T.; BARROS, J. A. O. Betão de alta resistência reforçado com fibras exposto a elevadas temperaturas. In: HAC2018 | V Congresso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales. 2018, Valência. **Anais** [...]. Valência: Editorial Universitat Politècnica de València, 2018. p. 455–464. doi: <https://doi.org/10.4995/hac2018.2018.5464>.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes**: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2013.

DEVORE, J. L. Multifactor Analysis of Variance. In: DEVORE, Jay L. **Probability & Statistics for Engineering and the sciences**. 8. ed. São Luis, California: Books/Cole, 2012. Cap. 11. p. 419-465.

DINGQIANG, F. et al. A novel approach for developing a green Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with advanced particles packing meso-structure. *Construction and Building Materials*, v. 265, p. 120339, dez. 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120339>.

DOIRON, G. Pier Repair/Retrofit Using UHPC—Examples of Completed Projects in North America. In: International Symposium on Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete, 2017, Montpellier. **Anais** [...]. Paris: RILEM Publications S.A.R.L, 2017. p. 983-992. doi: <https://doi.org/10.21838/uhpc.2016.99>.

DONG, Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 414–425, abr. 2018.

DUCTAL (org.). **Montpellier TGV Railway Station**. Disponível em: <https://www.ductal.com/en/montpellier-tgv-railway-station>. Acesso em: 23 mar. 2022.

EIDE, M. B.; HISDAL, J. **Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRC) – State of the art**. 44. ed. [S.l]: Sintef Building And Infrastructure, 2012. 67 f.

ELIAS, D. H. **Aplicações de planejamento de experimento para dados não normais**. 2014. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Instituto de Matemática Departamento de Métodos Estatísticos, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

ELLISON, S. L. R.; BARWICK, V. J.; FARRANT, T. J. D. Practical Statistics for the Analytical Scientist. In: **RSCPublishing**. 2nd. ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2009. p. 48–58. doi: <https://doi.org/10.1039/9781847559555>.

FARIAS, L. A. et al. Ensaio de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto. [s.l.: s.n.]. 2008. Disponível em: <<https://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081127104112-209.pdf>>. Acesso em: 3 fev. 2022.

FEHLING, E.; BUNJE, K.; SCHMIDT, M. Gärtnerplatz - Bridge over River Fulda in Kassel: Multispan Hybrid UHPC-Steel Bridge. In: **Designing and Building with UHPFRC**. Hoboken, NJ USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013. p. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118557839.ch10>.

FIGUEIREDO, A. D. Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 56., 2014, Natal, Rn. **Anais** [...]. Natal, Rn: Ibracon, 2014. 19 p.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre Docência em Materiais e Componentes de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/T.3.2012.tde-18052012-112833. Acesso em: 2022-03-23.

FONTES, M. M. **Otimização da síntese de biodiesel a partir do óleo das sementes de algodoeiro**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 2012.

FREITAS, M. F. M. **Desenvolvimento de processo para alinhamento magnético de fibras curtas de sisal em matriz cimentícia e influência no comportamento mecânico**. 2020. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, SP, 2020.

GANASINI, D. **Concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas**. 2019. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, 2019.

GANESH, P.; MURTHY, A. R. Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 197, 2018.

GOES, C. M. W. DE et al. Revisão sobre empacotamento de partículas e os materiais utilizados no desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 62., 2020, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. Florianópolis, SC: Ibracon, 2020. 16 p.

HABER, Z. B. et al. **Properties and Behavior of UHPC-Class Materials**. FHWA-HRT-18-036. McLean: US Department of transportation, mar. 2018. 153f.

HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of Reactive Powder Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 271–288, jun. 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.009>.

IFFAT, S.; BOSE, B. A review on concrete structures in fire. **International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering**, v. 10, n. 2, p. 109–114, 2016.

IMIRANTE. **Incêndio consome casebres debaixo da Ponte do São Francisco, em São Luís**. Disponível em: <https://imirante.com/sao-luis/noticias/2021/11/05/incendio-consome-casebres-debaixo-da-ponte-do-sao-francisco-em-sao-luis.shtml>>. Acesso em: 8 fev. 2022.

IMPARCIAL. **Incêndio atinge casebres debaixo da Ponte José Sarney**. Disponível em: <https://oimparcial.com.br/cidades/2021/11/incendio-atinge-casebres-debaixo-da-ponte-jose-sarney/>>. Acesso em: 24 mar. 2022.

KARDEC, T. I. S. et al. Dosagem experimental de concreto de pós-reativos utilizando diferentes métodos de empacotamento de partículas. **Perquirere**, September, p. 1-20, 2018.

LI, Y. et al. Effect of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on explosive spalling and pore pressure in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, n. February, p. 62–71, maio 2019.

LIANG, X. **Experimental Study of UHPC with High Fire Resistance and Meso-Scale Modelling**. 219 f. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia civil e ambiental, Universidade de Tecnologia de Sidney, Sidney, 2018.

LIANG, X. et al. Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 400–412, ago. 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.241>.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 257 f. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 25, n. 1, 2020. doi: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0874>.

MAILONLINE, D. A. F. **Historic bridge over Tiber River in Rome is damaged by fire that started in homeless camp “after cooking gas canister exploded.”**. Disponível em: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-10054207/Blaze-damages-historic-bridge-spanning-Tiber-River-Rome.html>>. Acesso em: 17 mar. 2022.

MANOJ; KUMAR, S.; SANTHOSH. Behaviour of mechanical properties of ultra-high performance concrete with steel fibres and mineral admixtures. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 05, n. 09, p. 299–305, 25 set. 2016.

MARCONCINI, J. M.; OLIVEIRA, R. M. **Termogravimetria de Cascas de Arroz**. Embrapa - Comunicado Técnico. São Carlos - SP. Embrapa, , 2007. Disponível em:
<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/29537/1/CT892007.pdf>>.

MAYHOUB, O. A. et al. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 145–158, mar. 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.016>.

MENDONÇA, H. T. T. Edificações civis em situação de incêndio: estudo de caso da boate Kiss e do edifício Joelma. 2014. 75 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Formiga, Formiga, MG, 2014.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. Effect of Hybrid Fibers on Fresh Properties, Mechanical Properties, and Autogenous Shrinkage of Cost-Effective UHPC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 4, p. 04018030, abr. 2018. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002212](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002212).

MIMRAM, M. et al. Roofing of Montpellier-south of France TVG station. **AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete**, n. 1, p. 837–856, 2017.

MISSEMER, L. et al. Fire spalling of ultra-high performance concrete: From a global analysis to microstructure investigations. **Cement and Concrete Research**, v. 115, n. October 2018, p. 207–219, jan. 2019.

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

NILSSON, L. **Development of UHPC concrete using mostly locally available raw materials**. 2018. 78 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Tecnologia de Lulea, Suécia, 2018.

NITA, C.; JOHN, V. M. Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento**, p. 13, 2007.

NOTÍCIAS AO MINUTO. **Incêndio de grandes dimensões atinge ponte histórica em Roma**. Disponível em:
<<https://www.noticiasao minuto.com/mundo/1844515/incendio-de-grandes-dimensoes-atingiu-a-ponte-de-ferro-de-roma>>. Acesso em 14 mar. 2022.

OLIVEIRA, C. O. E. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 23, n. 1, 5 mar. 2018. doi: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0298>.

OLIVEIRA, C. R. DE; JÚNIOR, A. L. M. Efeito do fogo nas estruturas de concreto reforçadas com FRP. In Congresso Brasileiro do Concreto, 51, 2009, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, Rn:IBRACON, 2009. 14 p.

ORDOÑEZ, M. F. C. **Efeito Do Empacotamento De Partículas Nas Propriedades Mecânicas E Tribológicas De Misturas De Argila-Rocha**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

OZAWA, M. et al. Preventive effects of polypropylene and jute fibers on spalling of UHPC at high temperatures in combination with waste porous ceramic fine aggregate as an internal curing material. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 219–225, maio 2019.

PARK, J. J. et al. Benefits of synthetic fibers on the residual mechanical performance of UHPFRC after exposure to ISO standard fire. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, n. March, p. 103401, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103401>.

PERRY, V. H. **UHPC Advancements & Industrialization - The NEED for Standard Testing**. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/340443132_UHPC_Advancements_Industrialization_-The_NEED_for_Standard_Testing>.

PIERRE, V.; HABEL, K. Standardization of ultra-high performance concrete – the canadian perspective. In: International Symposium on Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete, 2017, Montpellier. **Anais [...]**. Paris: RILEM Publications S.A.R.L, 2017. p. 555-564.

PORTAL INCÊNDIO. **Estatísticas de Incêndios ocorridos 1o Semestre de 2021**. Disponível em: <<https://portalincendio.com.br/estatisticas-de-incendios-ocorridos-1%C2%BA-semester-de-2021-noticias>>. Acesso em: 25 jan. 2022.

RASUL, M. et al. Evaluation of the Effect of Exposure Duration and Fiber Content on the Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced UHPC Exposed to Sustained Elevated Temperature. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 48, n. 6, p. 20180687, 1 nov. 2020. doi: <https://doi.org/10.1520/JTE20180687>.

REGINATO, L. A. **Emprego do modelo teórico de empacotamento de partículas para dosagens de concreto de pós reativos e análise das propriedades mecânicas**. 2011. 131 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Oeste de Santa Catarina, Santa Catarina, 2011.

RUSSEL, G, H.; GRAYBEAL, B. A. **Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community**. FHWA-HRT-13-060. McLean: US Department of transportation, jun. 2013. 171 f.

SANCHAYAN, S.; FOSTER, S. J. High temperature behaviour of hybrid steel–PVA fibre reinforced reactive powder concrete. **Materials and Structures**, v. 49, n. 3, p. 769–782, 30 mar. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-015-0537-2>.

SANJUÁN, M. Á.; ANDRADE, C. Reactive Powder Concrete: Durability and Applications. **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5629, 18 jun. 2021. . doi: <https://doi.org/10.3390/app11125629>.

SANTOS, R. L. B. **Análise de dados e superfície de resposta: um estudo de caso para melhorar o desempenho de um serviço**. 2017. 62 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

SEIBERT, P. J.; PERRY, V. H.; CORVEZ, D. Performance Evaluation of Field Cast UHPC Connections for Precast Bridge Elements. In: International Accelerated Bridge Construction Conference, 2019, Miami, FL. **Anais [...]**. 2017, p. 1–9.

SHARMA, A.; RAY, S.; IQBAL, MOHD. A. **Fracture behaviour of ultra-high performance concrete**. Proceedings of the 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Anais...FraMCoS-X, 19 jun. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.21012/FC10.235532>.

SIDODIKROMO, E. P.; CHEN, Z.; HABIB, M. Review of The Cement-Based Composite Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). **The Open Civil Engineering Journal**, v. 13, n. 1, p. 147–162, 16 nov. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.2174/1874149501913010147>.

SOHAIL, M. G. et al. Advancements in Concrete Mix Designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from 1970 to 2016. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 3, p. 1-20, mar. 2018. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002144](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002144).

ŠPAK, M. et al. Comparison of Conventional and Advanced Concrete Technologies in terms of Construction Efficiency. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, p. 1–6, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1903729>.

STENGEL, T.; SCHIEBL, P. Life cycle assessment of UHPC bridge constructions: Sherbrooke footbridge, Kassel Gartnerplatz footbridge and Wapello road bridge. **Architecture Civil Engineering Environment**, v. 1, p. 109–118, 2009.

TEODOSIO, J. R. **Estudo E Otimização Do Processo De Tratamento De Efluentes Líquidos Contendo Hidroquinona Por Processo Oxidativo Avançado Com Peróxido De Hidrogênio**. 2015. 110 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

TEÓFILO, R. F.; FERREIRA, M. M. C. Chemometrics II: Spreadsheets for experimental design calculations, A tutorial. **Química Nova**, v. 29, n. 2, p. 338–350, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422006000200026>.

THOMAS, R. J.; SORENSEN, A. D. Review of strain rate effects for UHPC in tension. *Construction and Building Materials*, v. 153, p. 846–856, out. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.168>.

TOUTLEMONDE, F. et al. **Twenty years-long French experience in UHPFRC application and paths opened from the completion of the standards for UHPFRC**. The 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures (UHPC2018-China), Nov 2018, FUZHOU, China. 24 p., bibliogr. hal-01955204.

VIGNESHWARI, M.; ARUNACHALAM, K.; ANGAYARKANNI, A. Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 264–277, jul. 2018.

WANG, X. et al. Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density. **Cement and Concrete Research**, v. 126, p. 105921, dez. 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105921>.

WEINSTEIN, J. **Incêndio em Big Sur queima até a icônica Bixby ponte**. Disponível em: <<https://bdci.tv/incendio-em-big-sur-queima-ate-a-iconica-bixby-ponte/>>. Acesso em: 9 fev. 2022.

WU, H.; LIN, X.; ZHOU, A. A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 135, p. 106117, set. 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106117>.

YOO, D. Y.; BANTHIA, N.; YOON, Y. S. Impact resistance of reinforced ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. **ACI Structural Journal**, v. 114, n. 1, p. 113–124, 2017. doi: <https://doi.org/10.14359/51689430>.

YOO, D. Y. et al. Residual performance of HPFRCC exposed to fire – Effects of matrix strength, synthetic fiber, and fire duration. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 118038, abr. 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118038>.

ZEIML, M. et al. How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 5, p. 929–942, 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.018>.

ZHANG, P. et al. Fiber-Reinforced Concrete with Application in Civil Engineering *Advances in Civil Engineering Hindawi*, 5 set. 2018. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/1698905>.

ZHU, Y. et al. A review: Material and structural properties of UHPC at elevated temperatures or fire conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 123, n. July, p. 104212, out. 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104212>.

ANEXO A – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS E MASSA ESPECÍFICA DA SÍLICA ATIVA

Para a realização da termogravimetria, no laboratório de análise instrumental da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, utilizou-se uma termobalança NETZSCH Thermische Analyse TG 209 cell, contendo uma micro balança eletrônica, um forno com temperatura controlada e um computador que registra os dados coletados, ilustrado na Figura 47.

Foram utilizadas duas amostras de sílica ativa dispersas em água, com um teor de sólidos de 50%, ou seja, metade da massa da amostra consiste em sílica ativa e a outra metade em água. A temperatura inicial de ensaio definida foi de 25°C, com uma elevação de temperatura constante de 15°C/min, sendo finalizado quando atingisse 130°C.

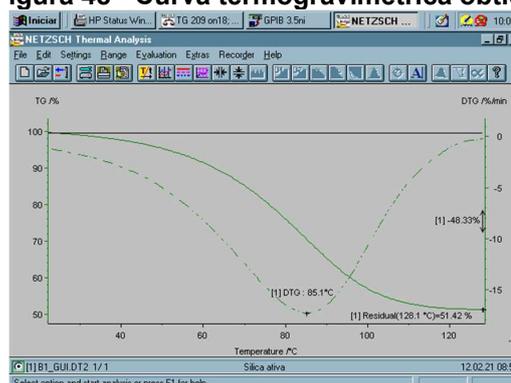
Na Tabela 33 são apresentadas as variações de massa e o cálculo da massa específica para duas amostras de sílica ativa que apresentaram massa específica média de 2,11 g/cm³, a curva termogravimétrica é apresentada na Figura 48. Para os cálculos dos volumes da amostra, da água e da sílica ativa foram considerados a densidade da amostra igual a 1,38g/cm³, conforme fornecido pelo fabricante e a massa específica da água igual a 1,00g/cm³.

Figura 47 - Equipamento para termogravimetria



Fonte: Autoria própria

Figura 48 - Curva termogravimétrica obtida



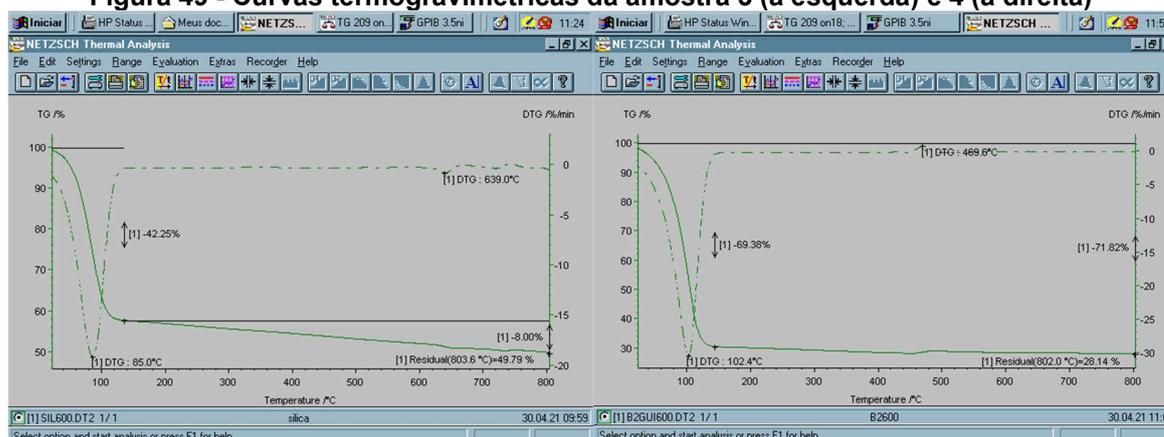
Fonte: Autoria própria

Tabela 33 - Dados obtidos da Termogravimetria e Massa específica da sílica ativa

Dados de ensaio	Amostra 1	Amostra 2
Massa sílica + água (g)	0,011039	0,009535
Volume sílica + água (cm ³)	0,007999	0,006909
% perda de massa	48,06	47,26
Massa de água (g)	0,005305	0,004506
Volume de água (cm ³)	0,005305	0,004506
Massa de sílica (g)	0,005734	0,005029
Volume de sílica (cm ³)	0,002694	0,002403
Massa específica da sílica (g/cm ³)	2,1284	2,0925
Massa específica da sílica média (g/cm ³)	2,110	

Fonte: Autoria própria

Segundo (NITA; JOHN, 2007) um dos meios de se determinar a atividade pozolânica da sílica ativa é pelo desprendimento da água do hidróxido de cálcio. De acordo com Taylor (1990) citado por (NITA; JOHN, 2007), a temperatura em que isso ocorre é em torno de 370°C, sendo praticamente decomposto em uma temperatura de 580°C. A fim de verificar tal comportamento, foi realizado um segundo ensaio de TGA utilizando duas novas amostras de sílica ativa (amostra 3 e amostra 4).

Figura 49 - Curvas termogravimétricas da amostra 3 (à esquerda) e 4 (à direita)

Fonte: Autoria própria

Como resultado (Figura 49), no momento em que cessa a queda abrupta da curva (em torno de 130°C, indicando total evaporação da água do sistema) até 800°C, momento o qual se encerrou o ensaio, a curva derivada (indicada como tracejada) mantém-se muito próximo de 0, indicando assim uma

variação de massa bastante baixa ao decorrer do ensaio. Portanto, não foi observado atividade pozolânica por meio da perda de massa em torno de 370°C conforme (NITA; JOHN, 2007) e/ou uma variação de massa significativa até o final do ensaio, não prejudicando assim a determinação da massa específica do material por meio do ensaio de termogravimetria.

ANEXO B – MODELO ADOTADO

Com o intuito de se conseguir um melhor processamento dos dados pelo software STATISTICA 7, foram estimados os valores de resistência à compressão e de módulo de elasticidade através de uma sucessão de delineamentos fatoriais, utilizando os dados obtidos nos ensaios e adotando modelos matemáticos de segunda ordem. Para isso, foram realizadas as seguintes etapas:

1. Delineamento fatorial 2^3 para determinar uma superfície de resposta inicial;
2. Foi utilizada a equação da superfície de resposta do item anterior para determinar os valores de f_c das células que faltam para realizar dois delineamentos fatoriais 2^2 , onde em um foi fixado a fibra de PVA em 0,25% e a outra foi fixada a fibra de aço em 1,75%. Desse modo, foi determinado os valores de f_c para a temperatura igual a 310°C;
3. Determinado os valores de f_c para $T = 310^\circ\text{C}$, foi realizado um delineamento fatorial 2^3 a fim de determinar os valores restantes de f_c (para os traços de temperatura 482°C e 600°C);
4. Por fim, foi realizado um último delineamento fatorial 2^3 utilizando todos os valores de ensaios e estimados para a construção da superfície de resposta a ser analisada.

Por meio da ANOVA, é possível verificar se o modelo ajustado está bem ajustado ou não para atender a hipótese nula, que considera todos os coeficientes β sendo zeros, ou seja, que a superfície de resposta gerada é plana. Utilizando o valor F, é possível determinar se a hipótese nula é aceita (quando $F_{\text{calc}} \leq F_{\text{tabela}}$) ou rejeitada (quando $F_{\text{calc}} > F_{\text{tabela}}$).

Análise de ajuste do modelo para resistência à compressão

Tabela 34 - Fatores MANOVA pelo STATISTICA 7 para resistência à compressão

Fatores	Soma dos quadrados (SS)	Grau de liberdade (df)	Média dos quadrados (MS)	F _{calc.}	p
(1)T. (°C)(L)	643,130	1	643,130	221,45	0,000
T. (°C)(Q)	351,872	1	351,872	121,16	0,000
(2)AÇO (%) (L)	38,150	1	38,150	13,14	0,011
AÇO (%) (Q)	1168,896	1	1168,896	402,50	0,000
(3)PVA (%) (L)	387,631	1	387,631	133,48	0,000
PVA (%) (Q)	0,000	1	0,000	0,00	1,000
1L by 2L	0,000	1	0,000	0,00	1,000
1L by 3L	0,000	1	0,000	0,00	1,000
2L by 3L	547,022	1	547,022	188,36	0,000
Error	17,425	6	2,904	-	-
Total SS	3144,827	15	-	-	-

Fonte: Autoria própria

Com base na Tabela 35, a hipótese nula é rejeitada, pois o valor F_{calc} é superior ao valor de F_{tabela} e, portanto, a superfície de resposta apresentará alguma curvatura.

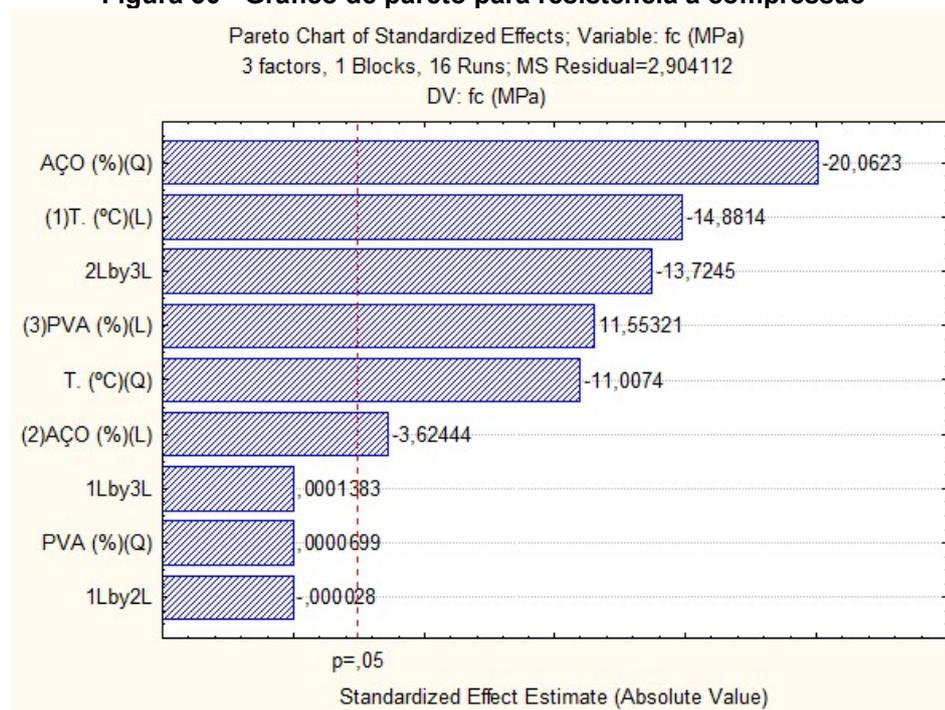
Tabela 35 - Tabela MANOVA para resistência à compressão

	Soma dos quadrados (SS)	Grau de liberdade (df)	Média dos quadrados (MS)	F _{calc.}	F _{tabela}
Regressão (SSR)	3190,222	9,0	354,469	122,06	4,10
Residual	17,425	6	2,904		
Total (SST)	3207,646	15			

Fonte: Autoria própria

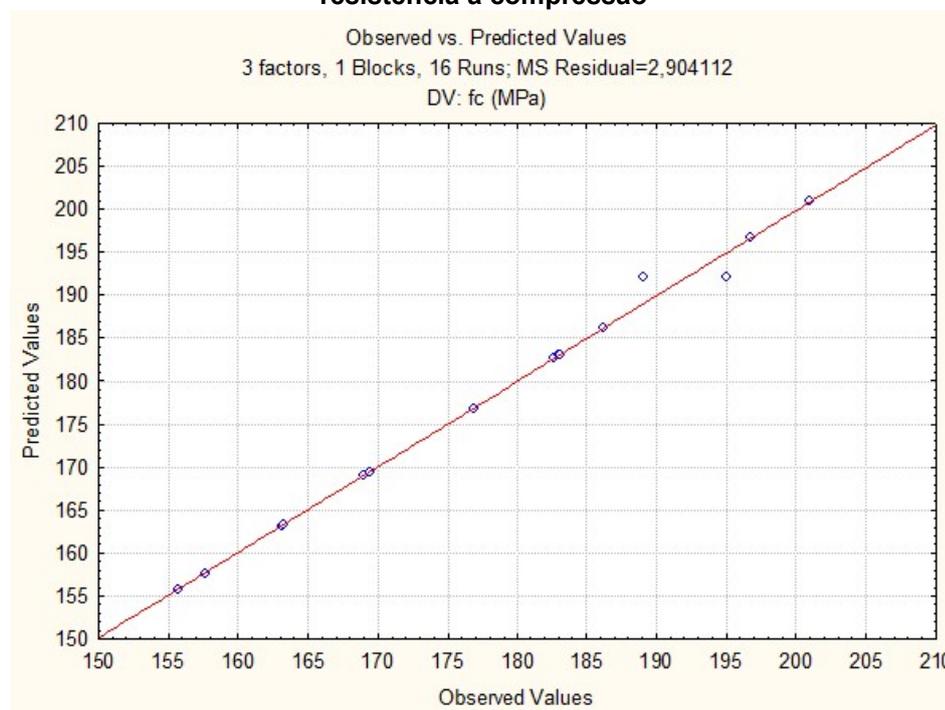
A Tabela 34 mostra que somente as variáveis PVA (para o modelo quadrático), interação entre Temperatura e Aço e interação entre Temperatura e PVA não apresentam ser significativo, sendo facilmente observado pelos seus valores P iguais a 1. Observando o gráfico de Pareto (Figura 50), fica evidente que essas três variáveis não são estatisticamente significativas, diferentemente das demais variáveis, que apresentam grandes magnitudes, com excessão da variável Aço (modelo linear), que apresenta a menor intensidade, estando mais próximo do limite que representa o valor $P = 0,05$.

Figura 50 - Gráfico de pareto para resistência à compressão



Fonte: Autoria própria

Figura 51 - Gráfico de valores experimentais vs valores previstos pelo modelo para resistência à compressão



Fonte: Autoria própria

No caso, o valor obtido de R^2 é de 0,99946, indicando assim uma grande aproximação, como pode ser vista na Figura 51. Isso pode ser observado ao comparar os valores preditos pelo modelo com os resultados observados em laboratório, onde todos os pontos estão bastante próximos da linha teórica.

Análise de ajuste do modelo para módulo de elasticidade

Tabela 36 - Fatores MANOVA pelo STATISTICA 7 para módulo de elasticidade

Fatores	Soma dos quadrados (SS)	Grau de liberdade (df)	Média dos quadrados (MS)	F _{calc.}	p
(1)T. (°C)(L)	6904,215	1	6904,215	2263,52	0,000
T. (°C)(Q)	878,985	1	878,985	288,17	0,000
(2)AÇO (%) (L)	93,762	1	93,762	30,74	0,001
AÇO (%) (Q)	0,000	1	0,000	0,00	1,000
(3)PVA (%) (L)	145,481	1	145,481	47,70	0,000
PVA (%) (Q)	222,534	1	222,534	72,96	0,000
1L by 2L	0,000	1	0,000	0,00	1,000
1L by 3L	393,233	1	393,233	128,92	0,000
2L by 3L	23,256	1	23,256	7,62	0,033
Error	18,301	6	3,050	-	-
Total SS	9381,874	15	-	-	-

Fonte: Autoria própria

Com base na Tabela 36, a hipótese nula é rejeitada, pois o valor F_{calc} é superior ao valor de F_{tabela} e, portanto, a superfície de resposta apresentará alguma curvatura.

Tabela 37 - Tabela MANOVA para resistência à compressão

	Soma dos quadrados (SS)	Grau de liberdade (df)	Média dos quadrados (MS)	F _{calc.}	F _{tabela}
Regressão (SSR)	9363,572	9,0	1040,397	341,09	4,10
Residual	18,301	6	3,050		
Total (SST)	9381,874	15			

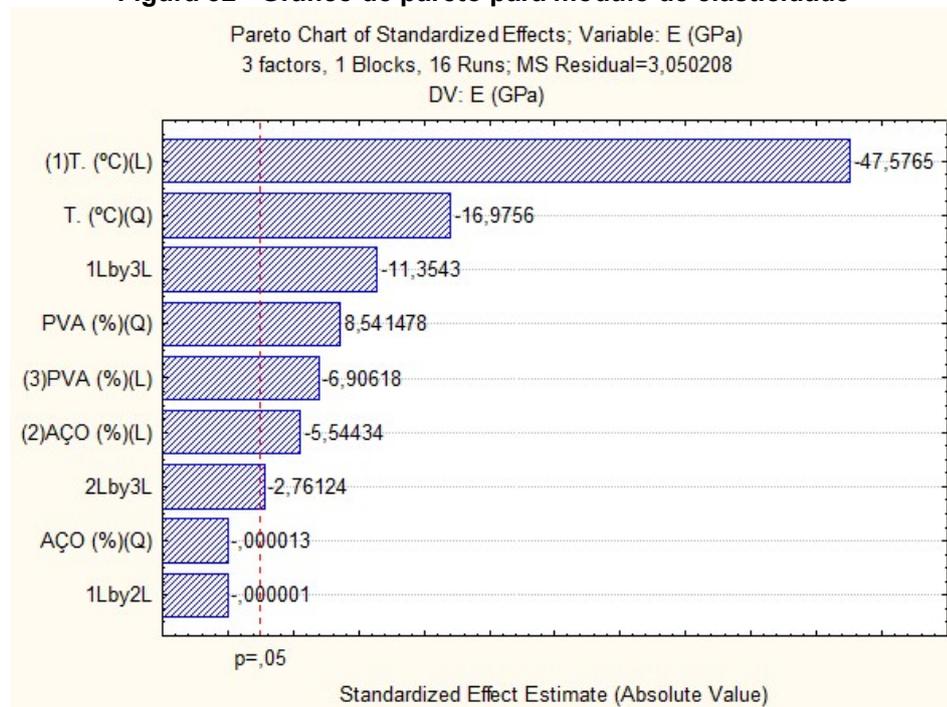
Fonte: Autoria própria

A Tabela 37 mostra que apenas as variáveis Aço (para o modelo quadrático) e interação entre Aço e Temperatura apresentam não ser significativo. Observando o gráfico de Pareto (Figura 52), fica evidente que a variável Temperatura apresenta grandes magnitudes. É possível que a causa disso ter ocorrido seja devido à falta de dados obtidos nos experimentos com temperaturas elevadas. Somado a isso, a interação entre Aço e Temperatura se torna estatisticamente significativa e de terceira maior magnitude, seguido pela variável PVA (tanto linear quanto quadrática). Para as demais variáveis nos demais casos de efeitos e efeitos de interação, apresentam estar próximos do limite.

No caso, o valor obtido de R^2 é de 0,99805, indicando assim uma grande aproximação, como pode ser vista na Figura 53. Isso pode ser observado

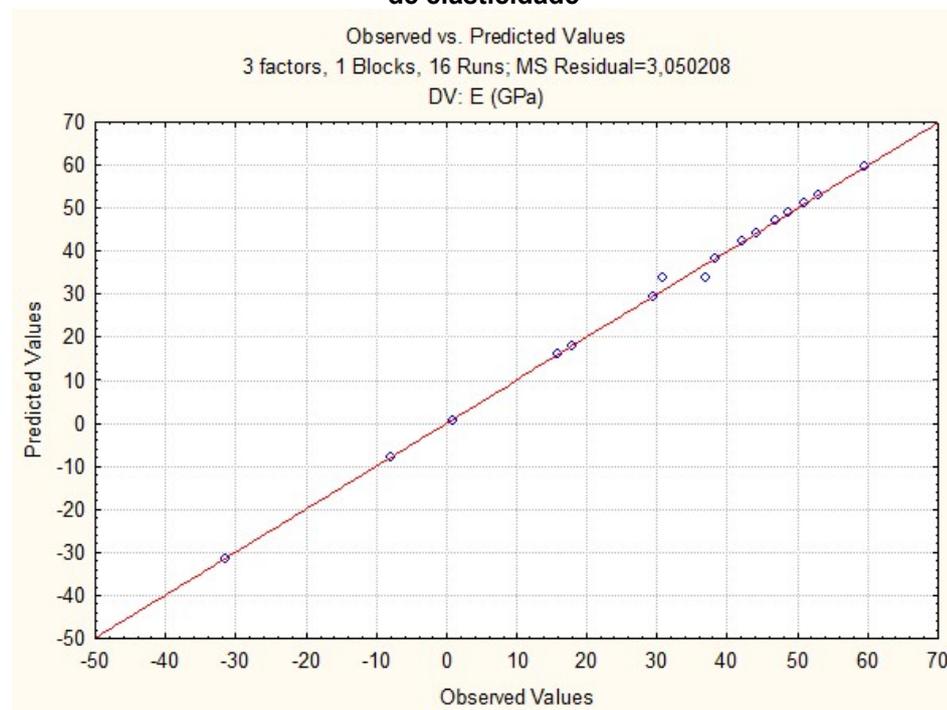
ao comparar os valores preditos pelo modelo com os resultados observados em laboratório, onde todos os pontos estão próximos da linha teórica.

Figura 52 - Gráfico de pareto para módulo de elasticidade



Fonte: Autoria própria

Figura 53 - Gráfico de valores experimentais vs valores previstos pelo modelo para módulo de elasticidade



Fonte: Autoria própria