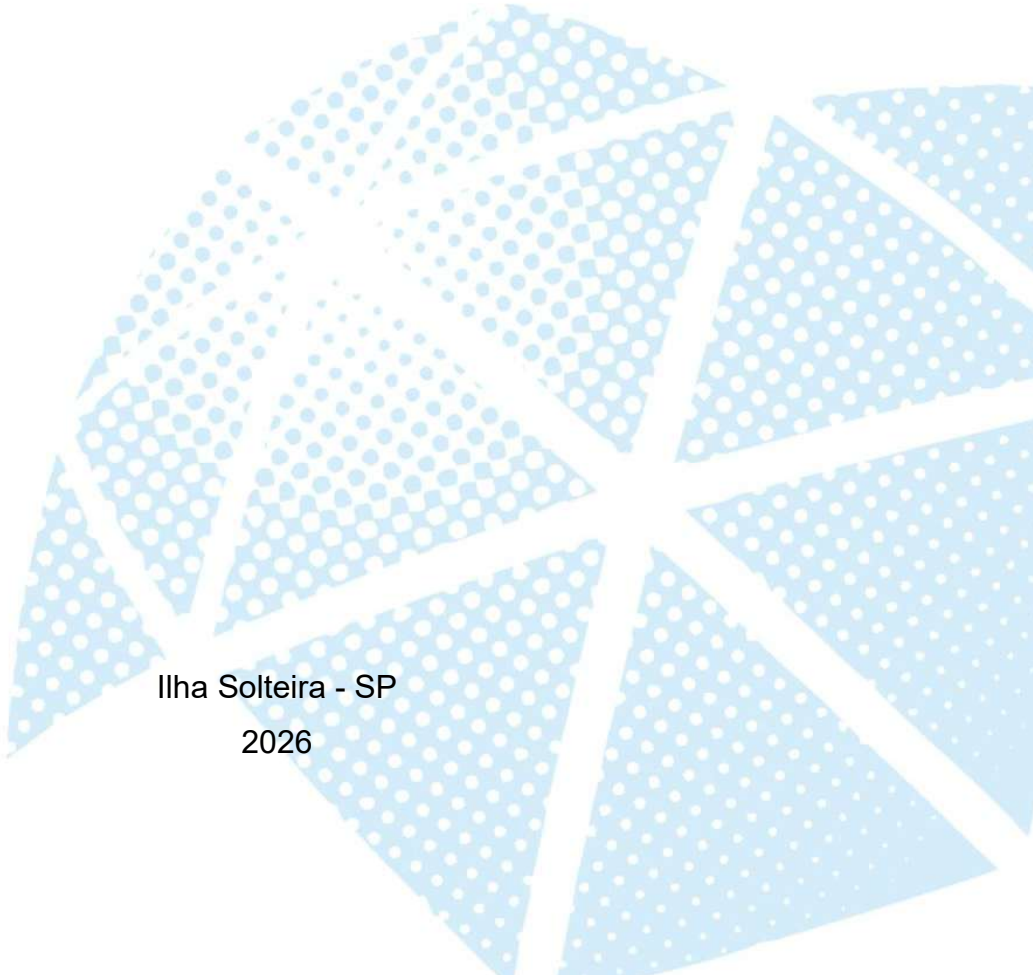
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

ANA CAROLINA FARIA

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM MICROFIBRAS DE VIDRO CONSIDERANDO A IDADE INICIAL E ENVELHECIMENTO ACELERADO



Ilha Solteira - SP
2026

ANA CAROLINA FARIA

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM MICROFIBRAS DE VIDRO CONSIDERANDO A IDADE INICIAL E ENVELHECIMENTO ACELERADO

TCC apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), para obtenção do título de Grau acadêmico Bacharela em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador(a): Prof. Dr. Lisiane Pereira Prado

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F224i

Faria, Ana Carolina.
Investigação das propriedades mecânicas do concreto de ultra-alto desempenho com microfibras de vidro considerando a idade inicial e envelhecimento acelerado / Ana Carolina Faria. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
90 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026

Orientadora: Lisiane Pereira Prado

Inclui bibliografia

1. Concreto de ultra-alto desempenho. 2. Microfibras de vidro. 3. Propriedades mecânicas. 4. Envelhecimento acelerado.

Sandra Montibeller -CRB-8/2026

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A presente pesquisa apresenta impacto científico e técnico ao contribuir para o entendimento do comportamento do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (Ultra-High Performance Concrete - UHPC) reforçado com microfibras de vidro, com foco na influência do teor de fibras no desempenho mecânico e na durabilidade do material.

Do ponto de vista econômico e tecnológico, o estudo indica a viabilidade do uso de microfibras de vidro como alternativa às fibras metálicas, com potencial redução de custos e maior durabilidade das estruturas. No âmbito ambiental, contribui para o desenvolvimento sustentável ao favorecer materiais com maior vida útil e menor necessidade de manutenção.

Além disso, o trabalho possui relevância educacional e acadêmica, ao ampliar o conhecimento na área e servir de base para futuras pesquisas em níveis local, regional e nacional, com potencial de inserção internacional.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research delivers significant scientific and technical impact by contributing to the understanding of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) behavior reinforced with glass microfibers, focusing on how fiber content influences the material's mechanical performance and durability.

From an economic and technological perspective, the study demonstrates the feasibility of using glass microfibers as an alternative to metallic fibers, offering potential cost reductions and enhanced structural longevity. In the environmental sphere, it contributes to sustainable development by promoting materials with a longer service life and reduced maintenance requirements.

Furthermore, the work holds educational and academic relevance by expanding the body of knowledge in the field and serving as a foundation for future research at local, regional, and national levels, with strong potential for international integration.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Ana Carolina Faria

Titulo: INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM MICROFIBRAS DE VIDRO CONSIDERANDO A IDADE INICIAL E ENVELHECIMENTO ACELERADO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciane P. Prado

UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)

Prof. Dr. Alex Micael Dantas de Sousa

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Prof. Dr. Victor H C Lourenço

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

26 / 06 / 26

Dedico este trabalho aos meus pais, Creusa e José Antônio, que sempre foram o meu porto seguro. A vocês, que não mediram esforços e abdicaram de tantos sonhos para que eu pudesse realizar os meus, o meu mais profundo 'muito obrigado'. Este diploma não é apenas meu, mas o fruto de todo o amor, paciência e incentivo que recebi de vocês ao longo de toda a minha vida. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ser a base de tudo, pela força concedida nos momentos de dificuldade e por iluminar meu caminho durante toda esta jornada acadêmica.

Aos meus pais, Creusa e José Antônio, pelo amor incondicional, pelo incentivo constante e por terem sido o alicerce que me permitiu sonhar e concretizar a realização deste curso. Sem o apoio e os sacrifícios de vocês, eu não estaria aqui hoje.

Ao meu namorado, Fabrício, por ser meu companheiro de vida e de jornada. Obrigada pela paciência, pelo apoio emocional nos dias exaustivos e por sempre acreditar no meu potencial, transformando o peso desta etapa em algo mais leve.

À minha orientadora, Lisiane, pela confiança depositada em mim e por toda a orientação técnica e intelectual. Seus ensinamentos, rigor e incentivo foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista, expresso minha gratidão a todo o corpo docente e aos professores que cruzaram meu caminho. Além de transmitirem conhecimento, foram exemplos de ética e dedicação, contribuindo imensamente para a minha formação crítica e profissional.

Agradeço ao MEC, pelo auxílio financeiro concedido, suporte essencial que viabilizou minha permanência estudantil e dedicação integral a este projeto.

Aos grupos PET e GMeCA, pelo ambiente de constante aprendizado e pelas oportunidades de crescimento que me proporcionaram. Agradeço a todos os colegas e tutores com quem compartilhei projetos; participar desses grupos foi fundamental para consolidar minha visão acadêmica e humana.

Aos meus amigos de faculdade, Daniel, Kaique, Leonardo Pinheiro e Letícia, pela parceria, pelas risadas e por dividirem comigo os desafios desta graduação. Agradeço, em especial, à Camilly e ao Leonardo Cacuri, por estarem ao meu lado em cada momento, pela amizade profunda e pelo apoio constante que tornaram essa trajetória muito mais feliz. Vocês fizeram toda a diferença.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.” (Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

O Concreto de Ultra-Alto Desempenho (Ultra-High Performance Concrete - UHPC) apresenta elevadas propriedades mecânicas e alta durabilidade, destacando-se como uma alternativa promissora para aplicações estruturais que exigem elevado desempenho. Nesse contexto, a incorporação de fibras tem sido empregada com o objetivo de melhorar o comportamento mecânico do material, sobretudo sob esforços de tração. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes teores de microfibras de vidro nas propriedades mecânicas de compósitos de UHPC, considerando as idades de 28 e 78 dias e os efeitos do envelhecimento acelerado por ciclos de imersão e secagem. Foram produzidos três traços: um de referência (UHPC 3), sem fibras, e dois reforçados com 1% (UHPC 1) e 1,5% (UHPC 2) de microfibras de vidro, em volume. A caracterização dos compósitos envolveu ensaios de espalhamento, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade estático, resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral. Os resultados mostraram que a incorporação das microfibras reduziu a fluidez das misturas, sem comprometer sua trabalhabilidade. Em relação às propriedades mecânicas, o compósito com 1% de microfibras apresentou o melhor desempenho global, atingindo resistência à compressão de 80,55 MPa aos 28 dias, com um expressivo aumento de 21,58% após o envelhecimento acelerado (atingindo 97,94 MPa). Já o compósito com 1,5% de microfibras apresentou maior módulo de elasticidade aos 28 dias, alcançando 50,53 GPa, porém registrou reduções em algumas propriedades mecânicas e maior sensibilidade ao envelhecimento. Os resultados também indicaram que as microfibras aumentaram as resistências à tração, embora não tenham promovido alterações expressivas no modo de ruptura dos compósitos, que manteve comportamento frágil. Conclui-se que o aumento do teor de microfibras não implica necessariamente em melhoria do desempenho do UHPC, sendo o teor de 1% o que apresentou o melhor equilíbrio entre trabalhabilidade, resistência mecânica e comportamento após o envelhecimento acelerado.

Palavras-chave: Concreto de Ultra-Alto Desempenho; Microfibras de vidro; Propriedades mecânicas; Envelhecimento acelerado.

ABSTRACT

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) exhibits high mechanical properties and high durability, standing out as a promising alternative for structural applications that require high performance. In this context, the incorporation of fibers has been used with the aim of improving the mechanical behavior of the material, especially under tensile stress. Thus, this study aimed to evaluate the influence of different contents of glass microfibers on the mechanical properties of UHPC composites, considering the ages of 28 and 78 days and the effects of accelerated aging through immersion and drying cycles. Three mix designs were produced: a reference mix (UHPC 3), without fibers, and two reinforced with 1% (UHPC 1) and 1.5% (UHPC 2) of glass microfibers by volume. The characterization of the composites involved slump flow tests, axial compressive strength, static modulus of elasticity, flexural tensile strength, and splitting tensile strength tests. The results showed that the incorporation of microfibers reduced the fluidity of the mixtures without compromising their workability. Regarding mechanical properties, the composite with 1% of microfibers presented the best overall performance, reaching a compressive strength of 80.55 MPa at 28 days, with a significant increase of 21.58% after accelerated aging (reaching 97.94 MPa). On the other hand, the composite with 1.5% microfibers presented the highest modulus of elasticity at 28 days, reaching 50.53 GPa; however, it registered reductions in some mechanical properties and greater sensitivity to aging. The results also indicated that the microfibers increased the tensile strengths, although they did not promote significant changes in the failure mode of the composites, which maintained a brittle behavior. It is concluded that increasing the microfiber content does not necessarily imply an improvement in the performance of the UHPC, with the 1% content presenting the best balance between workability, mechanical strength, and behavior after accelerated aging.

Keywords: Ultra-High Performance Concrete; Glass microfibers; Mechanical properties; Accelerated aging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto em 100 anos 22
Figura 2 – Diferentes tipos de concretos especiais. 23
Figura 3 – Passarela de Sherbrooke 27
Figura 4 – Ponte do aeroporto de Tóquio 28
Figura 5 - *Road Bridge – Wild*, ponte localizada na Áustria 28
Figura 6 – Painéis decorativos confeccionados com UHPC na França 29
Figura 7 – Passarela localizada em Medellín 30
Figura 8 – Amostra dos materiais cimentícios e finos utilizados: (a) areia; (b) pó de quartzo; (c) sílica ativa; (d) cimento 35
Figura 9 – Superplastificante utilizado 36
Figura 10 – Microfibra de vidro 36
Figura 11 – Procedimento da mistura 37
Figura 12 – Molde sobre a mesa de consistência 38
Figura 13 – Medição do diâmetro da amostra 39
Figura 14 – Ensaio de resistência à compressão axial esquematizado (a) e realizado no laboratório (b) 41
Figura 15 – Ensaio de resistência à tração na flexão esquematizado (a) e realizado no laboratório (b) 42
Figura 16 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral esquematizado (a) e realizado no laboratório (b) 43
Figura 17 – Ensaio de envelhecimento acelerado: (a) corpos de prova imersos em água e (b) corpos de prova em uma estufa ventilada 44
Figura 18 – Resistência média à compressão axial sob três condições de cura: aos 28 dias, 78 dias e após envelhecimento acelerado 47
Figura 19 – Resistência média à compressão axial aos 28 dias 48
Figura 20 – Módulo de elasticidade médio sob três condições de cura: aos 28 dias, aos 78 dias e após envelhecimento acelerado 52
Figura 21 – Módulo de elasticidade médio aos 28 dias 52
Figura 22 – Trechos elásticos do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c) 56

Figura 23 – Trechos elásticos do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c) 57
Figura 24 – Trechos elásticos do UHPC 3 aos 28 dias 58
Figura 25 – Corpos de prova rompidos do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c).....59
Figura 26 – Corpos de prova rompidos do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c).....59
Figura 27 – Corpos de prova rompidos do UHPC 3 aos 28 dias.....60
Figura 28 – Resistência média à tração na flexão sob três condições de cura: aos 28 dias, 78 dias e após envelhecimento acelerado.....62
Figura 29 – Resistência média à tração na flexão aos 28 dias 62
Figura 30 – Curvas Tensão-Deslocamento do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c) 66
Figura 31 – Curvas Tensão-Deslocamento do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c) 67
Figura 32 – Curvas Tensão-Deslocamento do UHPC 3 aos 28 dias.....68
Figura 33 – Corpos de prova rompidos do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c).....70
Figura 34 – Corpos de prova rompidos do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c).....70
Figura 35 – Corpos de prova rompidos do UHPC 3 aos 28 dias.....71
Figura 36 – Resistência média à tração por compressão diametral sob três condições de cura: aos 28 dias, 78 dias e após envelhecimento acelerado 73
Figura 37 – Resistência média à tração por compressão diametral aos 28 dias.....73
Figura 38 – Corpos de prova rompidos do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado.....76
Figura 39 – Corpos de prova rompidos do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c).....77
Figura 40 – Corpos de prova rompidos do UHPC 3 aos 28 dias.....77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica.....33
Tabela 2 – Parâmetros mecânicos dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica 34
Tabela 3 – Traços usados nas misturas do UHPC.....37
Tabela 4 – Quantidade de corpos de prova moldados.....39
Tabela 5 – Média dos índices de consistência para cada traço 45
Tabela 6 – Resistência à compressão axial do UHPC 1 46
Tabela 7 – Resistência à compressão axial do UHPC 2 46
Tabela 8 – Resistência à compressão axial do UHPC 3 46
Tabela 9 – Módulo de elasticidade do UHPC 1.....51
Tabela 10 – Módulo de elasticidade do UHPC 2.....51
Tabela 11 – Módulo de elasticidade do UHPC 3.....51
Tabela 12 – Resistência à tração na flexão do UHPC 1 60
Tabela 13 – Resistência à tração na flexão do UHPC 2 61
Tabela 14 – Resistência à tração na flexão do UHPC 3 61
Tabela 15 – Resistência à tração por compressão diametral do UHPC 1.....71
Tabela 16 - Resistência à tração por compressão diametral do UHPC 2 72
Tabela 17 – Resistência à tração por compressão diametral do UHPC 3.....72
Tabela 18 – Correlação entre as resistências médias à tração do UHPC 1 e UHPC 2 79
Tabela 19 – Correlação entre as resistências média à tração do UHPC 3 79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/ag	Relação água/aglomerante
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFGC	Associação Francesa de Engenharia Civil
FRC	Fiber-Reinforced Concrete
GF	Glass Fiber
GFRP	Glass Fiber-Reinforced Polymer
HPC	High Performance Concrete
NBR	Norma Brasileira
RPC	Reactive Powder Concretes
SCC	Self-Compacting Concrete
UHPC	Ultra-High Performance Concrete
UHPFRC	Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete

LISTA DE SÍMBOLOS

C_3A	Aluminato tricálcico
f_c	Resistência à compressão
$E_{ci,i}$	Módulo de elasticidade
σ_b	Tensão maior
σ_a	Tensão básica
ε_b	Deformação específica do corpo de prova
R_f	Resistência à tração na flexão
F_f	Carga aplicada verticalmente no centro do prisma
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração por compressão diametral

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 OBJETIVOS 20
1.1.1 Objetivo geral 20
1.1.2 Objetivos específicos 20
1.2 JUSTIFICATIVA 21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
2.1 UHPC 23
2.2 APLICAÇÕES DO UHPC 26
2.3 MICROFIBRAS DE VIDRO 30
2.4 CRITÉRIOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE FIBRAS E PARÂMETROS MECÂNICOS 32
3 MATERIAIS E MÉTODOS 35
3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES 35
3.2 DOSAGEM E EXECUÇÃO DAS MISTURAS 36
3.3 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO 38
3.3.1 Ensaio para Determinação do Índice de Consistência 38
3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO 39
3.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial e Módulo de Elasticidade 40
3.4.2 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão 41
3.4.3 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral 43
3.4.4 Ensaio de Envelhecimento Acelerado 44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 45
4.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA 45
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL 46
4.2.1 Módulo de Elasticidade 50
4.2.2 Modo de Ruptura 58
4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO 60
4.3.1 Comportamento das Curvas Tensão-Deformação na Flexão 65
4.3.2 Modo de Ruptura 69
4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 71
4.4.1 Modo de Ruptura 76

4.5 CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO COM A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 77
5 CONCLUSÃO 81
REFERÊNCIAS.....84

1 INTRODUÇÃO

Pesquisas conduzidas nas últimas décadas têm impulsionado o desenvolvimento de materiais cimentícios com desempenho superior, resultando no surgimento de uma nova classe de concretos de elevada resistência, a princípio denominada Concretos de Pós Reativos (Reactive Powder Concretes – RPC). No cenário atual, esses materiais são classificados como Concretos de Ultra-Alto Desempenho (Ultra-High Performance Concrete – UHPC), representando um dos avanços mais significativos na tecnologia do concreto, por superar diversas limitações associadas aos concretos convencionais (Therresa; Erron; Donald, 2008). Introduzido de forma oficial por De Larrard e Sedran (1994), o UHPC tornou-se foco de pesquisas em escala global, devido à sua combinação singular de propriedades mecânicas e de durabilidade.

O UHPC, em geral, é formulado com elevada proporção de aglutinantes, como cimento, microssílica, pó de quartzo e adições minerais, além de agregados finos, superplastificantes e baixa relação água/aglomerante (a/ag). Essa composição resulta em uma matriz de alta densidade e baixíssima permeabilidade, proporcionando propriedades mecânicas excepcionais, como resistência à compressão superior a 150 MPa. Essa composição resulta em uma matriz de alta densidade e baixíssima permeabilidade, proporcionando resistência à compressão superior a 150 MPa, elevada resistência à tração na flexão, excelente desempenho sob impacto e carregamentos cíclicos, além de elevada durabilidade em ambientes agressivos. Essas características permitem a concepção de estruturas mais esbeltas, com redução do consumo de materiais e do peso próprio (Abdullah et al., 2022; Shi et al., 2015).

Apesar dessas vantagens, o UHPC apresenta comportamento sobretudo frágil quando não reforçado, em razão de sua baixa resistência à tração e limitada capacidade de deformação, o que restringe sua aplicação estrutural (Graybeal; Davis, 2008; Fehling; Schmidt; Stürwald, 2008). Como estratégia para mitigar esse comportamento, a incorporação de fibras tem sido adotada em larga escala, promovendo a transição do modo de ruptura frágil para um comportamento mais dúctil (Banthia; Gupta, 2006; Wille; Kim; Naaman, 2011).

A eficiência do reforço fibroso está diretamente relacionada às características das fibras e às condições de sua incorporação. Aspectos como tipo, teor, dimensão,

orientação, método de mistura e nível de dispersão influenciam significativamente o desempenho mecânico do UHPC. De modo geral, fibras mais curtas favorecem o encruamento por deformação, enquanto fibras de maior comprimento contribuem para a melhoria da resposta pós-fissuração e da curva tensão-deformação. Além disso, a combinação de fibras com diferentes propriedades mecânicas pode aprimorar o desempenho global do compósito (Park et al., 2012; Dawood; Ramli, 2012).

Dentre os materiais de reforço, as fibras de aço são as mais utilizadas, proporcionando ganhos expressivos de ductilidade, tenacidade e capacidade de absorção de energia. Entretanto, seu emprego apresenta limitações importantes, como elevado custo, dificuldades de trabalhabilidade e dispersão, além da suscetibilidade à corrosão (Sujitha Magdalene et al., 2023; Yoo et al., 2017). Somado a isso, mesmo em teores volumétricos usuais (1–2%), podem ocorrer limitações na dissipação de energia e rápida propagação de macrofissuras após o pico de carga (Li; Deng, 2023).

Nesse contexto, fibras não metálicas têm sido investigadas como alternativas promissoras, destacando-se as fibras de vidro (Glass Fiber – GF). Essas fibras apresentam baixa densidade, elevada resistência à tração, boa aderência à matriz cimentícia e menor custo quando comparadas às fibras de aço. Estudos também indicam que sua incorporação pode melhorar as propriedades mecânicas do UHPC e aumentar sua resistência à corrosão, sem evidências significativas de degradação ao longo do tempo (Pourjahanshahi; Madani, 2021; Yan et al., 2021).

Apesar dos avanços, ainda são limitadas as pesquisas voltadas ao uso específico de microfibras de vidro em matrizes de UHPC, em particular no que se refere ao comportamento ao longo do tempo e sob condições de envelhecimento. Ghorpade (2010) verificou que o teor de 1% de fibras de vidro proporcionou melhores desempenhos mecânicos; no entanto, permanecem lacunas quanto à influência dessas fibras em idades avançadas e em condições que simulem a degradação acelerada do material.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo consiste em investigar as propriedades mecânicas do Concreto de Ultra-Alto Desempenho reforçado com fibras (Ultra-High Performance Concrete – UHPC) sob diferentes teores de microfibras de vidro. As análises abrangem as idades de 28 e 78 dias, além de ensaios de envelhecimento acelerado compostos por ciclos de imersão e secagem, que visam reproduzir os efeitos da exposição natural de um ano em um intervalo de tempo menor. A avaliação foca na resistência mecânica, com ênfase na carga máxima e na carga de fissuração sob tração.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

a) Avaliar a influência de diferentes teores de microfibras de vidro nas propriedades de resistência à compressão, tração (flexão e compressão diametral) e módulo de elasticidade do UHPC, com o intuito de identificar a dosagem ideal;
b) Levantar parâmetros mecânicos na literatura técnica para fundamentar o confronto de dados aos 28 dias, dada a escassez de registros para idades superiores;
c) Avaliar a proporção de fibras que proporciona maior carga máxima à tração, melhor ductilidade e desempenho pós-fissuração, incluindo a carga máxima e a carga de início de fissuração;
d) Estabelecer uma correlação entre os valores de resistência à tração na flexão e à tração por compressão diametral para o UHPC com microfibras;
e) Realizar ensaios de envelhecimento acelerado, adaptando a norma ABNT NBR 15498:2021, para suprir a falta de normatização específica para o UHPC neste tipo de ensaio.

1.2 JUSTIFICATIVA

O avanço da tecnologia dos materiais cimentícios tem impulsionado o desenvolvimento de concretos com desempenho superior, dentre os quais se destaca o Concreto de Ultra-Alto Desempenho (Ultra-High Performance Concrete – UHPC). Esse material apresenta elevada resistência mecânica, baixa porosidade e alta durabilidade, características que o tornam promissor para aplicações estruturais mais exigentes. No entanto, apesar do alto desempenho à compressão, o UHPC apresenta comportamento frágil sob esforços de tração, o que justifica a incorporação de fibras como forma de melhorar sua ductilidade e sua capacidade de absorção de energia.

Nesse contexto, as microfibras de vidro surgem como alternativa ao uso de fibras metálicas, devido ao menor custo e à ausência de problemas relacionados à corrosão. Contudo, ainda existem lacunas na literatura quanto ao teor ideal de incorporação dessas fibras, em especial no que se refere ao equilíbrio entre trabalhabilidade, homogeneidade da mistura e desempenho mecânico. Teores elevados podem comprometer a dispersão das fibras e a compactação da matriz, enquanto teores reduzidos podem não gerar ganhos relevantes nas propriedades mecânicas.

Diante disso, torna-se relevante investigar o efeito de diferentes teores de microfibras de vidro no comportamento do UHPC, com a avaliação de propriedades como resistência à compressão, tração na flexão e tração por compressão diametral, além da resposta do material ao envelhecimento acelerado. Essa abordagem permite compreender não apenas o desempenho inicial, mas também a durabilidade e a estabilidade do compósito ao longo do tempo.

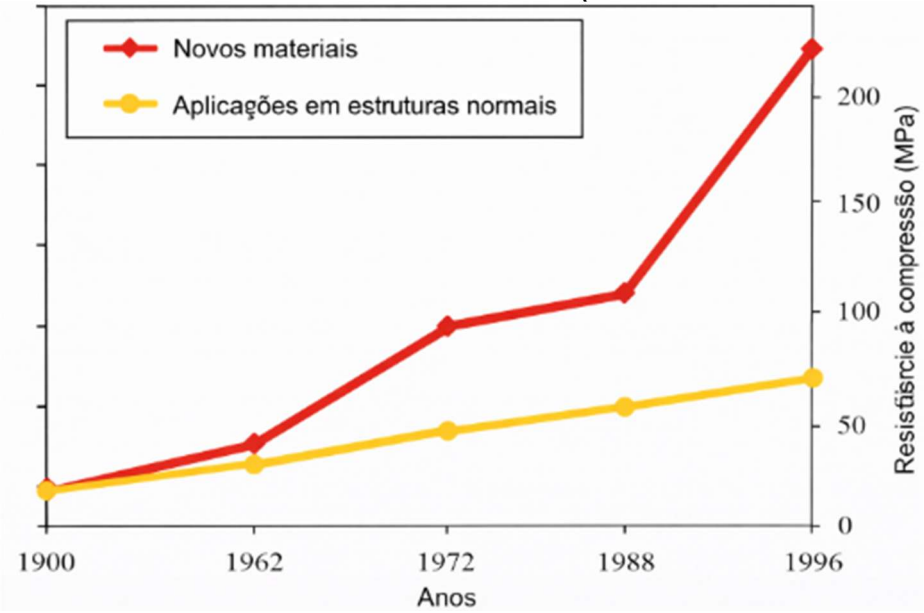
Assim, este trabalho se justifica pela necessidade de ampliar o entendimento sobre o papel das microfibras de vidro no UHPC, fornecendo subsídios técnicos para a definição de dosagens mais eficientes e viáveis, além de contribuir para o conhecimento do comportamento desse material em diferentes condições de exposição.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas últimas décadas, o concreto passou por expressivos avanços tecnológicos. As primeiras iniciativas de pesquisa, iniciadas na década de 1930, tinham como

principal objetivo o aumento da resistência à compressão do material. Os principais avanços tecnológicos do concreto nos últimos 40 anos estão apresentados na Figura 1 (Spasojević, 2008).

Figura 1 - O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto em 100 anos



Fonte: Adaptado de Spasojević (2008).
Legenda: Gráfico com fundo branco apresentando duas curvas de evolução da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo (1900–1996). A curva em vermelho representa os “novos materiais”, enquanto a curva em amarelo indica as “aplicações em estruturas normais”. O eixo horizontal corresponde aos anos e o eixo vertical à resistência à compressão (MPa), evidenciando o crescimento mais acentuado dos novos materiais em comparação às aplicações convencionais.

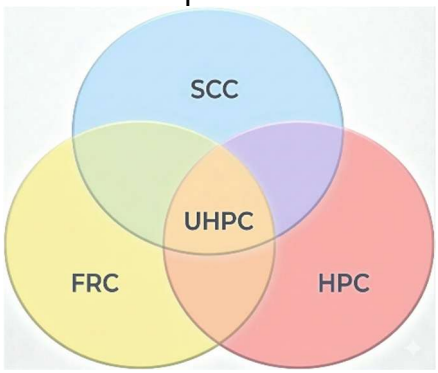
A partir do gráfico, observa-se que entre as décadas de 1960 e 1970, a evolução do concreto foi lenta em sua fase inicial, mas houve um rápido aumento em cerca de 10 anos. Esse avanço foi limitado pelos aditivos redutores de água disponíveis, que não permitiam reduzir de forma expressiva a relação água/aglomerante (Aïtcin, 2000). Já na década de 1980, notou-se que o uso de superplastificantes poderia reduzir essa relação para cerca de 0,30. Valores inferiores a esse eram considerados inviáveis até que Bache (1981) comprovou que, com o uso de altas doses de superplastificantes e sílica ativa, era possível reduzir essa relação para 0,16.

O processo tecnológico, em conjunto com o domínio de conceitos relacionados a materiais de baixa porosidade, contribuiu para o surgimento de materiais cimentícios de ultra-alto desempenho a base de cimento Portland, caracterizados por suas elevadas propriedades mecânicas (Schmidt; Fehling, 2005; Nguyen; Ye, 2011; Shi et al., 2015).

2.1 UHPC

O UHPC é uma geração considerada recente de material cimentício que apresenta resistência, ductilidade e durabilidade muito elevadas (Richard; Cheyrezy, 1995a). A Figura 2 demonstra que o UHPC reforçado com fibras pode ser entendido como a combinação de três tecnologias de concreto, em maior ou menor grau: Concreto Autoadensável (Self-Compacting Concrete - SCC), Concreto Reforçado com Fibras (Fiber-Reinforced Concrete - FRC) e Concreto de Alto Desempenho (High Performance Concrete - HPC) (Torregrosa, 2013).

Figura 2 – Diferentes tipos de concretos especiais.



Fonte: Adaptado de Camacho (2013).
Legenda: Fundo branco com círculos sobrepostos em azul, amarelo e vermelho. Com escritos em cinza: SCC, FRC, HPC e, ao centro, UHPC representando a convergência das tecnologias de concreto.

Segundo a Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC, 2013), o UHPC consiste em uma matriz cimentícia reforçada com fibras, caracterizada por elevada resistência à compressão, geralmente superior a 150 MPa, podendo atingir valores próximos a 250 MPa, além de resistência à tração superior a 7 MPa e excelentes propriedades reológicas no estado fresco. A AFGC (2002) classifica como UHPC de menor resistência aqueles que apresentam resistência à compressão entre 130 MPa e 150 MPa. De forma complementar, a ABNT NBR 17246-1 (2025) define o UHPC como um concreto de matriz cimentícia homogêneo e de baixa porosidade, com resistência à compressão superior a 100 MPa e comportamento dúctil à tração. Embora os limites estabelecidos pelas normas apresentem diferenças, existe consenso de que o UHPC possui desempenho mecânico e durabilidade superiores aos concretos convencionais.

A denominação UHPC é utilizada com frequência para designar uma matriz cimentícia com elevada resistência mecânica à compressão, cuja composição, em

geral, inclui sílica ativa, baixa relação água/ligante e apenas agregados miúdos (Bahmani; Mostofinejad, 2022). Para atender aos elevados requisitos de desempenho exigidos desse material, é comum a incorporação de fibras, que contribuem para o aumento da resistência à tração, da capacidade de absorção de energia e da durabilidade do compósito (ACI 239, 2013).

Considerando as limitações do concreto convencional, em especial sua baixa resistência à tração, diversos estudos investigaram a incorporação de fibras como forma de aprimorar o desempenho do material. Nesse contexto, as fibras promovem melhorias significativas nas propriedades mecânicas do compósito, sobretudo em relação aos esforços de tração, flexão, abrasão, deformação, impacto e fadiga (Uygunoğlu, 2008). Além disso, atuam no controle da fissuração em diferentes estágios, sendo eficazes nas microfissuras durante a fase de secagem e nas macrofissuras no estado endurecido, desempenhando o papel de ponte de tensões e limitando a abertura e a propagação das fissuras (Medeiros, 2012). Somado a isso, contribuem para a redistribuição das tensões para regiões não fissuradas da matriz, aumentando a durabilidade do compósito e permitindo suportar maiores cargas mesmo na presença de descontinuidades internas (Uygunoğlu, 2008).

Em complemento, Kang et al. (2011) investigaram a influência da orientação das fibras nas propriedades à flexão do UHPC, posicionando-as de forma paralela e na direção longitudinal do molde. Os resultados indicaram que a disposição longitudinal das fibras proporcionou aumentos de cerca de 5,5% na resistência à fissuração inicial e de 61% no módulo de ruptura, em comparação com a orientação paralela.

Nesse sentido, a incorporação de fibras em concretos de ultra-alto desempenho torna-se ainda mais relevante, uma vez que esse material apresenta elevada resistência, porém comportamento frágil. Em termos gerais, o UHPC é descrito como uma mistura cimentícia com fibras, que apresenta elevada fluidez devido ao uso de superplastificantes, incorpora sílica ativa e possui uma relação água/cimento muito baixa. Além disso, distingue-se pela utilização de areia de quartzo de elevada finura, com granulometria entre 0,15 e 0,60 mm, em substituição aos agregados convencionais (Azmee; Shafiq, 2018).

A ausência do agregado graúdo na mistura do UHPC contribui para a redução dos vazios internos, em função do empacotamento das partículas. Além disso, minimiza a zona de transição, que é a região de ligação entre a pasta de cimento e o

agregado graúdo, considerada a parte mais vulnerável do concreto (Richard; Cheyrezy, 1995). Devido à essa ausência, os pesquisadores Lee e Chisholm (2005) afirmam que o UHPC apresenta comportamento mais próximo ao de uma argamassa do que ao de um concreto convencional. No entanto, os autores também reconhecem sua similaridade com o concreto tradicional, uma vez que se trata de um material estrutural que envolve etapas construtivas semelhantes, como lançamento, adensamento e endurecimento.

Devido ao uso de partículas de pequenas dimensões, o UHPC reforçado com fibras apresenta uma microestrutura densa, com zona de transição quase nula, o que resulta em elevada resistência à compressão (Enami; Carrazedo, 2013).

A incorporação de sílica ativa ao concreto promove melhorias em suas propriedades mecânicas, além de reduzir o coeficiente de permeabilidade (Dinten, 2000). Nesse contexto, estudos como o de Jaykumar (2004) demonstram que, ao ser aplicada ao UHPC e analisada em diferentes idades (1, 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias), a sílica ativa contribui de forma expressiva para o desempenho do material, em função de sua elevada reatividade pozolânica, além de favorecer o aumento da resistência à compressão com o avanço da idade do concreto.

No que se refere aos aditivos, o uso de superplastificantes desempenha papel fundamental no UHPC, pois permite a redução do teor de cimento, minimizando os efeitos de retração, além de proporcionar maior trabalhabilidade à mistura, condição essencial em função da baixa relação água/cimento (Cheyrezy, 1999). Entretanto, Lee e Chisholm (2005) destacam que esse aditivo não impacta de forma expressiva o aumento da resistência à compressão. Ademais, Ma et al. (2008), ao avaliarem o efeito do modo de incorporação de superplastificantes no UHPC, verificaram que a adição gradual desse aditivo contribui para a redução da viscosidade e o aumento da trabalhabilidade da mistura, propondo sua aplicação em duas etapas, sendo que a segunda potencializa ainda mais a fluidez do material.

No que diz respeito aos materiais constituintes, o tipo de cimento também exerce influência significativa no desempenho do UHPC. Dugat et al. (1996) indicam que cimentos com baixa concentração de aluminato tricálcico (C_3A) são mais adequados para a produção de concretos de pós reativos, em função da menor demanda de água para hidratação. Nesse sentido, Richard e Cheyrezy (1995) destacam que cimentos com elevado teor de adições minerais não são recomendados

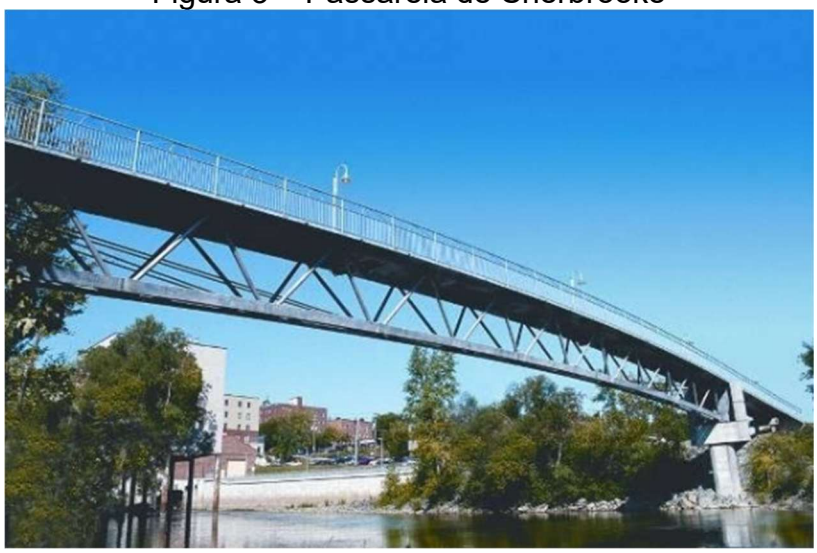
para a produção de UHPC, devido à sua baixa velocidade de pega, sendo mais indicado o uso de cimentos de alta resistência inicial.

Em síntese, a obtenção das propriedades desejadas no UHPC depende da seleção criteriosa dos materiais e da adoção de procedimentos técnicos avançados. De modo geral, os traços empregados na literatura baseiam-se na mistura de referência proposta por Richard e Cheyrezy (1995). Em comparação ao concreto convencional, o UHPC apresenta, via de regra, maior teor de ligantes e maior dosagem de superplastificantes. A partir da combinação adequada de materiais cimentícios, de uma granulometria otimizada da areia e da incorporação de fibras e superplastificantes, é possível produzir um material com elevada fluidez, desempenho mecânico e durabilidade superiores (De Larrard; Sedran, 2002; Richard; Cheyrezy, 1995). Contudo, essas vantagens estão associadas a custos mais elevados e a processos de produção mais complexos. Diante disso, tem-se intensificado a busca por formulações mais econômicas, por meio do emprego de materiais alternativos que desempenhem funções semelhantes, visando substituir componentes de maior custo e ampliar a viabilidade de aplicação do UHPC.

2.2 APLICAÇÕES DO UHPC

A introdução do UHPC na indústria da construção civil ocorreu no ano de 1997, na América do Norte, com a execução da passarela de Sherbrooke (Figura 3), localizada na cidade de Quebec, no Canadá (Perry; Seibert, 2013). Naquela oportunidade, a superestrutura da ponte pioneira foi confeccionada utilizando o Concreto de Pós Reativos (CPR), o qual registrou uma resistência à compressão da ordem de 200 MPa (Warnock, 2005).

Figura 3 – Passarela de Sherbrooke



Fonte: Perry e Seibert (2013).
Legenda: Passarela de Sherbrooke cruzando um rio sob céu azul, com edifícios da cidade ao fundo.

Após esse marco inicial, o emprego dessa tecnologia expandiu-se de forma global. Atualmente, os países que concentram o maior volume de obras e projetos estruturais utilizando o UHPFRC são os Estados Unidos, o Japão, a Coreia do Sul, a França, a Alemanha, a Suíça e os Países Baixos (Abellán et al., 2018). Diante deste panorama promissor, centenas de projetos já concluídos ao redor do mundo validam o desempenho prático do material, demonstrando que seu comportamento em serviço está perfeito alinhamento com as previsões teóricas e de projeto (Leonardo; Medina, 2020).

Dentre as aplicações de infraestrutura mais notáveis, destaca-se a ponte do aeroporto de Tóquio (Figura 4), no Japão, projetada de modo específico para suportar o trânsito de aeronaves. Essa estrutura foi erguida sobre uma rodovia que interliga as regiões sul e norte do país, apresentando dimensões de 46 metros de comprimento por 16 metros de largura, com uma capacidade de carga de projeto estipulada em 125 kN por eixo (Toutlemonde; Resplendino, 2013). A superestrutura dessa obra é constituída por vigas com seção transversal em formato de "U" na porção superior, as quais servem de suporte para placas do mesmo material que foram solidificadas posteriormente; todos os elementos componentes foram moldados com um UHPC de resistência à compressão de 180 MPa (Christ, 2019).

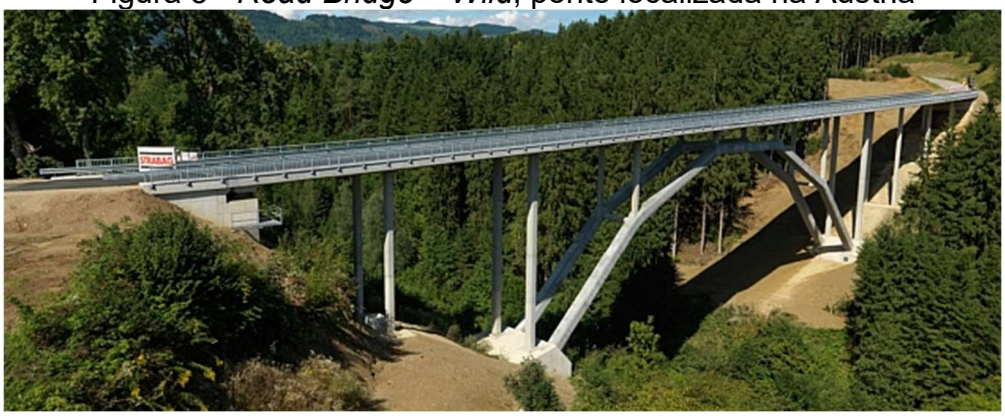
Figura 4 – Ponte do aeroporto de Tóquio



Fonte: Toutlemonde e Resplendino (2013).
Legenda: Ponte de concreto com guarda-corpo metálico cruzando uma via subterrânea, localizada na área interna do aeroporto de Tóquio.

Outro exemplo internacional de relevância no setor de transportes é a *"Road Bridge – Wild"* (Figura 5), construída sobre um vale na Áustria. Trata-se de uma ponte que totaliza 157 metros de comprimento, com um arco central que se estende por 70 metros de comprimento (Fehling; Bunje; Leutbecher, 2014). De modo geral, o UHPC tem se consolidado em obras de arte especiais de pequeno e alto tráfego, pontes rodoviárias e passarelas de pedestres (Perry; White; Ahlborn, 2016).

Figura 5 - *Road Bridge – Wild*, ponte localizada na Áustria



Fonte: KHP Leipzig (2019). Disponível em: https://www.khp-leipzig.de/?page_id=539 acesso em: 16 de maio de 2026.
Legenda: Ponte rodoviária em arco superior de concreto armado, apoiada sobre pilares esbeltos, transpondo um vale na Áustria.

Contudo, o campo de aplicação do UHPC não se limita a estruturas de grande porte ou de infraestrutura pesada. Suas excepcionais propriedades mecânicas e elevados índices de durabilidade estendem sua versatilidade para uma ampla gama de soluções na engenharia e na arquitetura (Toutlemonde; Resplendino, 2013). Estimulados pela viabilidade técnica de explorar novas matrizes geométricas, formas

complexas e variações volumétricas delgadas, projetistas e arquitetos têm incorporado o material no desenvolvimento de abrigos de ônibus, mobiliário urbano para grandes centros urbanos, marquises, escoras, sistemas de revestimento e componentes para serviços subterrâneos ou de alta segurança (Acker; Behloul, 2004; Perry; White; Ahlborn, 2016).

Na França, por exemplo, o uso do UHPC revolucionou a confecção de elementos decorativos e painéis de vedação para fachadas de edificações. Nestes casos, o desempenho mecânico superior do material viabiliza a produção de peças com espessuras reduzidas (Torregrosa, 2013). Entre os projetos arquitetônicos de destaque no território francês que adotaram essa solução (Figura 6), mencionam-se o centro de controle de ônibus da cidade de Thiais, o complexo habitacional localizado em *Montpellier* e os painéis que compõem o fechamento externo da fachada do estádio *Jean Bouin*.

Figura 6 – Painéis decorativos confeccionados com UHPC na França



Fonte: Toutlemonde e Resplendino (2013).
Legenda: Fachada de edifício moderno com painéis escuros de UHPC e vidros espelhados (superior esquerdo); detalhe de painéis vazados com recortes orgânicos (superior direito); e vista aérea de estádio com cobertura em estrutura treliçada ou perfurada de UHPC (inferior).

Em contrapartida ao cenário de consolidação observado nos mercados norte-americano, europeu e asiático, a difusão e a aplicação prática do UHPC reforçado com fibras no contexto da América Latina ainda assumem caráter incipiente. Esse panorama restritivo é motivado, por razões fundamentais, pela escassez de pesquisas científicas locais e pelos elevados custos financeiros associados à produção do compósito (Leonardo; Medina, 2020). O primeiro registro de aplicação do material em solo latino-americano ocorreu apenas no ano de 2017, com a construção da passarela de pedestres destinada a interligar o *campus* principal ao edifício de Idiomas da Universidade EAFIT (Figura 7), situada em Medellín, na Colômbia (Abellán et al., 2018).

Figura 7 – Passarela localizada em Medellín



Fonte: Abellán et al. (2018).
Legenda: Vista aérea da circulação de pedestres na passarela (superior esquerdo); detalhes da face inferior da estrutura de concreto e seus apoios (superior direito); e perspectiva inferior destacando as rampas de acessibilidade e o guarda-corpo metálico (inferior).

2.3 MICROFIBRAS DE VIDRO

As fibras de vidro (GF) caracterizam-se por serem leves, apresentarem elevada resistência à tração e possuírem baixo custo. Dentre os diferentes tipos de fibras não

metálicas, elas destacam-se por seu reduzido diâmetro e elevado módulo de elasticidade, características que contribuem para a melhoria do desempenho do UHPC (Pourjahanshahi; Madani, 2021; Rigaud; Chanvillard; Chen, 2012; Yan et al., 2021).

No contexto do UHPC, a incorporação de fibras de vidro contribui de forma expressiva para a melhoria do desempenho mecânico do material. Essas fibras atuam na matriz cimentícia impedindo a propagação de microfissuras e retardando a formação de fissuras macroscópicas, além de promoverem aumento na resistência à flexão, na tenacidade estrutural e na resistência ao impacto. Somado a isso, favorecem a densificação da microestrutura e apresentam boa aderência aos produtos de hidratação do cimento, podendo ainda contribuir para o aumento da resistência à compressão, do módulo de elasticidade e da resistência à corrosão (Tian et al., 2019). Em função dessa atuação, o UHPC reforçado com fibras de vidro apresenta maior energia de fratura, decorrente do mecanismo de ponte de fissuras (Aziz; Ahmed, 2012).

Estudos indicam que o efeito de tenacificação promovido pelas fibras de vidro está associado à formação de uma rede cristalina mais desenvolvida na matriz cimentícia, o que favorece a dissipação de energia (Yu et al., 2016). Além disso, a durabilidade dessas fibras em meios cimentícios tem se mostrado satisfatória, uma vez que não apresentam danos significativos por corrosão nem formação expressiva de produtos corrosivos (Holubová et al., 2017).

Em comparação com outros tipos de fibras, as fibras de vidro apresentam desempenho competitivo, podendo substituir fibras sintéticas devido ao seu maior módulo de elasticidade, bem como fibras de aço em função do menor custo, sem comprometer as propriedades mecânicas e a ductilidade do material (Madhkhan; Saeidian, 2021). Nesse sentido, estudos experimentais demonstram que misturas contendo fibras de vidro podem apresentar incrementos de cerca de 20% na resistência à compressão e 30% na resistência à flexão, quando comparadas a concretos reforçados com fibras de polipropileno (He et al., 2021). Além disso, ganhos de até 27,9% na resistência à flexão do UHPC têm sido reportados sem prejuízo à resistência à compressão (Yan et al., 2021).

Resultados semelhantes também são observados em concretos convencionais e de alto desempenho. Fanella e Naaman (1985) e Mirza e Soroushian (2002) verificaram aumentos nas resistências à tração e à flexão, bem como melhoria da

ductilidade pós-pico em compressão. Chandramouli et al. (2010) observaram incrementos entre 20% e 25% na resistência à compressão e entre 15% e 20% nas resistências à tração por compressão diametral e à flexão. Além disso, Tassew e Lubell (2014) verificaram que o aumento do teor de microfibras de vidro contribui para o aumento da resistência à flexão do concreto, enquanto Ghorpade (2010) identificou que o teor de 1% de fibras proporciona os melhores resultados mecânicos em concretos de alto desempenho.

No que se refere às aplicações, Meng e Khayat (2016) desenvolveram painéis de UHPC reforçados com fibras de vidro, indicando sua utilização em elementos pré-fabricados, como painéis de parede e componentes estruturais de pontes. Outros estudos também investigaram o comportamento à flexão de painéis de UHPC reforçados com fibras de vidro e polímeros (Glass Fiber-Reinforced Polymer - GFRP), evidenciando melhorias significativas no desempenho estrutural desses elementos (Choi; Yuan, 2005; Enfedaque; Paradela; Sánchez-Gálvez, 2012).

Apesar dos avanços, ainda há limitações na literatura quanto ao uso de fibras de vidro, em especial na forma de microfibras, em UHPC. De modo geral, seu uso tem sido restrito a composições específicas, havendo ainda pouca exploração como material de reforço, mesmo diante de seu potencial para aprimorar a resistência à tração e a ductilidade (Kwon et al., 2014). Dessa forma, evidencia-se a necessidade de investigações adicionais que explorem o potencial das microfibras de vidro na melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade desse material.

2.4 CRITÉRIOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE FIBRAS E PARÂMETROS MECÂNICOS

As Tabelas 1 e 2 apresentam os dados coletados de cinco artigos selecionados para subsidiar a escolha do teor de fibras e permitir a comparação dos parâmetros mecânicos com os resultados a serem obtidos nesta pesquisa, com anos de publicação compreendidos entre 2021 e 2023. Na Tabela 1 as informações estão organizadas em colunas que identificam o título do trabalho, o ano de publicação, os autores, o tipo e o teor de fibra na mistura, sendo o vidro o material em estudo. Observa-se que, na maioria das pesquisas avaliadas, o teor máximo de adição adotado foi de 2%.

A Tabela 2, por sua vez também apresenta o título de cada artigo, bem como os parâmetros mecânicos reportados na literatura para cada formulação de UHPC, incluindo o teor de fibra na mistura e os respectivos valores de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade, organizados em colunas. Para a consolidação dessas propriedades, não foram considerados parâmetros como o tamanho e o formato das fibras, a geometria e as dimensões dos corpos de prova, bem como o tipo de cura do concreto.

Tabela 1 – Dados dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica

Título do artigo	**Ano de publicação**	**Autores**	**Tipo de fibra**	**Teor de fibra na mistura**
The Mechanical Properties and Damage Evolution of UHPC Reinforced with Glass Fibers and High-Performance Polypropylene Fibers.	2021	HE et al.	Vidro	1,0% 1,5% 2,0%
Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre.	2021	YAN et al.	Vidro	1,0% 1,5% 2,0% 2,5%
Ultra-high-performance concrete with Iron ore tailings and non-metallic and hybrid fibers-A comprehensive experimental study.	2023	MAGDALENE, P. S. et al	Vidro	1,0% 1,5% 2,0%
Mechanical and fracture characteristics of ultra-high performance concretes reinforced with hybridization of steel and glass fibers.	2023	MUHYADDIN, G. F.	Vidro	1,0%
Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high performance fiber reinforced concretes: Effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers.	2021	MOHAMMED et al.	Vidro	1,0% 1,5% 2,0% 2,5% 3,0%

Fonte: Autora (2026).

Tabela 2 – Parâmetros mecânicos dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica

Título do artigo	Teor de fibra na mistura	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
The Mechanical Properties and Damage Evolution of UHPC Reinforced with Glass Fibers and High-Performance Polypropylene Fibers.	1,0% 1,5% 2,0%	115,1 114,1 131,7	-	-	44,5 44,2 45,8
Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre.	1,0% 1,5% 2,0% 2,5%	123,0 123,0 120,0 111,0	23,0 24,0 24,0 25,0	-	29,5 29,5 29,5 29,5
Ultra-high-performance concrete with Iron ore tailings and non-metallic and hybrid fibers-A comprehensive experimental study.	1,0% 1,5% 2,0%	109,5 119,5 106,5	-	9,8 9,9 9,7	-
Mechanical and fracture characteristics of ultra-high performance concretes reinforced with hybridization of steel and glass fibers.	1,0%	158,0	-	9,1	-
Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high performance fiber reinforced concretes: Effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers.	1,0% 1,5% 2,0% 2,5% 3,0%	156,0 158,0 157,5 157,5 149,0	14,9 15,3 15,5 17,0 17,8	10,3 11,8 11,7 11,7 11,7	42,0 43,1 43,1 43,1 43,1
Média	1,0%	132,32	18,95	9,73	38,67
	1,5%	128,65	19,65	10,85	38,93

Fonte: Autora (2026).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como etapa de partida, realizou-se um levantamento bibliográfico de trabalhos focados no uso de fibras de vidro em matrizes de UHPC. O objetivo dessa busca consistiu em identificar as frações volumétricas de fibras capazes de proporcionar os melhores resultados para as propriedades mecânicas do compósito.

3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

Para a produção das misturas de Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC), empregaram-se os seguintes materiais constituintes: cimento do tipo CPV Ultra Rápido da marca Holcim; areia fina industrial com módulo de finura 80/100 e pó de quartzo (filler) do tipo SM 200, ambos oriundos da Mineração Jundu. A composição contou ainda com adição mineral de sílica ativa não densificada fornecida pela Elkem, além do aditivo superplastificante MC-POWERFLOW 4001 e água potável. Os materiais cimentícios e finos utilizados são apresentados na Figura 8, e o superplastificante utilizado, na Figura 9.

Figura 8 – Amostra dos materiais cimentícios e finos utilizados: (a) areia; (b) pó de quartzo; (c) sílica ativa; (d) cimento



(a) (b) (c) (d)

Fonte: Autora (2026).

Legenda: Amostras de materiais granulares e finos dispostas em círculos sobre fundo branco. (a) Areia de coloração bege clara e textura granular fina; (b) pó de quartzo de coloração branca e textura de pó extrafino; (c) sílica ativa de coloração cinza clara com presença de pequenos aglomerados; (d) cimento de coloração cinza escura característica.

Figura 9 – Superplastificante utilizado



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Vista superior de um béquer de vidro contendo um aditivo superplastificante líquido, que apresenta uma coloração alaranjada translúcida e aspecto viscoso.

Como reforço da matriz, adotaram-se microfibras de vidro (Figura 10) com 6 mm de comprimento, densidade de 0,91 g/cm³ (910 kg/m³) e resistência à tração de 1000 MPa.

Figura 10 – Microfibra de vidro



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Amostra de microfibra de vidro de coloração esbranquiçada e translúcida, apresentando filamentos curtos e picados, disposta em círculo sobre fundo cinza claro.

3.2 DOSAGEM E EXECUÇÃO DAS MISTURAS

Foram analisadas duas misturas de Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) com teores volumétricos de microfibra de vidro de 1% (UHPC 1) e 1,5% (UHPC 2). Ademais, incluiu-se uma mistura de referência sem adição de fibras (UHPC 3), visando avaliar o impacto desse reforço nas propriedades do material. O consumo dos materiais utilizados, baseado no estudo de Silva et al. (2024), encontra-se detalhado na Tabela 3. A dosagem adotada foi projetada para atingir uma resistência à compressão de aproximadamente 128 MPa aos 28 dias.

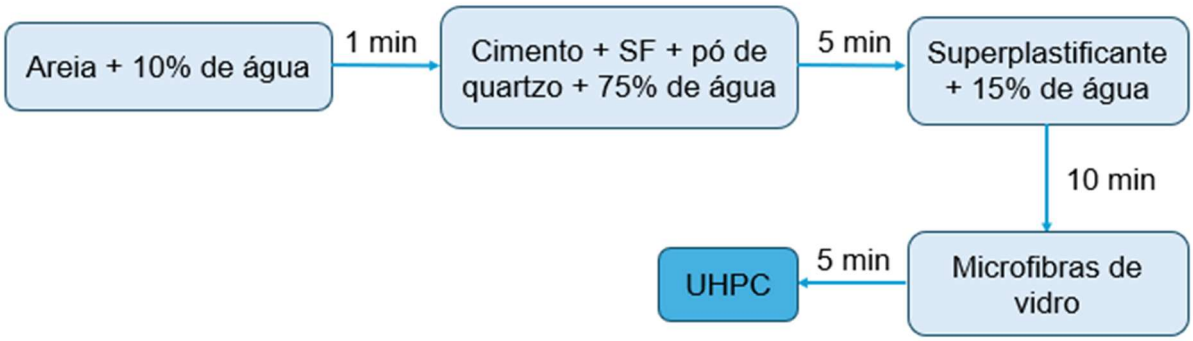
Tabela 3 – Traços usados nas misturas do UHPC

Materiais	UHPC 1 (kg/m³ de concreto)	UHPC 2 (kg/m³ de concreto)	UHPC 3 (kg/m³ de concreto)
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	757,20	757,20	757,20
Areia fina industrial (Módulo de finura 80/100 – Mineração Jundu)	950,00	950,00	950,0
Pó de quartzo (SM 200 Mineração Jundu)	50,00	50,00	50,00
Sílica ativa não densificada (Elkem)	230,00	230,00	230,00
Água	160,00	160,00	160,00
Superplastificante (ADVA 585) (1,43% massa cimento)	50,00	50,00	50,00
Microfibras de vidro	9,10	13,65	-

Fonte: Autora (2026).

A confecção dessas misturas ocorreu em argamassadeira mecânica sob um protocolo cronometrado, com o intuito de garantir a homogeneidade do compósito, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Procedimento da mistura



Fonte: Autora (2026).

A confecção dos corpos de prova obedeceu às diretrizes da norma ABNT NBR 5738:2016. Concluído o período de pega e de endurecimento inicial, as amostras passaram por um processo de cura em câmara úmida, sob temperatura de 25 °C, ao longo de 28 dias.

3.3 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Após a conclusão do ciclo de mistura, procedeu-se à avaliação das propriedades do compósito no estado fresco. Esta etapa inicial de caracterização é fundamental para verificar a trabalhabilidade e a fluidez da matriz cimentícia, características essenciais para garantir a correta moldagem dos corpos de prova, em especial devido à reduzida relação água/materiais secos típica do UHPC e a presença das microfibras de vidro.

3.3.1 Ensaio para Determinação do Índice de Consistência

Para a determinação do índice de consistência, a amostra foi moldada em um molde troncônico centralizado sobre a mesa de consistência (Figura 12), seguindo os preceitos da ABNT NBR 13276:2016. Na sequência, a mistura foi submetida a 30 quedas uniformes. O índice de consistência final foi obtido pela média aritmética de três medidas de diâmetro do espalhamento do material.

Figura 12 – Molde sobre a mesa de consistência



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Mesa de consistência metálica, mostrando o molde troncônico centralizado e preenchido com a amostra de UHPC.

A Figura 13 ilustra o procedimento de medição dos diâmetros de espalhamento dos traços de UHPC.

Figura 13 – Medição do diâmetro da amostra



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Amostra cinza espalhada de forma circular após a realização do ensaio. Uma trena amarela está estendida horizontalmente sobre o centro da massa para a medição do diâmetro do espalhamento, com a extremidade sendo segurada pela mão da operadora.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do concreto foram realizados aos 28 e 78 dias, além da idade equivalente a um ano, em conformidade com as normas brasileiras vigentes. A aplicação de carga durante os testes deu-se em uma prensa universal do tipo Instron-EMIC, sob velocidade de carregamento de 100 mm/min. Com o intuito de representar a durabilidade a longo prazo, adotou-se o ensaio de envelhecimento acelerado por meio de ciclos de imersão e secagem para simular o período de 12 meses. A Tabela 4 detalha o número de corpos de prova moldados para cada traço, organizados por tipo de ensaio.

Tabela 4 – Quantidade de corpos de prova moldados

Ensaios de caracterização do concreto	**UHPC 1**	**UHPC 2**	**UHPC 3**
Resistência à compressão uniaxial (f_c)	3	3	3
Resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$)	3	3	3
Resistência à tração na flexão (R_f)	3	3	3

Fonte: Autora (2026).

3.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial e Módulo de Elasticidade

A execução do ensaio ocorreu em corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, com o auxílio de uma prensa universal do tipo Instron-EMIC. O equipamento operou com velocidade de deslocamento de 100 mm/min, tendo como base as diretrizes gerais de preparo e centralização da amostra previstas na ABNT NBR 5739:2018. O cálculo da resistência à compressão baseou-se na expressão (1), que representa a divisão da força máxima alcançada pela área da seção transversal.

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \tag{1}$$

Sendo:

f_c: resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

F: força máxima, expressa em newtons (N);

D: diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Além disso, o ensaio viabilizou a determinação do módulo de elasticidade, parâmetro crucial para a análise da rigidez do compósito e para a previsão de deformações em serviço. Tal procedimento seguiu as prescrições da ABNT NBR 8522-1:2021, que define este parâmetro como o coeficiente angular da reta tangente à curva tensão-deformação na origem. Dentro do regime elástico, ele equivale ao módulo de deformação secante entre uma tensão inicial e 30% da resistência à compressão do concreto.

O módulo de elasticidade de cada corpo de prova foi calculado pela expressão (2).

$$E_{ci,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-3} \tag{2}$$

Onde

$E_{ci,i}$: módulo de elasticidade de cada corpo de prova, em gigapascals (GPa);

σ_b: tensão maior, considerada como 30% da resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

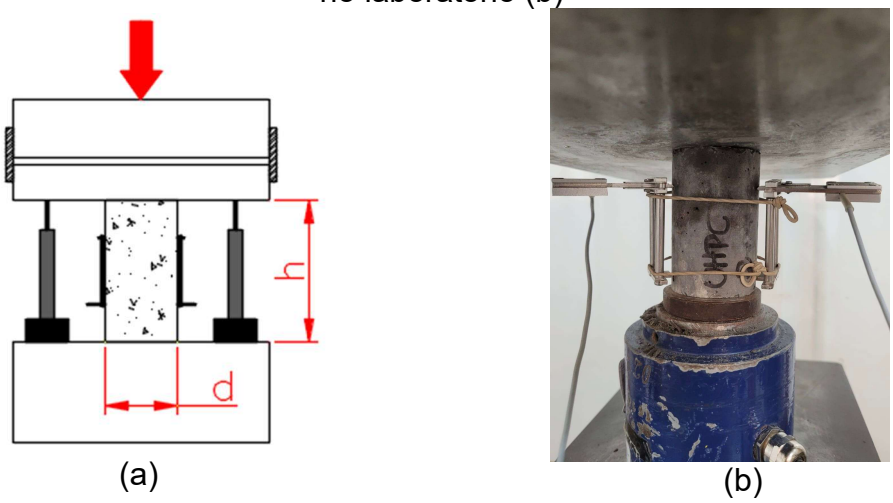
σ_a: tensão básica correspondente à deformação específica $50 * 10^{-6}$, expressa em megapascals (MPa);

ε_b: deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior.

Para obter a curva tensão-deformação, foram utilizados os sensores *clip-gages* que monitoram em tempo real o deslocamento lateral do corpo de prova quando submetido à tensão de compressão axial. Em operação conjunta, o registro da força de ruptura ocorreu por meio de uma célula de carga de 3,96 kgf posicionada sobre o corpo cilíndrico.

O esquema do ensaio de resistência à compressão axial é ilustrado na Figura 14a, ao passo que a Figura 14b apresenta a execução do ensaio em laboratório, utilizando a prensa previamente descrita.

Figura 14 – Ensaio de resistência à compressão axial esquematizado (a) e realizado no laboratório (b)



(a) (b)

Fonte: Autora (2026).
Legenda: À esquerda (a), esquema de um corpo de prova cilíndrico em compressão axial, indicando a altura (h) e o diâmetro (d), com sensores laterais para medição de deformação. À direita (b), fotografia do ensaio real, destacando o corpo de prova de concreto acoplado a um aparato de extensometria (clip-gage) preso por elásticos, posicionado entre o prato da prensa hidráulica e a célula de carga azul.

3.4.2 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

A realização do ensaio ocorreu em corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm, em total conformidade com as prescrições da ABNT NBR 13279:2005. Os prismas foram preparados com entalhes de 5 mm de altura por 5 mm de espessura no centro para induzir a formação de fissuras. Cada corpo de prova foi posicionado nos apoios do equipamento de modo que a face rasada ficasse isenta de contato com

os suportes ou com o dispositivo de carga. A resistência à tração na flexão baseou-se na equação (2).

$$R_f = \frac{1{,}5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \tag{2}$$

Sendo:

R_f: resistência à tração na flexão, em megapascals (MPa);

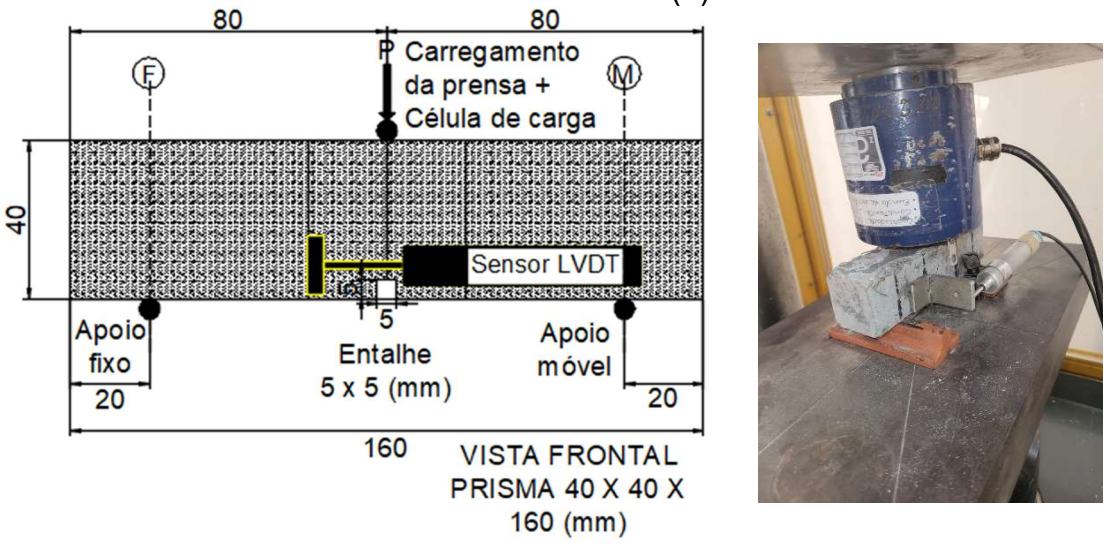
F_f: carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons (N);

L: distância entre os suportes, em milímetros (mm).

Para a obtenção da curva tensão-deslocamento, o deslocamento na região tracionada foi monitorado por meio de um transdutor de deslocamento posicionado na face inferior do corpo de prova. Ao mesmo tempo, o registro da força de ruptura foi realizado por uma célula de carga de 3,96 kgf posicionada sobre o corpo prismático.

A Figura 15a ilustra o esquema do ensaio de resistência à tração na flexão, enquanto a Figura 15b mostra a sua realização em laboratório, com o auxílio da prensa universal do tipo Instron-EMIC.

Figura 15 – Ensaio de resistência à tração na flexão esquematizado (a) e realizado no laboratório (b)



(a) (b)

Fonte: Autora (2026).

Legenda: À esquerda (a), vista frontal esquematizada de um prisma de 40 x 40 x 160 mm com entalhe central; o desenho detalha as cotas, os apoios (fixo e móvel), a aplicação de carga e o posicionamento horizontal de um sensor LVDT para medição de deslocamento. À direita (b), fotografia do ensaio real em prensa, mostrando o corpo de prova prismático sob a célula de carga azul e o transdutor posicionado lateralmente.

3.4.3 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

A execução do ensaio exigiu corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, em total conformidade com as prescrições da ABNT NBR 7222:2011. Para a realização do teste, posicionou-se o corpo de prova cilíndrico com o seu plano axial alinhado à direção de aplicação da carga. A resistência à tração por compressão diametral baseou-se na expressão (3).

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \tag{3}$$

Sendo:

$f_{ct,sp}$: resistência à tração por compressão diametral, em megapascals (MPa);

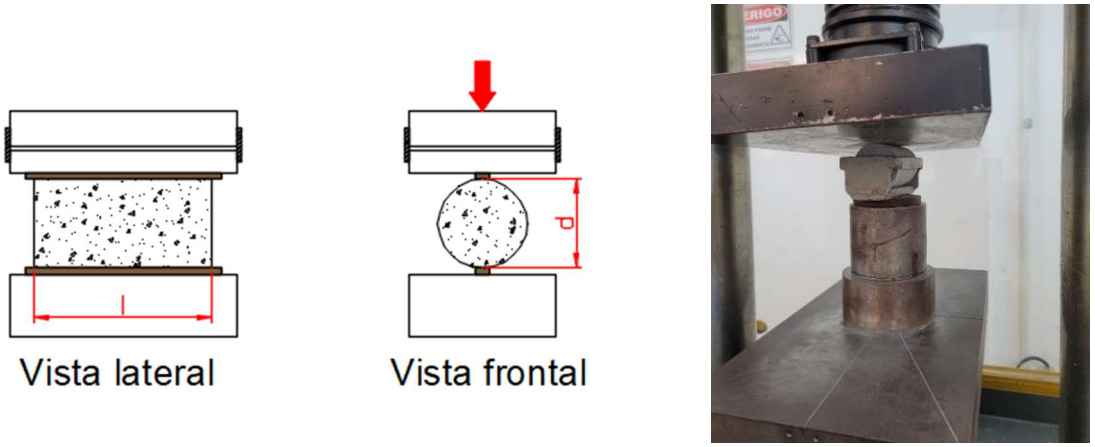
F: força máxima obtida no ensaio, expressa em newtons (N);

d: diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

l: comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

A Figura 16a ilustra o esquema do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, enquanto a Figura 16b mostra a sua realização em laboratório, com o auxílio da prensa universal do tipo Instron-EMIC.

Figura 16 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral esquematizado (a) e realizado no laboratório (b)



(a) (b)

Fonte: Autora (2026).
Legenda: À esquerda (a), esquemas técnicos mostram um corpo de prova cilíndrico em vistas longitudinal e transversal, posicionado horizontalmente entre os pratos de uma prensa; setas vermelhas indicam a aplicação de carga e as variáveis de comprimento (l) e diâmetro (d). À direita (b), fotografia real do ensaio sendo executado em uma prensa hidráulica de laboratório, com o cilindro de concreto posicionado sob suportes.

3.4.4 Ensaio de Envelhecimento Acelerado

Este ensaio foi realizado por meio de ciclos de imersão e secagem em corpos de prova prismáticos e cilíndricos (Figura 17), seguindo as diretrizes da ABNT NBR 15498:2021. Os corpos de prova foram imersos em água por um período de 18 horas e, em seguida, colocados em uma estufa ventilada a uma temperatura de (60 ± 5) °C e umidade relativa inferior a 20% por 6 horas. Esse ciclo foi repetido 50 vezes. Após a conclusão dos 50 ciclos, os corpos de prova foram mantidos submersos em água por um período adicional de 24 horas.

Ao final do período de envelhecimento, os corpos de prova foram avaliados por meio dos seguintes ensaios mecânicos: resistência à compressão, conforme a ABNT NBR 5739:2018; resistência à tração por compressão diametral, conforme a ABNT NBR 7222:2011; e resistência à tração na flexão, de acordo com a ABNT NBR 13279:2005.

Figura 17 – Ensaio de envelhecimento acelerado: (a) corpos de prova imersos em água e (b) corpos de prova em uma estufa ventilada



(a) (b)

Fonte: Autora (2026).
Legenda: À esquerda (a), vista superior de diversos corpos de prova cilíndricos e prismáticos de concreto imersos em um tanque com água. À direita (b), vista frontal de uma estufa laboratorial aberta, exibindo corpos de prova distribuídos em duas prateleiras internas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Os resultados obtidos para o índice de consistência das misturas de UHPC estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Média dos índices de consistência para cada traço

	UHPC 1	UHPC 2	UHPC 3
Índice de consistência médio (cm)	31,3	30,3	31,5

Fonte: Autora (2026).

Observa-se que todos os compósitos apresentaram elevada fluidez, com valores próximos de 30 cm, indicando adequada trabalhabilidade e potencial comportamento autoadensável das misturas.

O UHPC 3, produzido sem fibras, apresentou o maior índice de consistência médio (31,5 cm), resultado esperado devido à ausência de elementos fibrosos na matriz, corroborando o estudo de Yan et al. (2021). A incorporação das microfibras de vidro promoveu uma leve redução da fluidez, uma vez que as fibras aumentam o atrito interno entre os constituintes da mistura e dificultam o escoamento do material (Madhkhan; Saeidian, 2021; Yan et al., 2021).

Entre os compósitos reforçados, o UHPC 1, com 1% de microfibras de vidro, apresentou índice de consistência de 31,3 cm, enquanto o UHPC 2, com 1,5% de fibras, registrou o menor valor (30,3 cm). Esse comportamento evidencia que o aumento do teor de fibras tende a reduzir a mobilidade da mistura (Breschi; Filho; Américo, 2020), devido à maior interação entre as fibras e a matriz cimentícia, além da possibilidade de formação de pontos de retenção durante o fluxo.

Apesar dessa redução, a diferença observada entre os traços foi inferior a 1,5 cm, demonstrando que os compósitos mantiveram boa mobilidade em escala macroscópica. O proporcionamento adotado e o uso de aditivo superplastificante viabilizaram o escoamento global e a moldagem das peças. Contudo, a leve restrição de fluxo registrada no UHPC 2 já sinaliza o início do entrelaçamento dos filamentos. Esse comportamento no estado fresco corrobora a dificuldade de empacotamento pleno e antecipa a formação das aglomerações microestruturais.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

As Tabelas 6, 7 e 8 reúnem os resultados experimentais de resistência à compressão axial para os traços UHPC 1, UHPC 2 e UHPC 3, respectivamente. Os traços contendo microfibras de vidro (UHPC 1 e UHPC 2) tiveram seu desempenho avaliado aos 28 dias, 78 dias e após o período de envelhecimento acelerado. O traço de referência (UHPC 3) apresenta os dados referentes à idade inicial de 28 dias. Além dos valores individuais de ruptura em megapascals (MPa), as tabelas informam a resistência média em megapascals (MPa), o desvio padrão e o coeficiente de variação em porcentagem (%).

Tabela 6 – Resistência à compressão axial do UHPC 1

	Resistência à compressão (MPa)		
	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado
CP1	76,57	76,36	95,92
CP2	74,59	75,99	96,53
CP3	90,48	70,45	101,35
Média (MPa)	80,55	74,27	97,94
Desvio padrão	8,66	3,31	2,97
Coeficiente de variação (%)	10,75	4,46	3,04

Fonte: Autora (2026).

Tabela 7 – Resistência à compressão axial do UHPC 2

	Resistência à compressão (MPa)		
	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado
CP1	78,77	58,86	61,44
CP2	61,55	64,18	56,64
CP3	66,16	63,79	60,56
Média (MPa)	68,82	62,28	59,55
Desvio padrão	8,91	2,96	2,56
Coeficiente de variação (%)	12,95	4,76	4,30

Fonte: Autora (2026).

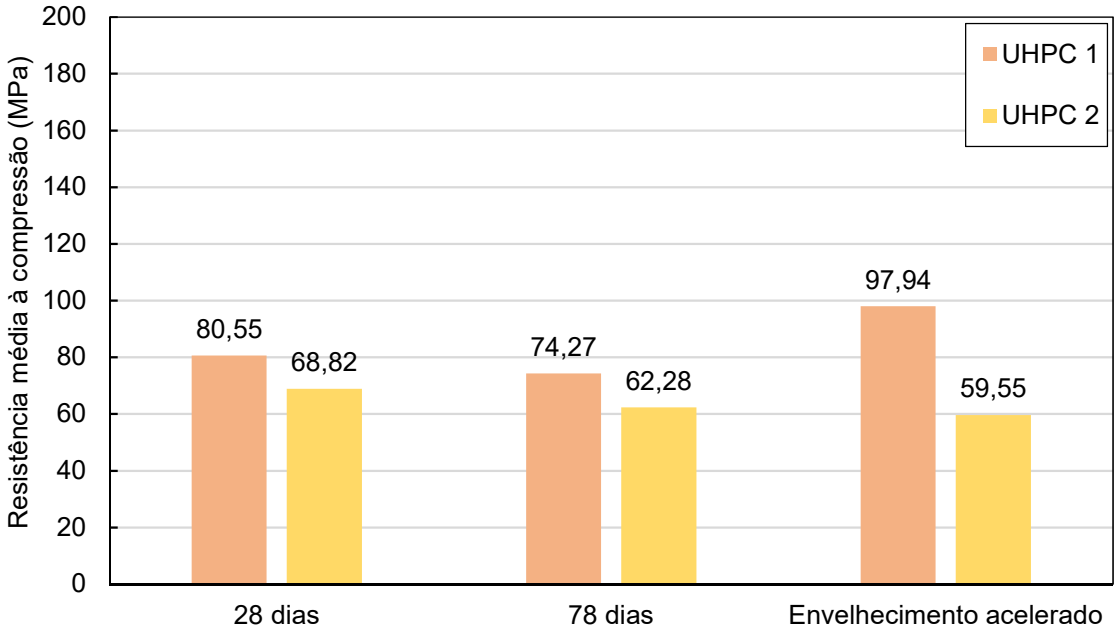
Tabela 8 – Resistência à compressão axial do UHPC 3

	Resistência à compressão (MPa)
	28 dias
CP1	65,78
CP2	52,12
CP3	69,83
Média (MPa)	62,57
Desvio padrão	9,28
Coeficiente de variação (%)	14,83

Fonte: Autora (2026).

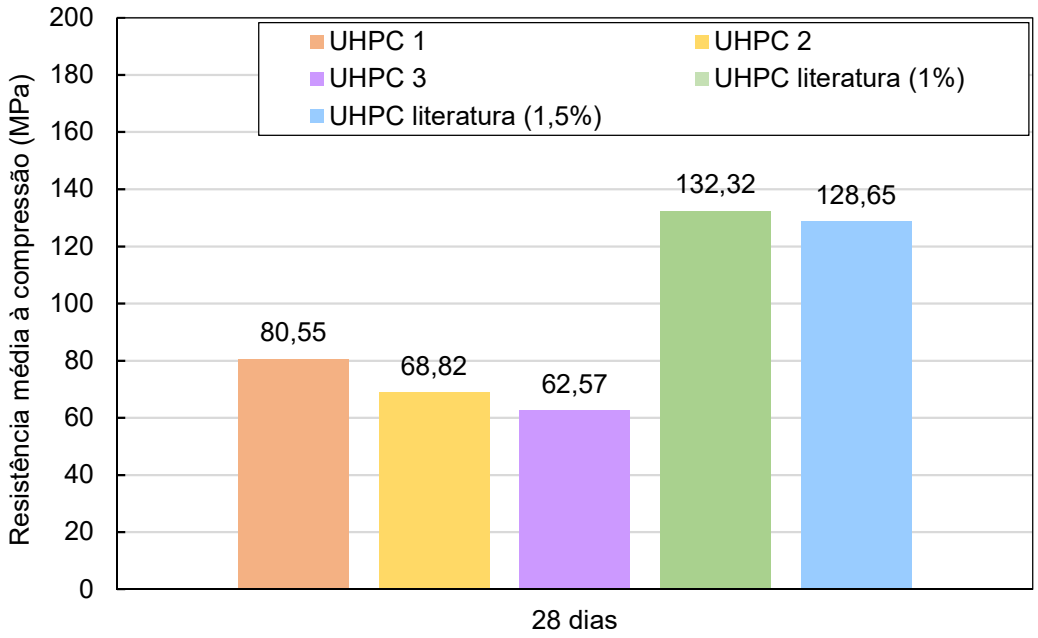
As resistências médias à compressão axial para as misturas de UHPC desenvolvidas são apresentados nas Figuras 18 e 19. Na Figura 18, analisa-se o comportamento mecânico dos traços UHPC 1 e UHPC 2 ao longo do tempo (28 e 78 dias) e o impacto do envelhecimento acelerado sobre a integridade das amostras. Em conjunto a esses dados, a Figura 19 estabelece um comparativo direto, aos 28 dias, entre as três dosagens experimentais (UHPC 1, 2 e 3) e valores de referência reportados na literatura para concretos de ultra-alto desempenho com diferentes teores de fibras, permitindo aferir a eficiência das misturas produzidas em relação ao estado da arte.

Figura 18 – Resistência média à compressão axial sob três condições de cura: aos 28 dias, 78 dias e após envelhecimento acelerado



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico de colunas comparando a resistência média à compressão de duas misturas. O eixo vertical exibe os valores em MPa e o eixo horizontal as condições de cura. Aos 28 dias, o UHPC 1 (barras laranjas) atinge 80,55 MPa e o UHPC 2 (barras amarelas) marca 68,82 MPa. Aos 78 dias, os valores são 74,27 MPa e 62,28 MPa, na mesma ordem. Após o envelhecimento acelerado, o UHPC 1 alcança 97,94 MPa e o UHPC 2 registra 59,55 MPa.

Figura 19 – Resistência média à compressão axial aos 28 dias



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico de colunas comparando a resistência média à compressão aos 28 dias de cinco formulações. O eixo vertical indica os valores em MPa e o eixo horizontal sinaliza a idade de ensaio. Da esquerda para a direita, as colunas exibem os seguintes resultados numéricos no topo: o UHPC 1 (laranja) atinge 80,55 MPa; o UHPC 2 (amarelo) marca 68,82 MPa; o UHPC 3 (roxo) registra 62,57 MPa. Em seguida, os dados de referência apontam 132,32 MPa para o UHPC da literatura com 1% de fibras (verde) e 128,65 MPa para o UHPC da literatura com 1,5% de fibras (azul).

Como pode-se observar na Figura 18, os resultados de resistência à compressão evidenciam diferenças claras entre os traços de UHPC com 1% e 1,5% de microfibras de vidro ao longo do tempo e sob envelhecimento acelerado.

Aos 28 dias, o UHPC 1 apresenta resistência média de 80,55 MPa, enquanto o UHPC 2 atinge 68,82 MPa, o que apresenta uma redução de 14,56%. Esse resultado indica melhor desempenho do traço com menor teor de fibras, corroborando o estudo de Yan et al. (2021). O aumento do teor para 1,5% pode ter dificultado a dispersão uniforme das microfibras, gerando aglomerações locais (Muhyaddin, 2023). Essas aglomerações atuam como concentradores de tensão que antecipam a ruptura do material sob compressão.

Aos 78 dias, observa-se uma redução da resistência em ambas as misturas. O UHPC 1 passa para 74,27 MPa, enquanto o UHPC 2 reduz para 62,28 MPa, gerando uma diferença de 16,14% entre as duas misturas nessa idade. Embora esse comportamento fuja do ganho de resistência esperado com o tempo, as quedas em relação aos 28 dias não foram expressivas (7,8% para o UHPC 1 e 9,5% para o UHPC 2). Isso sugere uma tendência de estabilização nos valores de resistência à compressão, indicando que a leve redução está provavelmente associada à dispersão

natural dos resultados, como a variabilidade dos corpos de prova, pequenas alterações nas condições de cura ou a presença de microdefeitos internos.

No envelhecimento acelerado, os traços apresentam comportamentos opostos. O UHPC 1 registra um aumento de 21,59% na resistência em relação aos 28 dias e de 31,87% em relação aos 78 dias, atingindo 97,94 MPa. Segundo Madhkhan e Saeidian (2021), as amostras com menor teor de fibras de vidro apresentam maior resistência à compressão após esta condição de cura. Embora o avanço dos produtos de hidratação possa enfraquecer as fibras de vidro na matriz cimentícia, a resistência à compressão dos compósitos submetidos ao envelhecimento acelerado tende a aumentar devido à intensificação das reações de hidratação. A formação adicional de produtos hidratados, em especial o gel C-S-H, contribui para o refinamento da microestrutura e para o fortalecimento da matriz do concreto, resultando em melhor desempenho mecânico à compressão.

Por outro lado, o UHPC 2 apresenta uma redução de 13,47% na resistência comparado aos 28 dias e de 4,38% frente aos 78 dias, chegando a 59,55 MPa, gerando uma diferença de 39,20% em relação ao desempenho do UHPC 1 na mesma idade. Esse comportamento indica que o maior teor de microfibras (1,5%) pode ter contribuído para a formação de descontinuidades na matriz ou dificultado a acomodação interna do material, tornando-o mais sensível aos efeitos do envelhecimento.

Como pode ser observado na Figura 19, o traço sem fibras (UHPC 3) aos 28 dias apresenta uma resistência média de 62,57 MPa, configurando uma redução de 22,32% em relação ao UHPC 1 e de 9,08% em relação ao UHPC 2. Esse desempenho inferior frente aos traços com adição de microfibras apresenta um comportamento semelhante ao observado no estudo de Madhkhan e Saeidian (2021). Esse resultado indica que a presença de fibras contribui para o aumento da resistência à compressão, fato associado à restrição da propagação de microfissuras e melhora do comportamento interno da matriz (Muhyaddin, 2023). No entanto, ao comparar os três traços, verifica-se que o UHPC 2, mesmo com maior teor de fibras, não supera o UHPC 1, o que reforça que o aumento do teor não resulta em melhoria do desempenho.

Ao comparar com a literatura, nota-se que os resultados experimentais ficaram aquém do esperado. Enquanto as referências indicam resistências de 132,32 MPa (teor de 1%) e 128,65 MPa (teor de 1,5%), os traços produzidos apresentaram valores

39,12% e 46,51% menores, respectivamente. Essa diferença pode estar associada a fatores como materiais utilizados, proporções da mistura e condições de cura, que influenciam de forma direta a densidade da matriz e, por consequência, a resistência obtida.

Quanto à variabilidade, os coeficientes de variação indicam boa repetibilidade dos ensaios. O UHPC 1 apresenta redução da variabilidade ao longo do tempo, passando de 10,75% para 3,04%, o que indica maior uniformidade após o envelhecimento. O UHPC 2 também apresenta redução, de 12,95% para 4,30%, embora seus valores médios permaneçam inferiores. O UHPC 3 apresenta coeficiente de variação de 14,83%, indicando maior dispersão dos resultados, o que pode estar associado à ausência de fibras e à menor capacidade de redistribuição de tensões internas.

De forma geral, os resultados mostram que o aumento do teor de microfibras de vidro de 1% para 1,5% não resultou em ganho de resistência à compressão, corroborando o estudo de Yan et al. (2021). Pelo contrário, o traço com menor teor apresentou melhor desempenho e maior estabilidade frente ao envelhecimento. Além disso, a ausência de fibras resultou nos menores valores de resistência, evidenciando sua contribuição para o desempenho mecânico. Assim, para a resistência à compressão, o excesso de fibras pode comprometer a integridade da matriz, afetando a densificação e o empacotamento das partículas.

4.2.1 Módulo de Elasticidade

Os resultados quantitativos referentes à rigidez das matrizes estudadas estão consolidados nas Tabelas 9, 10 e 11, que apresentam os valores obtidos para o Módulo de Elasticidade (em GPa) dos traços UHPC 1, UHPC 2 e UHPC 3, respectivamente. Nestas tabelas, encontram-se detalhados os resultados individuais de cada corpo de prova, bem como os parâmetros estatísticos de controle (média, desvio padrão e coeficiente de variação). É importante ressaltar que, enquanto as amostras reforçadas (UHPC 1 e UHPC 2) foram avaliadas nas idades de 28 e 78 dias, além da condição de envelhecimento acelerado, a análise do traço de controle (UHPC 3) concentrou-se exclusivamente na idade de referência de 28 dias. A compilação desses dados permite uma avaliação objetiva da evolução da rigidez do compósito frente às metodologias de cura aplicadas e às variações de dosagem propostas.

Tabela 9 – Módulo de elasticidade do UHPC 1

	Módulo de elasticidade (GPa)		
	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado
CP1	32,15	23,38	36,89
CP2	33,69	24,22	41,37
CP3	28,27	20,56	40,01
Média (GPa)	31,37	22,72	39,42
Desvio padrão	2,79	1,92	2,29
Coeficiente de variação (%)	8,90	8,43	5,82

Fonte: Autora (2026).

Tabela 10 – Módulo de elasticidade do UHPC 2

	Módulo de elasticidade (GPa)		
	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado
CP1	49,23	40,97	38,89
CP2	50,22	42,04	39,54
CP3	52,14	44,58	43,34
Média (GPa)	50,53	42,53	40,59
Desvio padrão	1,48	1,85	2,40
Coeficiente de variação (%)	2,93	4,36	5,92

Fonte: Autora (2026).

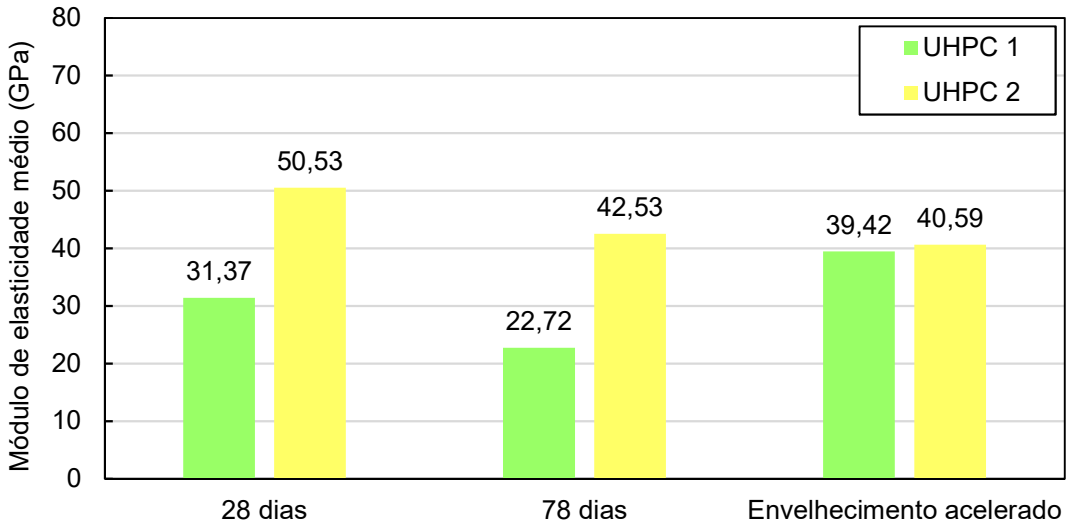
Tabela 11 – Módulo de elasticidade do UHPC 3

	Módulo de elasticidade (GPa)
	28 dias
CP1	32,89
CP2	35,53
CP3	43,04
Média (GPa)	37,16
Desvio padrão	5,26
Coeficiente de variação (%)	14,17

Fonte: Autora (2026).

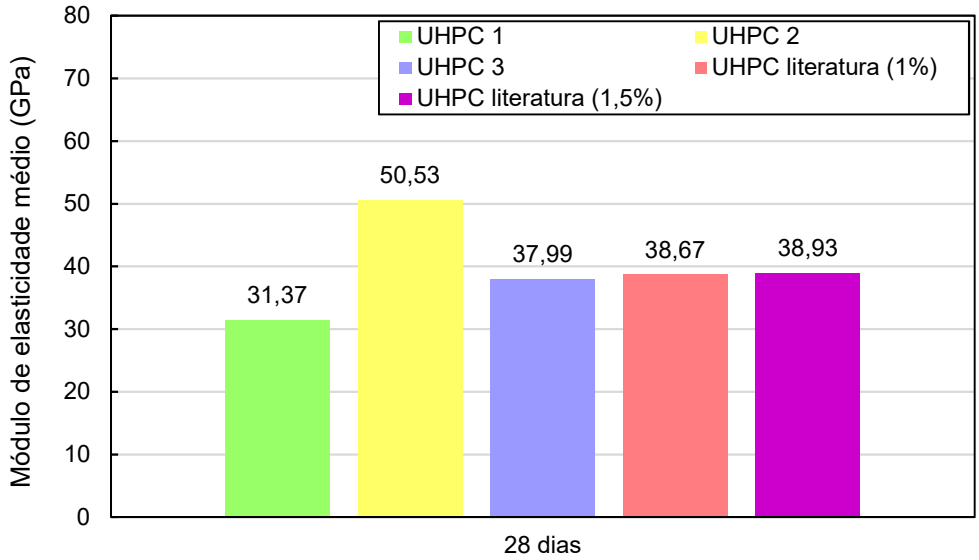
Para facilitar a visualização e a análise comparativa dos resultados tabulados acima, as Figuras 20 e 21 apresentam os valores médios do módulo de elasticidade. A Figura 20 ilustra a evolução da rigidez das matrizes reforçadas (UHPC 1 e 2) sob as três condições de cura avaliadas (28 dias, 78 dias e envelhecimento acelerado). Em complemento, a Figura 21 foca na idade de referência de 28 dias e estabelece um paralelo claro entre os três traços experimentais desenvolvidos (incluindo a matriz de controle, UHPC 3), além de comparar os resultados destes compósitos com valores encontrados na literatura.

Figura 20 – Módulo de elasticidade médio sob três condições de cura: aos 28 dias, aos 78 dias e após envelhecimento acelerado



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico de barras comparando o módulo de elasticidade médio (em GPa, no eixo das ordenadas) dos traços UHPC 1 (barras em verde claro) e UHPC 2 (barras em amarelo) sob três diferentes condições de cura (eixo das abscissas). Aos 28 dias, o UHPC 1 apresenta 31,37 GPa e o UHPC 2 atinge 50,53 GPa. Aos 78 dias, os valores reduzem para 22,72 GPa no UHPC 1 e 42,53 GPa no UHPC 2. Após o envelhecimento acelerado, os módulos se aproximam, registrando 39,42 GPa para o UHPC 1 e 40,59 GPa para o UHPC 2.

Figura 21 – Módulo de elasticidade médio aos 28 dias



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico de barras ilustrando a comparação do módulo de elasticidade médio (em GPa, no eixo das ordenadas) aos 28 dias. O eixo das abscissas agrupa cinco barras correspondentes a diferentes traços: UHPC 1 com 31,37 GPa (barra verde clara), UHPC 2 com 50,53 GPa (barra amarela), UHPC 3 com 37,99 GPa (barra azul claro), além de dois traços de referência denominados UHPC literatura (1%) com 38,67 GPa (barra salmão) e UHPC literatura (1,5%) com 38,93 GPa (barra magenta).

Os resultados apresentados na Figura 20 indicam diferenças significativas no módulo de elasticidade médio entre os traços analisados e entre as condições de cura avaliadas. De forma geral, o UHPC 2 apresentou valores superiores ao UHPC 1 em quase todas as condições, evidenciando maior rigidez do compósito com 1,5% de microfibras de vidro. As Figuras 22, 23 e 24 apresentam os trechos elásticos das curvas tensão-deformação utilizados para o cálculo dos módulos de elasticidade dos compósitos analisados.

Aos 28 dias, o UHPC 1 apresentou módulo de elasticidade médio de 31,37 GPa, enquanto o UHPC 2 atingiu 50,53 GPa. Esse expressivo aumento de 61,08% é um comportamento que corrobora os achados de Mohammed et al. (2021). Esse comportamento sugere que o maior teor de fibras contribuiu para o aumento da rigidez do compósito, resultando em menor capacidade de deformação elástica sob carregamento inicial. No regime elástico, sob baixos níveis de tensão, a matriz cimentícia se manteve suficientemente densa para garantir a transferência de carga para as microfibras de vidro. A restrição física promovida por essa rede de fibras no interior da matriz ajudou a conter a deformação inicial e elevou o módulo do compósito.

Na idade de 78 dias, observa-se redução do módulo de elasticidade em ambos os traços. O UHPC 1 apresentou 22,72 GPa, enquanto o UHPC 2 registrou 42,53 GPa, o que representa um aumento de 87,19% entre as misturas. Essa diminuição de 27,57% e de 15,83%, respectivamente, em relação à idade de 28 dias, pode estar relacionada a alterações microestruturais decorrentes do processo de cura, que podem ter favorecido o surgimento de microfissuras internas e reduzido a rigidez do material. No caso do UHPC 1, a queda foi mais pronunciada, demonstrando maior sensibilidade da matriz com menor teor de fibras. Já o UHPC 2 manteve valores bastante elevados de módulo de elasticidade, indicando maior rigidez da matriz cimentícia mesmo após 78 dias.

Após o envelhecimento acelerado, os resultados revelam um comportamento distinto entre os traços. O UHPC 1 exibiu um ganho notável no módulo de elasticidade, atingindo a marca de 39,42 GPa. Esse valor representa um aumento de 25,66% em relação aos 28 dias e de 73,50% em relação aos 78 dias. Esse fenômeno se associa à continuidade das reações pozolânicas e da hidratação residual sob o estímulo da alta temperatura, o que propiciou o refinamento da microestrutura e a redução dos vazios internos.

Por outro lado, o UHPC 2 apresentou redução em sua rigidez, com queda para 40,59 GPa, o que equivale a perdas de 19,67% e 4,56% em relação aos 28 e 78 dias, respectivamente. Com essa diminuição, a diferença de módulo de elasticidade em relação ao UHPC 1 na mesma idade tornou-se pouco significativa, situando-se em apenas 2,97%. A aproximação dos resultados entre os dois traços decorre, portanto, de mecanismos inversos. Enquanto o UHPC 1 teve sua estrutura aprimorada pela cura térmica, o UHPC 2 sofreu degradação decorrente do envelhecimento. Esse declínio do módulo de elasticidade do UHPC 2 guarda total coerência com a queda drástica observada em sua resistência à compressão, o que confirma o impacto prejudicial da ação térmica associada ao teor mais alto de fibras (1,5%).

Como pode ser observado na Figura 21, o UHPC 1 apresentou módulo de elasticidade inferior, configurando uma redução de 17,43% em relação ao UHPC 3 (37,99 GPa) e de 18,88% frente ao valor da literatura para compósitos com 1% de fibras (38,67 GPa). Esse comportamento pode estar relacionado à composição da matriz cimentícia, ao empacotamento das partículas, às condições de cura e à dispersão das fibras no interior do compósito. Pequenas variações microestruturais e a presença de vazios internos podem influenciar de forma direta a rigidez do material.

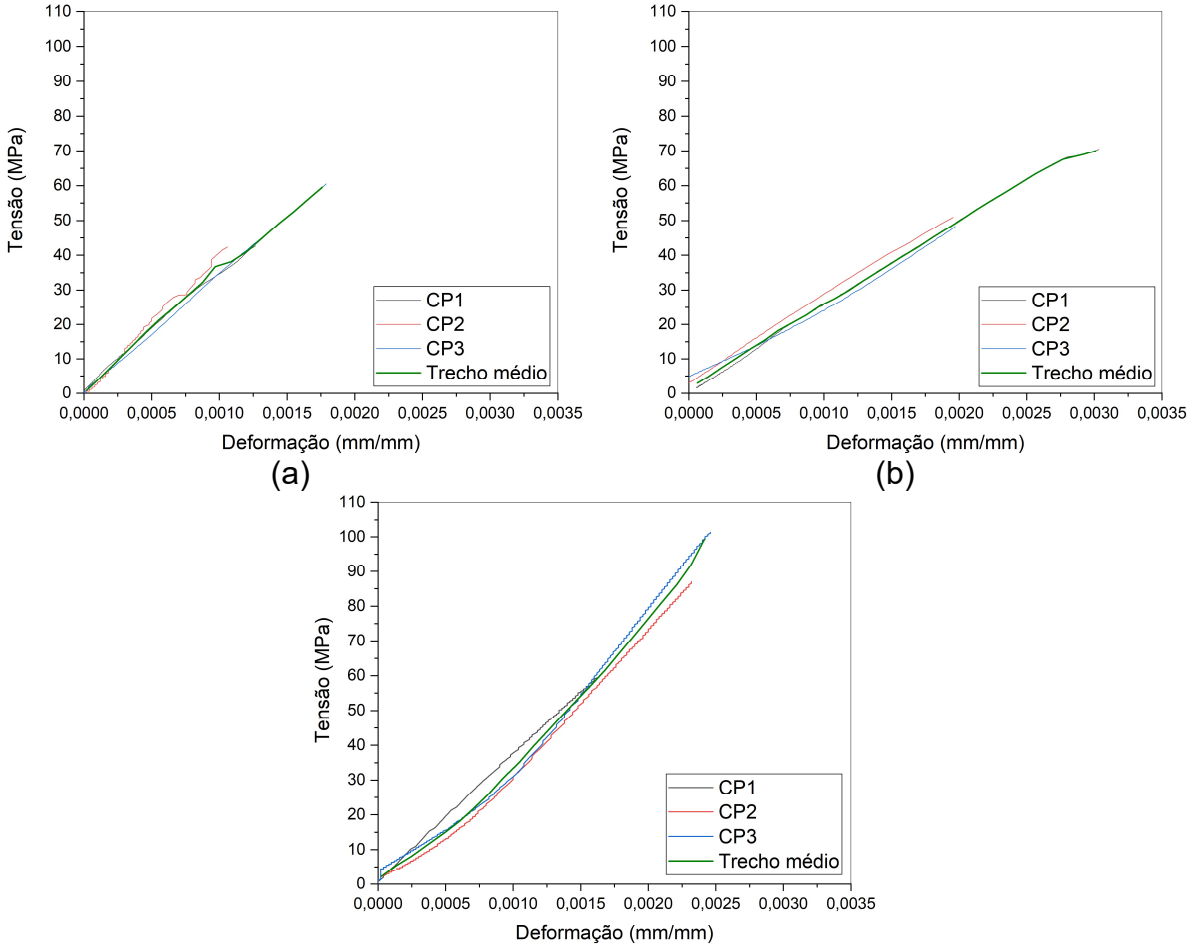
Em contrapartida, o UHPC 2 apresentou módulo de elasticidade superior, registrando um aumento de 29,80% em relação ao valor reportado na literatura para compósitos com 1,5% de fibras (38,93 GPa) e de 33% em relação ao UHPC 3 (37,99 GPa). Esse resultado indica que o aumento do teor de microfibras favoreceu de forma expressiva a rigidez do compósito, evidenciando que a incorporação de 1,5% de fibras contribuiu de maneira mais efetiva para a resposta elástica do material quando comparada ao traço sem reforço fibroso. Como discutido anteriormente, essa superioridade confirma a eficácia da rede de fibras em promover a restrição física e conter o alongamento elástico sob baixos níveis de tensão.

Em relação à variabilidade dos resultados, os coeficientes de variação indicam boa repetibilidade dos ensaios de módulo de elasticidade para os compósitos analisados. O UHPC 2 apresentou os menores níveis de dispersão, com coeficientes de variação entre 2,93% e 5,92%, demonstrando maior uniformidade do comportamento mecânico do compósito com 1,5% de microfibras de vidro. O UHPC 1 apresentou dispersão moderada, com valores entre 5,82% e 8,90%, enquanto o UHPC 3 registrou o maior coeficiente de variação (14,17%), indicando maior variabilidade dos corpos de prova. De forma geral, os resultados sugerem que a

incorporação de microfibras contribuiu para maior estabilidade e repetibilidade dos resultados experimentais.

Em síntese, os resultados indicam que o teor de microfibras influencia de forma significativa a rigidez inicial do UHPC (Mohammed et al., 2021), em especial nas idades de 28 e 78 dias. Contudo, após o envelhecimento acelerado, os compósitos atingiram módulos de elasticidade próximos devido a mecanismos inversos. Esse cenário evidencia que, sob ação térmica, o traço com menor teor de fibras eleva sua rigidez por meio da densificação da matriz, ao passo que o compósito com maior volume de fibras (1,5%) sofre degradação e perde capacidade elástica. A convergência dos valores finais reflete, portanto, o balanço entre o avanço da hidratação residual e o dano estrutural causado pela temperatura, e não uma melhoria conjunta dos materiais.

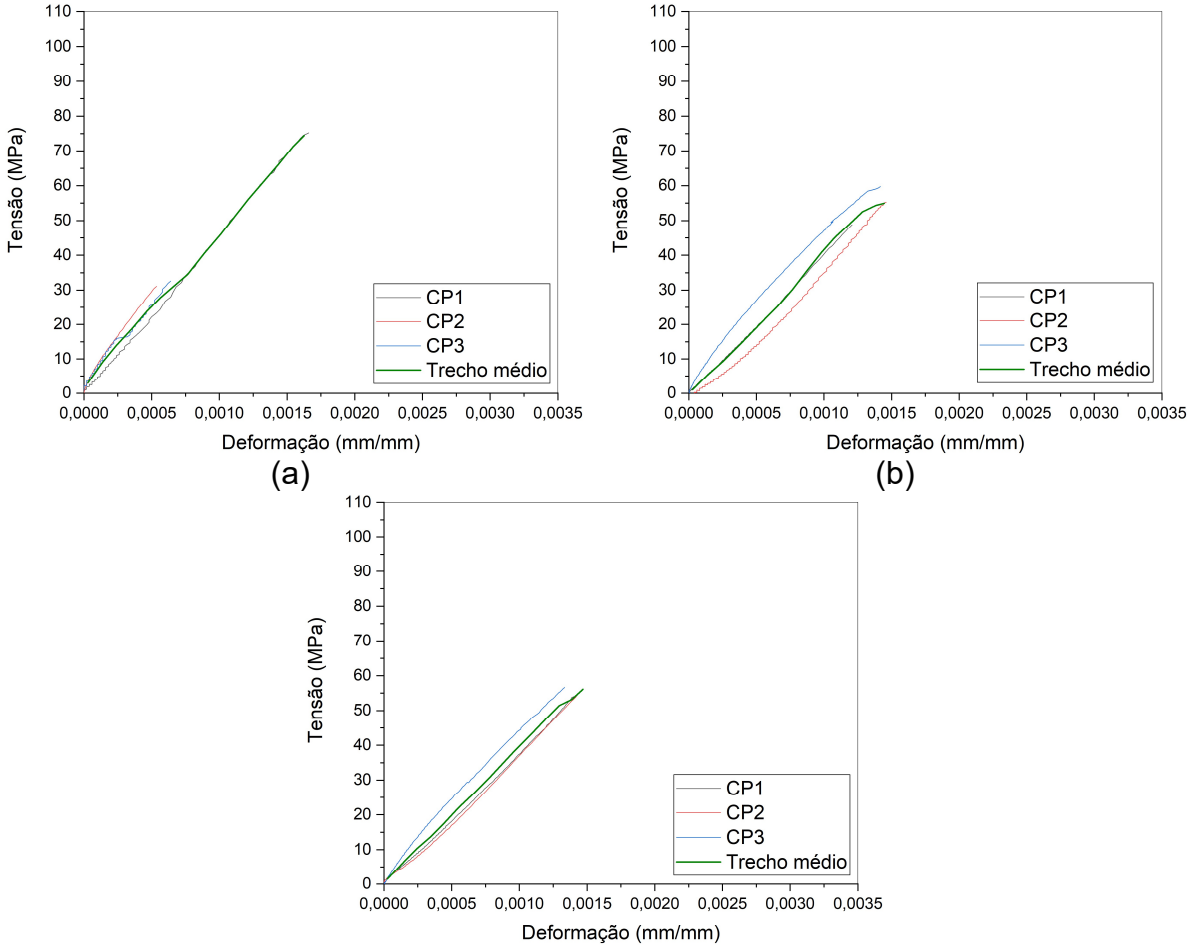
Figura 22 – Trechos elásticos do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c)



Fonte: Autora (2026).

Legenda: Gráficos (a, b e c) ilustrando a relação entre tensão (em MPa, no eixo das ordenadas) e deformação (em mm/mm, no eixo das abscissas) para o traço UHPC 1. O gráfico (a) refere-se aos 28 dias, o (b) aos 78 dias e o (c) à condição de envelhecimento acelerado. Cada gráfico exibe o trecho inicial elástico de três corpos de prova (CP1, CP2 e CP3), além de uma reta verde indicando o trecho médio.

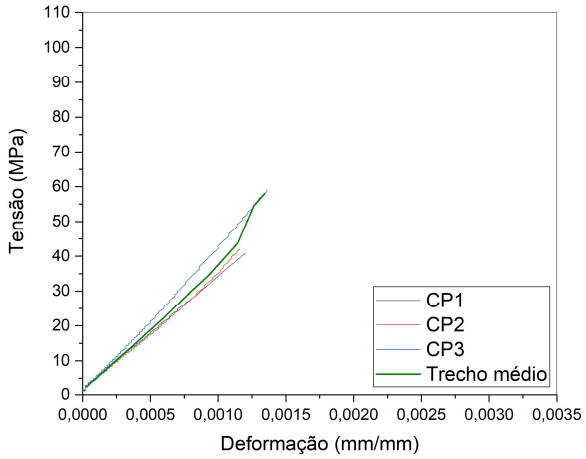
Figura 23 – Trechos elásticos do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c)



Fonte: Autora (2026).

Legenda: Gráficos (a, b e c) ilustrando a relação entre tensão (em MPa, no eixo das ordenadas) e deformação (em mm/mm, no eixo das abscissas) para o traço UHPC 2. O gráfico (a) corresponde à idade de 28 dias, o (b) aos 78 dias e o (c) à condição de envelhecimento acelerado. Todos os gráficos apresentam o trecho inicial elástico de três corpos de prova (CP1, CP2 e CP3) e uma reta verde indicando o trecho médio.

Figura 24 – Trechos elásticos do UHPC 3 aos 28 dias



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico ilustrando a relação entre tensão (em MPa, no eixo das ordenadas) e deformação (em mm/mm, no eixo das abscissas) para o traço UHPC 3 (controle) aos 28 dias. O gráfico exibe o trecho inicial elástico de três corpos de prova (CP1, CP2 e CP3), além de uma reta verde indicando o trecho médio.

4.2.2 Modo de Ruptura

As Figuras 25, 26 e 27 ilustram o aspeto final das amostras de UHPC 1, UHPC 2 e UHPC 3, respetivamente, após serem submetidas aos ensaios de compressão axial. Estas imagens permitem observar como a variação dos traços e as diferentes condições de cura influenciaram a manutenção da integridade física e a capacidade de redistribuição de tensões das amostras após atingirem a carga de pico.

De modo geral**,** a ruptura manifestou-se de maneira abrupta e ruidosa, denotando um comportamento predominantemente frágil da matriz cimentícia. Houve expressiva desagregação dos constituintes, o que resultou no lascamento periférico e na projeção de fragmentos a partir do corpo principal. Importa salientar que, mesmo nas amostras UHPC 1 e UHPC 2, a atuação do reforço fibroso não contribuiu para a contenção da fragmentação nem para a preservação parcial da integridade pós-ruptura, assemelhando-se ao comportamento de ruptura total observado no UHPC 3, desprovido de fibras. Esse cenário indica que a elevada energia de deformação acumulada na matriz superou a capacidade de ponteamento das fibras, inviabilizando qualquer efeito significativo de costura ou ductilidade residual após o colapso.

Figura 25 – Corpos de prova rompidos do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c)

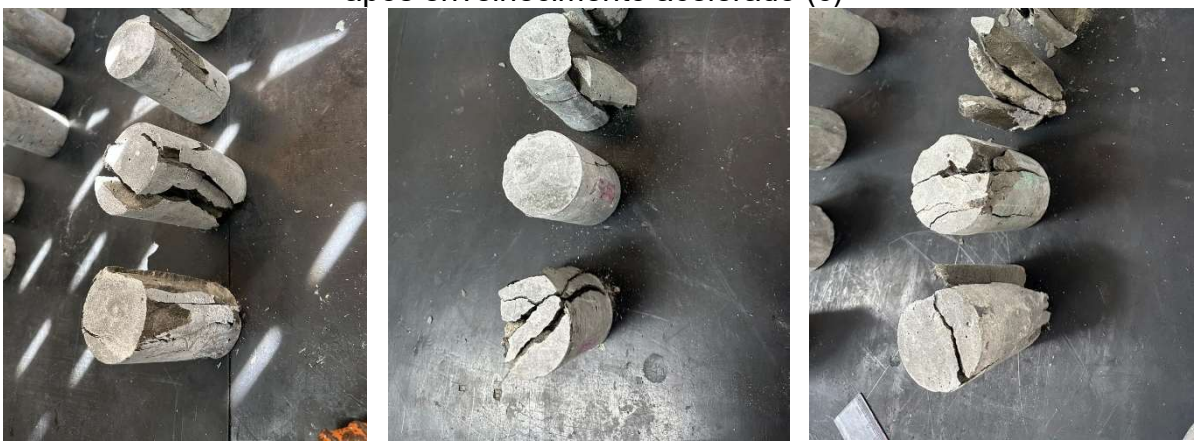


(a) (b) (c)

Fonte: Autora (2026).

Legenda: Corpos de prova cilíndricos do UHPC 1 após o ensaio de compressão. Em (a), nota-se uma desintegração maior com fragmentos destacados; em (b) e (c), observam-se fissuras longitudinais e transversais profundas com princípio de separação de massa.

Figura 26 – Corpos de prova rompidos do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c)



(a) (b) (c)

Fonte: Autora (2026)

Legenda: Corpos de prova cilíndricos do UHPC 2 após o ensaio de compressão. Em (a), (b) e (c), observam-se fissuras longitudinais e transversais profundas com princípio de separação de massa.

Figura 27 – Corpos de prova rompidos do UHPC 3 aos 28 dias



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Corpos de prova cilíndricos do UHPC 3 após rompimento em ensaio de compressão aos 28 dias. As peças estão dispostas sobre uma superfície escura com marcações de luz e sombra. O material sofreu colapso estrutural visível, resultando em pedaços e seções fraturadas com fissuras longitudinais que atravessam a massa do concreto.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

As Tabelas 12, 13 e 14 reúnem os resultados experimentais de resistência à tração na flexão para os traços UHPC 1, UHPC 2 e UHPC 3, respectivamente. Para os traços com adição de microfibras, o desempenho mecânico foi monitorado aos 28 dias, 78 dias e após o envelhecimento acelerado. Já para o UHPC 3, utilizado como referência sem fibras, os dados contemplam a idade de 28 dias. Em todos os casos, apresentam-se os valores individuais de ruptura em megapascals (MPa), a resistência média em megapascals (MPa), o desvio padrão e o coeficiente de variação em porcentagem (%), fornecendo uma visão detalhada da dispersão e da repetibilidade dos ensaios.

Tabela 12 – Resistência à tração na flexão do UHPC 1

	Resistência à tração na flexão (MPa)		
	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado
CP1	12,37	16,67	10,48
CP2	13,05	16,21	12,19
CP3	12,31	15,47	11,52
Média (MPa)	12,58	16,12	11,40
Desvio padrão	0,41	0,53	0,86
Coeficiente de variação (%)	3,26	3,77	7,54

Fonte: Autora (2026).

Tabela 13 – Resistência à tração na flexão do UHPC 2

	Resistência à tração na flexão (MPa)		
	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado
CP1	13,17	12,57	15,47
CP2	13,91	13,16	12,65
CP3	13,36	12,86	14,39
Média (MPa)	13,48	12,86	14,17
Desvio padrão	0,38	0,30	1,42
Coeficiente de variação (%)	2,84	2,32	10,01

Fonte: Autora (2026).

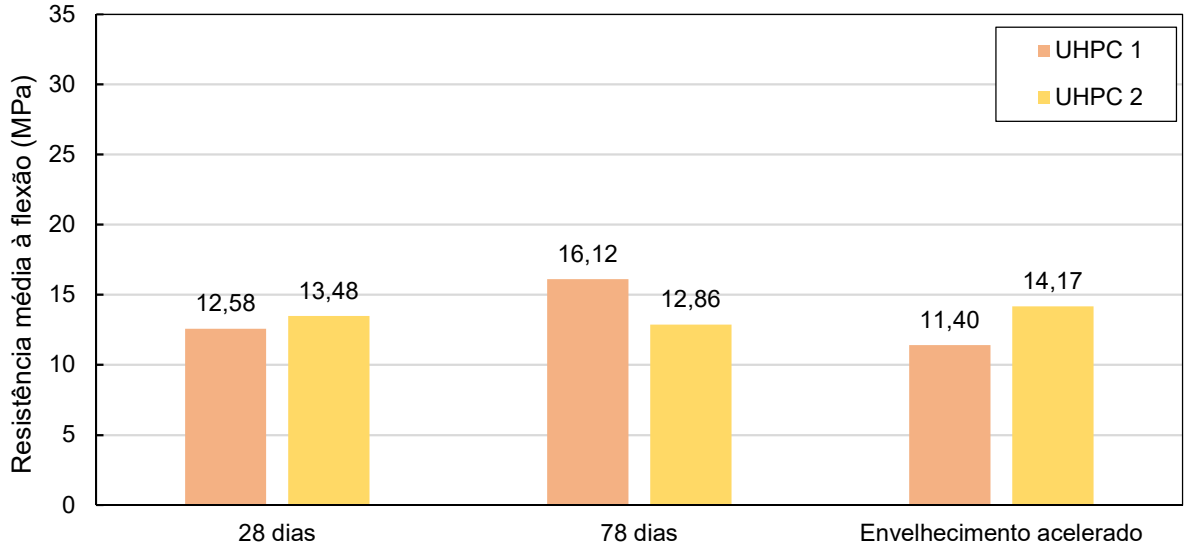
Tabela 14 – Resistência à tração na flexão do UHPC 3

	Resistência à tração na flexão (MPa)
	28 dias
CP1	12,36
CP2	10,53
CP3	11,49
Média (MPa)	11,46
Desvio padrão	0,92
Coeficiente de variação (%)	8,01

Fonte: Autora (2026).

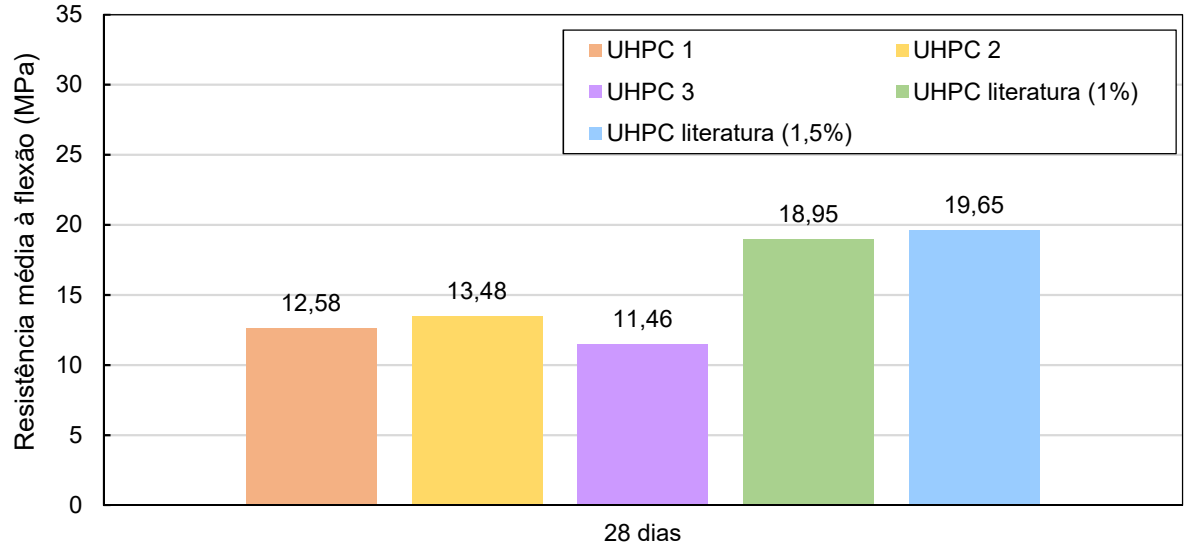
As resistências médias à tração na flexão para as misturas de UHPC constam nas Figuras 28 e 29. A Figura 28 expõe o comportamento mecânico dos traços UHPC 1 e UHPC 2 em três idades distintas: aos 28 e 78 dias, além do estado após o processo de envelhecimento acelerado. Em paralelo a essa análise, a Figura 29 apresenta um comparativo direto, na idade de 28 dias, entre as três dosagens experimentais (UHPC 1, 2 e 3) e valores de referência reportados na literatura para concretos de ultra-alto desempenho com teores de fibras de 1% e 1,5%. Essa disposição dos dados permite aferir o desempenho das misturas desenvolvidas frente ao estado da arte.

Figura 28 – Resistência média à tração na flexão sob três condições de cura: aos 28 dias, 78 dias e após envelhecimento acelerado



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico de colunas comparando a resistência média à flexão de duas misturas. O eixo vertical exibe os valores em MPa, com escala de 0 a 35, e o eixo horizontal apresenta as condições de cura. Aos 28 dias, o UHPC 1 (laranja) atinge 12,58 MPa e o UHPC 2 (amarelo) marca 13,48 MPa. Aos 78 dias, os resultados são 16,12 MPa e 12,86 MPa, na mesma ordem. Após o processo de envelhecimento acelerado, o UHPC 1 registra 11,40 MPa e o UHPC 2 alcança 14,17 MPa.

Figura 29 – Resistência média à tração na flexão aos 28 dias



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico de colunas comparando a resistência média à tração na flexão aos 28 dias de cinco formulações. O eixo vertical indica a resistência em MPa, com escala de 0 a 35, e o eixo horizontal sinaliza a idade do ensaio. Da esquerda para a direita, as colunas exibem os seguintes resultados numéricos no topo: o UHPC 1 (laranja) atinge 12,58 MPa; o UHPC 2 (amarelo) marca 13,48 MPa; o UHPC 3 (roxo) registra 11,46 MPa. Em seguida, os dados de referência apontam 18,95 MPa para o UHPC da literatura com 1% de fibras (verde) e 19,65 MPa para o UHPC da literatura com 1,5% de fibras (azul).

Observa-se na Figura 28 que os resultados de resistência à tração na flexão mostram diferenças claras entre os traços com 1% e 1,5% de microfibras de vidro ao longo do tempo e sob envelhecimento acelerado.

Aos 28 dias, o UHPC 1 apresentou resistência média de 12,58 MPa, enquanto o UHPC 2 atingiu 13,48 MPa. Esse leve aumento de 7,15% associado ao maior teor de fibras corrobora o estudo de Yan et al. (2021). Esse comportamento está associado à maior capacidade de ponte de microfissuras promovida pelo aumento da quantidade de filamentos na matriz antes de se atingir a carga de pico (Muhyaddin, 2023). Contudo, nota-se que esse mecanismo atuou sobretudo na fase pré-pico, visto que a ruptura subsequente ocorreu de forma abrupta, indicando uma limitação das microfibras em garantir tenacidade no comportamento pós-fissuração.

Aos 78 dias, ocorre uma mudança de comportamento. O UHPC 1 apresenta aumento expressivo de 28,14% em relação aos 28 dias, atingindo 16,12 MPa. Em contrapartida, o UHPC 2 sofre uma leve redução de 4,60%, registrando 12,86 MPa. Nesse ponto, o UHPC 1 supera o UHPC 2 em 25,35%, o que sugere um aprimoramento na aderência da interface fibra-matriz no traço com menor teor de fibras. Enquanto o volume de 1,5% de microfibras se mostrou benéfico nas idades iniciais, a maior concentração de filamentos no UHPC 2 propiciou aglomerações e prejudicou o envolvimento individual das fibras pela pasta cimentícia, o que limitou o ganho de resistência em idades avançadas. Já a proporção de 1%, por garantir dispersão adequada, permitiu que a hidratação contínua fortalecesse a ancoragem das fibras, resultando em desempenho superior aos 78 dias.

No envelhecimento acelerado, os traços apresentam respostas distintas. O UHPC 1 sofre redução expressiva, com queda para 11,40 MPa, o que equivale a decréscimos de 9,38% e 29,28% em comparação aos 28 e 78 dias, respectivamente. Esse comportamento decorre do impacto das condições de alta temperatura e umidade na interface entre o reforço e a pasta. Os ciclos higrotérmicos induzem microfissuras internas na matriz cimentícia, o que fragiliza a aderência por atrito ao redor das microfibras de vidro. Dado o menor teor de reforço (1%), essa perda de vínculo interfacial faz com que as poucas fibras deslizem com facilidade sob carregamento, reduzindo a capacidade do compósito de suportar tensões de tração na flexão.

Por outro lado, o UHPC 2 apresenta aumento da resistência, com marca de 14,17 MPa. Esse resultado representa um leve aumento de 5,12% em relação aos 28

dias e um ganho de 10,19% frente aos 78 dias, além de superar o UHPC 1 na mesma idade em 24,30%. Esse aumento indica que o estímulo térmico e a umidade do ensaio aceleraram as reações pozolânicas na zona de transição interfacial, promovendo maior aperto mecânico e densificação ao redor dos filamentos. Embora essa mesma ação térmica tenha induzido microdefeitos na matriz global, o elevado volume de reforço (1,5%) gerou um forte efeito de costura sob tração. A grande quantidade de fibras que cruzam o plano de fissuração exige maior energia total para o deslizamento coletivo, o que elevou a carga de ruptura na flexão.

Como pode ser observado na Figura 29, o traço de referência sem fibras (UHPC 3) aos 28 dias apresenta resistência média de 11,46 MPa. Esse resultado configura uma redução de 8,90% em relação ao UHPC 1 e de 14,98% em relação ao UHPC 2, evidenciando um desempenho inferior aos traços com adição de microfibras na mesma idade. Esse resultado confirma que a incorporação de fibras contribui para o aumento da resistência máxima à tração na flexão, uma vez que os filamentos atuam retardando a propagação de microfissuras internas na fase pré-pico (Mohammed et al., 2021). No entanto, embora eleve a capacidade de carga inicial do compósito em comparação à matriz pura (UHPC 3), o teor de microfibras utilizado não foi suficiente para alterar o modo de falha do material. Isso ocorre porque, à medida que essas microfissuras se propagam e se tornam macrofissuras sob carregamento, as fibras curtas de vidro deixam de ser ativas, resultando em uma ruptura abrupta logo após o compósito atingir a tensão de pico (He et al., 2021a; Mohammed et al., 2021; Schmidt; Fehling; Geisenhanslüke, 2004).

Ao comparar com os valores de referência da literatura para 28 dias, observa-se que os resultados experimentais são inferiores. Para teores de 1% e 1,5% de fibras, são reportados valores de 18,95 MPa e 19,65 MPa, o que indica que os traços UHPC 1 e UHPC 2 ficaram 33,61% e 31,40% abaixo dessas marcas, respectivamente. Essa diferença pode estar associada a fatores como melhor empacotamento de partículas, menor porosidade, maior eficiência na dispersão das fibras e condições de cura mais controladas nos estudos de referência.

Em relação à variabilidade, os resultados indicam boa repetibilidade dos ensaios. O UHPC 1 apresenta baixa dispersão aos 28 e 78 dias, com coeficiente de variação de 3,26% e 3,77%, e aumento após o envelhecimento (7,54%). Esse acréscimo na dispersão ocorreu porque, embora o calor possa homogeneizar a matriz cimentícia global, os ciclos higrotérmicos associados induziram microfissuras e danos

não uniformes na interface fibra-matriz, tornando o mecanismo de deslizamento das fibras mais irregular entre as amostras. O UHPC 2 apresenta valores entre 2,32% e 10,01%, mantendo baixa dispersão inicial, mas com aumento mais acentuado após o envelhecimento acelerado, reflexo do mesmo dano interfacial e da distribuição aleatória das aglomerações de fibras. Por fim, o UHPC 3 apresenta coeficiente de variação de 8,01% aos 28 dias, indicando maior dispersão em comparação aos traços com reforço. Esse comportamento reflete a alta sensibilidade da matriz pura à distribuição aleatória de poros e microdefeitos internos, os quais governam o início da ruptura frágil. Em contrapartida, a presença da teia de microfibras nos demais traços distribui as tensões locais e atenua o impacto de falhas isoladas, o que justifica a maior constância nos resultados à tração inicial do compósito.

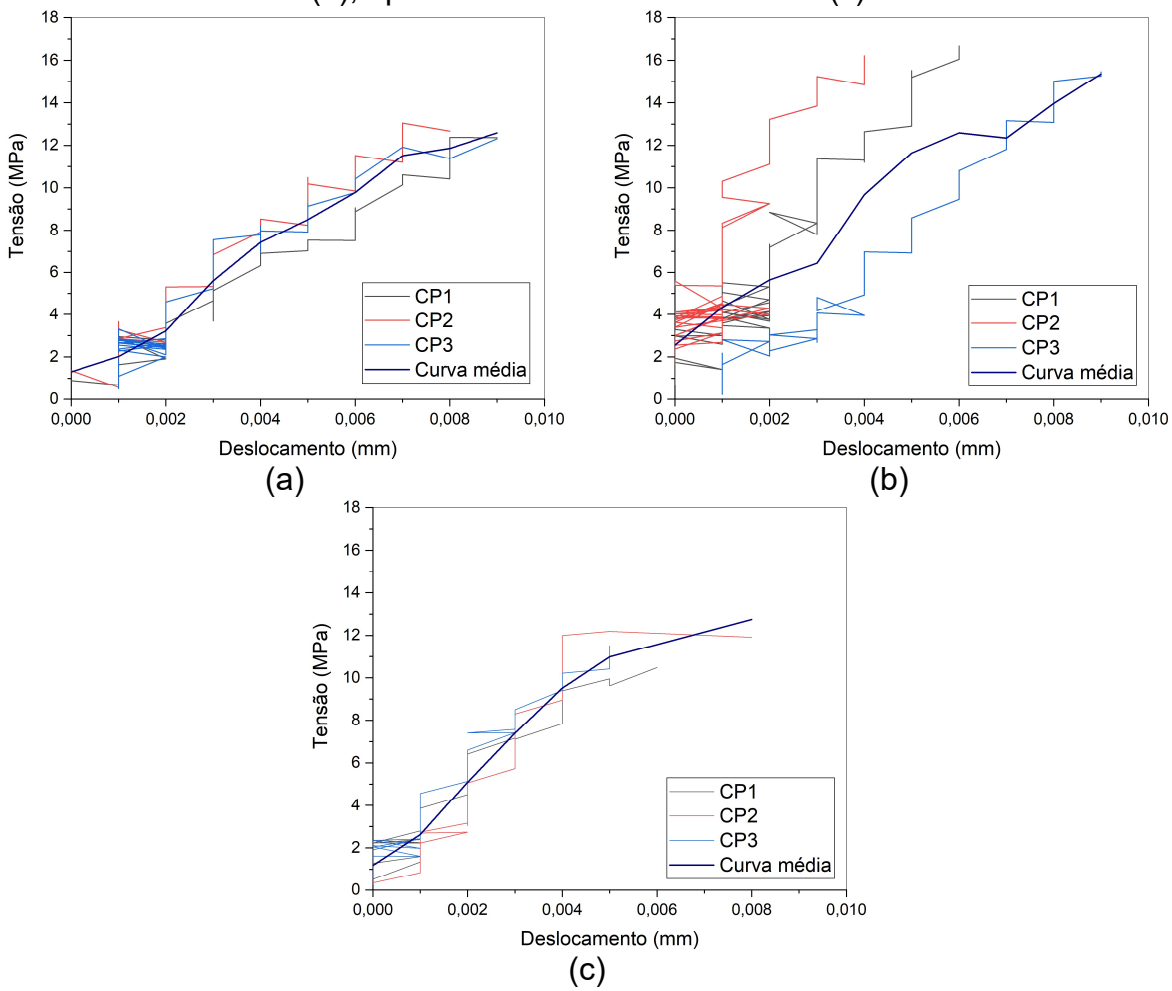
De modo amplo, constata-se que o teor de microfibras dita o comportamento mecânico do compósito segundo dinâmicas distintas ao longo do tempo. O traço com 1% atinge o ápice de resistência em idade intermediária devido ao bom envolvimento e aderência da interface, ao passo que o traço com 1,5% exibe ganho de desempenho após o envelhecimento acelerado, cenário no qual o elevado volume de reforço compensa as descontinuidades da matriz por meio do escorregamento coletivo das fibras. Ademais, a ausência de filamentos resulta nos menores patamares de carga. Esses aspectos indicam que o incremento no teor de fibras não assegura evolução linear de desempenho. A eficiência do compósito vincula-se à qualidade da dispersão, ao aperto mecânico na zona de transição interfacial e à energia requerida para o arrancamento dos filamentos, fatores que explicam tanto as oscilações de força máxima quanto a maior variabilidade estatística após os ciclos térmicos.

4.3.1 Comportamento das Curvas Tensão-Deslocamento na Flexão

Para compreender o comportamento mecânico dos compósitos em estudo, os resultados dos ensaios de flexão são apresentados a seguir por meio das curvas de Tensão-Deslocamento. As Figuras 30 e 31 ilustram o desempenho das formulações UHPC 1 e UHPC 2 nas idades de 28 dias, 78 dias e após envelhecimento acelerado. Por outro lado, a Figura 32 exibe os dados do UHPC 3 com foco exclusivo na idade de 28 dias. Em todos os gráficos, é possível observar o comportamento individual de cada corpo de prova testado (CP1, CP2 e CP3), bem como a curva média obtida para cada condição de cura. Tais plotagens permitem analisar a resistência mecânica e a

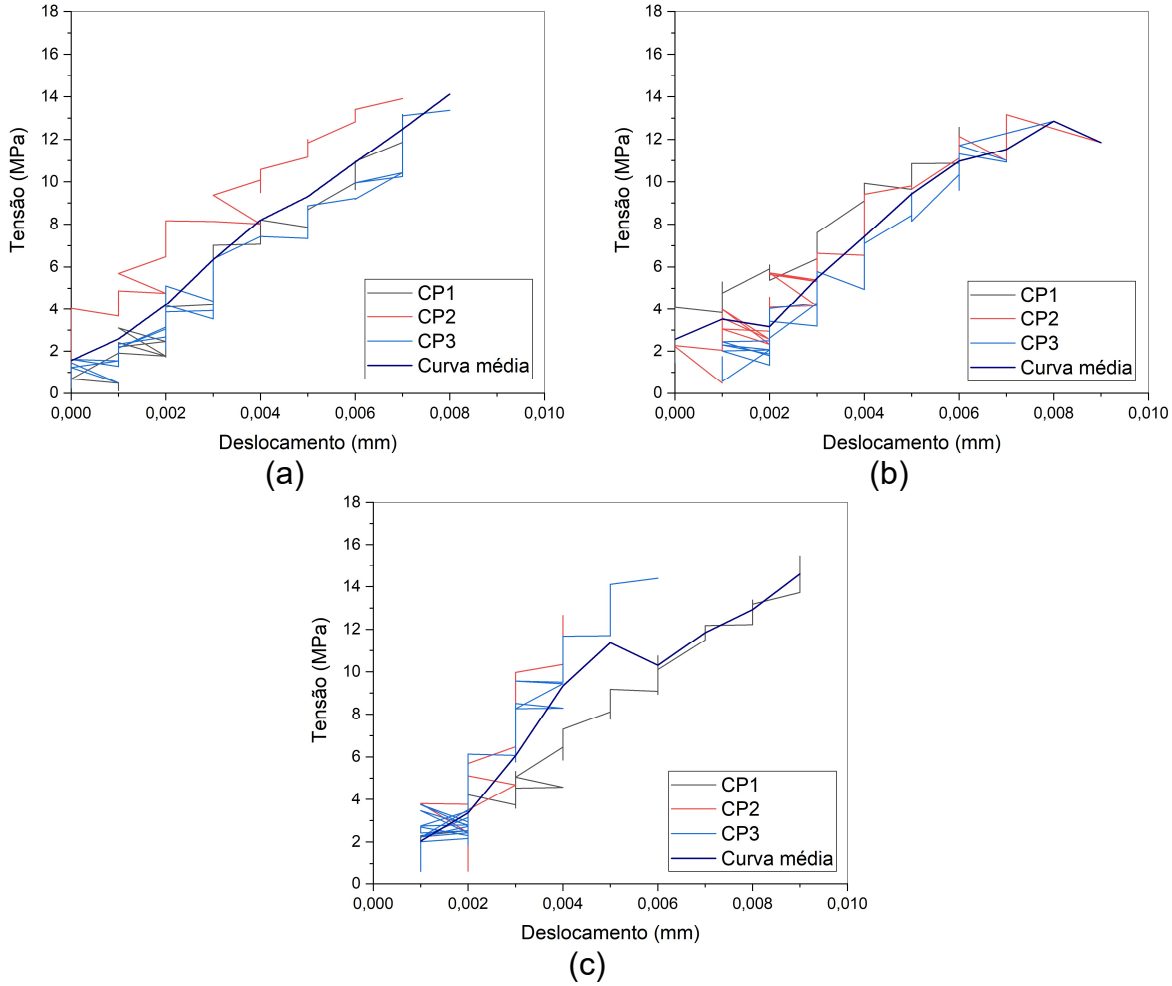
capacidade de deslocamento do material conforme o tempo de cura ou a exposição a condições severas.

Figura 30 – Curvas Tensão-Deslocamento do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c)



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráficos de linha sobre fundo branco, identificados como (a), (b) e (c). Todos possuem o eixo vertical esquerdo nomeado 'Tensão (MPa)', com escala de 0 a 18, e o eixo horizontal inferior nomeado 'Deslocamento (mm)', com escala de 0,000 a 0,010. Em cada um dos gráficos, há quatro curvas com tendência ascendente: três com traçados irregulares, sendo a linha cinza referente ao CP1, a vermelha clara ao CP2 e a azul clara ao CP3; e uma linha azul escura com traçado mais contínuo e centralizado, representando a Curva média.

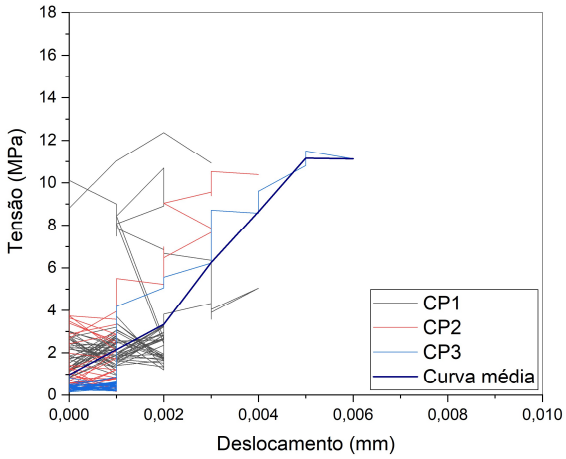
Figura 31 – Curvas Tensão-Deslocamento do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c)



Fonte: Autora (2026).

Legenda: Gráficos de linha sobre fundo branco, identificados como (a), (b) e (c). Todos possuem o eixo vertical esquerdo nomeado 'Tensão (MPa)', com escala de 0 a 18, e o eixo horizontal inferior nomeado 'Deslocamento (mm)', com escala de 0,000 a 0,010. Em cada um dos gráficos, há quatro curvas com tendência ascendente: três com traçados irregulares, sendo a linha cinza referente ao CP1, a vermelha clara ao CP2 e a azul clara ao CP3; e uma linha azul escura com traçado mais contínuo e centralizado, representando a Curva média.

Figura 32 – Curvas Tensão-Deslocamento do UHPC 3 aos 28 dias



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico de linha sobre fundo branco. O eixo vertical esquerdo é nomeado 'Tensão (MPa)', com escala de 0 a 18, e o eixo horizontal inferior é nomeado 'Deslocamento (mm)', com escala de 0,000 a 0,010. No gráfico, há quatro curvas com tendência ascendente: três com traçados irregulares, sendo a linha cinza referente ao CP1, a vermelha clara ao CP2 e a azul clara ao CP3; e uma linha azul escura com traçado mais contínuo, representando a Curva média.

A comparação entre os traços com fibras (UHPC 1 e UHPC 2) e o traço sem fibras (UHPC 3) evidencia o papel das fibras no comportamento à tração do material, sobretudo no regime pré-pico.

O UHPC 3, por não conter fibras, apresenta comportamento tipicamente frágil, como se observa na Figura 32, caracterizado por aumento inicial de tensão seguido de ruptura abrupta logo após o início da fissuração. Durante a zona elástica linear, as microfibras não atuam de forma predominante no mecanismo de transferência de carga, fazendo com que a resposta inicial dos compósitos seja governada pela matriz cimentícia e, portanto, comparável ao traço de referência (Yan et al., 2021). É por essa razão que a carga de início de fissuração ocorre em níveis tão próximos entre as misturas com e sem fibras. Contudo, após esse ponto, o material sem reforço (UHPC 3) não apresenta capacidade relevante de redistribuição de tensões, resultando em ruptura rápida e associada a baixos níveis de deslocamento. Observa-se também maior dispersão nos resultados desse traço, possivelmente relacionada à sensibilidade do material à presença de defeitos e à ausência de mecanismos de controle da propagação de fissuras.

Em contraste, os traços com fibras (UHPC 1 e UHPC 2) apresentam desempenho superior no regime pré-pico, como observado nas Figuras 30 e 31. A incorporação de microfibras contribui para o aumento da carga máxima à tração (Muhyaddin, 2023), efeito mais evidente, de modo geral, no UHPC 2, com 1,5% de

fibras, ainda que essa superioridade não seja uniforme em todas as idades. Aos 78 dias, por exemplo, o UHPC 1 apresentou valor de tensão máxima superior, evidenciando a influência de fatores adicionais, como a evolução da matriz e a interação fibra-matriz. Além disso, os compósitos com fibras tendem a apresentar leve aumento na carga de início de fissuração e menor dispersão dos resultados, indicando comportamento mecânico mais uniforme e melhor distribuição de tensões.

No que se refere ao deslocamento correspondente à carga máxima, não se observa uma tendência clara e definida entre UHPC 1 e UHPC 2. Ainda assim, ambos apresentam valores superiores aos do UHPC 3, indicando que a presença de fibras contribui para uma resposta menos frágil até a ruptura. Apesar disso, todos os traços reforçados apresentaram ruptura abrupta, corroborando o estudo de He et al. (2021b), com separação completa das metades, o que caracteriza ausência de comportamento pós-pico e limitada capacidade de redistribuição de tensões após a fissuração.

No que tange à tenacidade, avaliada de forma qualitativa pela área sob a curva tensão-deslocamento, a contribuição das microfibras concentra-se fundamentalmente nesse regime pré-pico. Observa-se graficamente que o aumento conjunto da resistência máxima e do deslocamento nos traços reforçados (UHPC 1 e UHPC 2) amplia a área da zona pré-fissuração em comparação ao traço de referência (UHPC 3), conferindo-lhes maior capacidade de absorção de energia inicial, o que corrobora o estudo de Mohammed et al. (2021).

Dessa forma, conclui-se que a incorporação de fibras promove melhorias significativas no desempenho à tração do UHPC em relação ao traço sem fibras, traduzindo-se no aumento da resistência (Wille; Kim; Naaman, 2011), do deslocamento até o pico e, por conseguinte, da tenacidade no regime pré-pico, além de proporcionar maior estabilidade dos resultados. Entre os compósitos reforçados, o UHPC 2 apresenta, de modo geral, o melhor desempenho global, embora diferenças pontuais entre os traços indiquem que o ganho associado ao aumento do teor de fibras não ocorre de forma uniforme em todas as condições analisadas.

4.3.2 Modo de Ruptura

As Figuras 33, 34 e 35 ilustram o aspecto final dos corpos de prova de UHPC 1, UHPC 2 e UHPC 3, respectivamente, após a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão. Por meio destas imagens, observa-se o padrão de fissuração

transversal característico, ocorrido na região central dos prismas sob diferentes dosagens e condições de cura. Como mencionado antes, a ruptura aconteceu de forma abrupta com separação total da amostra, o que corrobora o estudo de Muhyaddin (2023). Esse comportamento está associado ao fato de que a falha das fibras de vidro ocorre principalmente por arrancamento, em consonância com os achados de He et al. (2021b).

Figura 33 – Corpos de prova rompidos do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c)



(a) (b) (c)

Fonte: Autora (2026).

Legenda: Corpos de prova prismáticos do UHPC 1 após o ensaio de tração na flexão. Em (a), (b) e (c), observa-se que os prismas apresentam uma ruptura transversal única e bem definida na região central, padrão característico de falha por flexão, dividindo as amostras em duas metades.

Figura 34 – Corpos de prova rompidos do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c)



(a) (b) (c)

Fonte: Autora (2026).

Legenda: Corpos de prova prismáticos do UHPC 2 após o ensaio de tração na flexão. Em (a), (b) e (c), observa-se uma ruptura transversal única e bem definida na região central dos prismas, dividindo as amostras em duas metades.

Figura 35 – Corpos de prova rompidos do UHPC 3 aos 28 dias



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Corpos de prova prismáticos do UHPC 3 após o ensaio de tração na flexão aos 28 dias. As amostras apresentam uma ruptura transversal única e bem definida na região central, dividindo cada prisma em duas metades completamente separadas.

4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial para os traços UHPC 1, UHPC 2 e UHPC 3 constam, de forma sucessiva, nas Tabelas 15, 16 e 17. Para as misturas com microfibras de vidro, a avaliação abrange as idades de 28 e 78 dias, além da condição após o envelhecimento acelerado, enquanto o traço de referência exibe os dados aos 28 dias. As tabelas consolidam as tensões de ruptura individuais em megapascals (MPa), a resistência média em megapascals (MPa), o desvio padrão e o coeficiente de variação percentual (%).

Tabela 15 – Resistência à tração por compressão diametral do UHPC 1

	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)		
	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado
CP1	8,24	6,42	9,04
CP2	10,02	6,94	10,38
CP3	10,34	6,87	8,73
Média (MPa)	9,53	6,74	9,38
Desvio padrão	1,13	0,28	0,87
Coeficiente de variação (%)	11,89	4,14	9,31

Fonte: Autora (2026).

Tabela 16 - Resistência à tração por compressão diametral do UHPC 2

	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)		
	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado
CP1	9,59	4,32	4,09
CP2	7,60	4,49	4,23
CP3	10,46	3,41	5,21
Média (MPa)	9,22	4,07	4,51
Desvio padrão	1,47	0,58	0,61
Coeficiente de variação (%)	15,90	14,25	13,46

Fonte: Autora (2026).

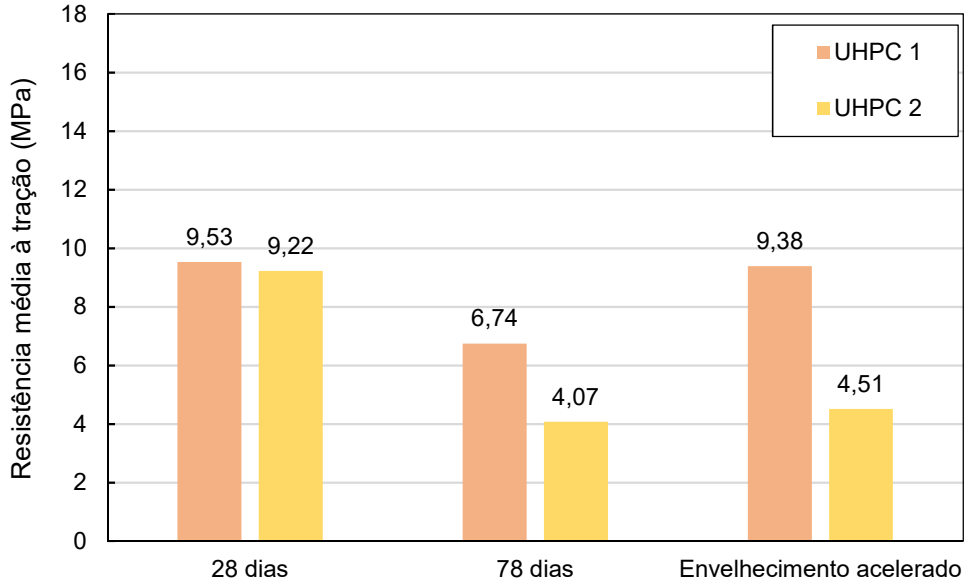
Tabela 17 – Resistência à tração por compressão diametral do UHPC 3

	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
	28 dias
CP1	3,15
CP2	4,42
CP3	3,31
Média (MPa)	3,29
Desvio padrão	0,14
Coeficiente de variação (%)	4,17

Fonte: Autora (2026).

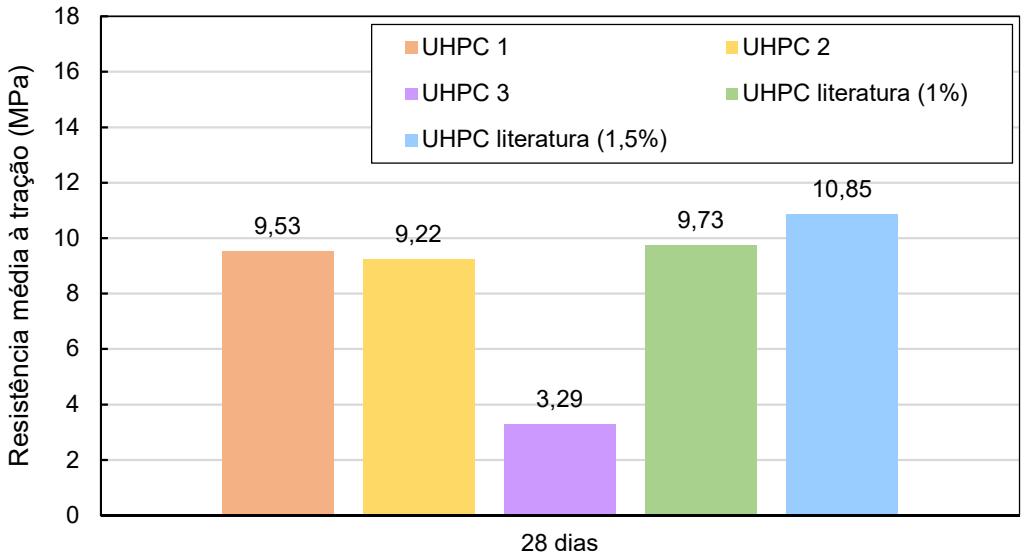
As resistências médias à tração por compressão diametral para as misturas de UHPC constam nas Figuras 36 e 37. A Figura 36 ilustra o desempenho mecânico dos traços UHPC 1 e UHPC 2 em três cenários: aos 28 e 78 dias, além do comportamento após o ciclo de envelhecimento acelerado. De forma análoga às análises anteriores, a Figura 37 apresenta um comparativo, na idade de 28 dias, entre as três dosagens experimentais (UHPC 1, 2 e 3) e valores de referência encontrados na literatura para concretos de ultra-alto desempenho com teores de fibras de 1% e 1,5%. Tal disposição dos dados viabiliza a comparação entre o desempenho das misturas desenvolvidas e o estado da arte.

Figura 36 – Resistência média à tração por compressão diametral sob três condições de cura: aos 28 dias, 78 dias e após envelhecimento acelerado



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico de colunas comparando a resistência média à tração de duas misturas. O eixo vertical exibe os valores em MPa, com escala de 0 a 18, e o eixo horizontal apresenta as condições de cura. Aos 28 dias, o UHPC 1 (laranja) atinge 9,53 MPa e o UHPC 2 (amarelo) marca 9,22 MPa. Aos 78 dias, os resultados são 6,74 MPa e 4,07 MPa, na mesma ordem. Após o processo de envelhecimento acelerado, o UHPC 1 registra 9,38 MPa e o UHPC 2 alcança 4,51 MPa.

Figura 37 – Resistência média à tração por compressão diametral aos 28 dias



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Gráfico de colunas comparando a resistência média à tração aos 28 dias de cinco formulações. O eixo vertical indica a resistência em MPa, com escala de 0 a 18, e o eixo horizontal sinaliza a idade do ensaio. Da esquerda para a direita, as colunas exibem os seguintes resultados numéricos no topo: o UHPC 1 (laranja) atinge 9,53 MPa; o UHPC 2 (amarelo) marca 9,22 MPa; o UHPC 3 (roxo) registra 3,29 MPa. Em seguida, os dados de referência apontam 9,73 MPa para o UHPC da literatura com 1% de fibras (verde) e 10,85 MPa para o UHPC da literatura com 1,5% de fibras (azul).

Como pode-se observar na Figura 36, os resultados de resistência à tração por compressão diametral mostram diferenças marcantes entre os traços com 1% e 1,5% de microfibras de vidro ao longo do tempo e sob envelhecimento acelerado.

Aos 28 dias, os valores são próximos, com 9,53 MPa para o UHPC 1 e 9,22 MPa para o UHPC 2. O UHPC 1 apresenta leve superioridade de 3,36%, o que indica que o menor teor de fibras não prejudicou o desempenho inicial nesse tipo de solicitação. Como a tração diametral depende muito da integridade da matriz, o excesso de fibras pode ter interferido no empacotamento e na formação de uma matriz mais densa no UHPC 2.

Aos 78 dias, observa-se queda acentuada da resistência em ambos os traços, com o UHPC 1 passando para 6,74 MPa (redução de 29,28% em relação aos 28 dias) e o UHPC 2 para 4,07 MPa (redução severa de 55,86%). Nesse cenário, o UHPC 2 sofreu uma queda de 39,61% em relação ao UHPC 1 na mesma idade. Essa degradação mais intensa no UHPC 2 reforça a hipótese de que o maior teor de microfibras pode ter gerado maior número de descontinuidades internas ou dificultado a homogeneização da mistura.

No envelhecimento acelerado, os comportamentos voltam a se diferenciar. O UHPC 1 apresenta recuperação da resistência, atingindo 9,38 MPa, o que representa um aumento expressivo de 39,17% em relação aos 78 dias e uma redução pouco significativa de apenas 1,57% em relação aos 28 dias. Esse resultado pode estar associado à continuidade das reações de hidratação e ao preenchimento de poros, o que contribui para a melhoria da integridade da matriz e da transferência de tensões no compósito.

Por outro lado, o UHPC 2 apresenta apenas leve aumento, atingindo 4,51 MPa (um ganho de 10,81% frente aos 78 dias), permanecendo com resistência bem inferior à idade de 28 dias (redução de 51,08%) e ao UHPC 1 (desempenho 51,92% menor na mesma idade). Esse comportamento indica maior sensibilidade do traço com 1,5% de fibras às condições impostas pelo envelhecimento, possivelmente devido à pior qualidade da interface fibra-matriz ou à presença de vazios.

Como pode ser observado na Figura 37, o traço sem fibras (UHPC 3) aos 28 dias apresenta resistência média de 3,29 MPa. Esse resultado configura uma redução de 65,48% em relação ao UHPC 1 e de 64,32% em relação ao UHPC 2, evidenciando uma inferioridade significativa de desempenho em comparação aos traços com adição de microfibras e corroborando o estudo de Muhyaddin (2023). Esse resultado indica

que a presença de fibras contribui de forma decisiva para o aumento da resistência à tração por compressão diametral, uma vez que atua no controle da propagação de fissuras e na capacidade de transferência de tensões no material. A ausência de fibras torna o compósito mais frágil e suscetível à ruptura sob esforços de tração indireta. No entanto, ao comparar os três traços, verifica-se que o UHPC 2, mesmo com maior teor de fibras, não supera o UHPC 1, o que reforça que o aumento do teor não resulta em melhoria do desempenho e que a eficiência do reforço depende da adequada dispersão e interação das fibras com a matriz cimentícia.

Ao comparar com os valores de referência da literatura para 28 dias, observa-se que os resultados experimentais são próximos para o teor de 1% de fibras, ficando apenas 2,06% abaixo da marca reportada de 9,73 MPa. Em contrapartida, permanecem inferiores para o teor de 1,5%, que registra uma defasagem de 15,02% em relação ao valor referencial de 10,85 MPa. Essa diferença reforça a influência de fatores como dispersão das fibras, porosidade e qualidade da matriz cimentícia.

Em relação à variabilidade, os coeficientes de variação indicam dispersão mais elevada que nos outros ensaios. O UHPC 1 apresenta valores entre 4,14% e 11,89%, enquanto o UHPC 2 apresenta valores ainda mais altos, entre 13,46% e 15,90%, o que indica maior variabilidade dos corpos de prova. O UHPC 3 apresenta coeficiente de variação de 4,17% aos 28 dias, indicando baixa dispersão, embora com desempenho reduzido.

De forma geral, os resultados mostram que o aumento do teor de microfibras de vidro de 1% para 1,5% não resultou em melhoria da resistência à tração por compressão diametral. Pelo contrário, o traço com menor teor apresentou melhor desempenho e maior recuperação após o envelhecimento. Além disso, a ausência de fibras resultou em perdas expressivas de resistência, evidenciando seu papel fundamental no controle da fissuração. Esse comportamento reforça que, para esse tipo de solicitação, a qualidade da matriz e a homogeneidade do compósito têm papel mais relevante que o aumento do teor de fibras.

4.4.1 Modo de Ruptura

As Figuras 38, 39 e 40 apresentam o estado final das amostras de UHPC 1, UHPC 2 e UHPC 3, respectivamente, após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Por meio destas imagens, é possível observar o padrão de fissuração longitudinal típico deste ensaio sob diferentes dosagens e condições de cura.

De maneira geral, ao atingir a carga de pico, verifica-se uma ruptura abrupta, com separação instantânea e total do corpo de prova, evidenciando a idade do rompimento à tração indireta. Cabe destacar que, mesmo com a presença de reforço fibroso nas misturas do UHPC 1 e UHPC 2, o comportamento de falha foi idêntico ao observado no UHPC 3 (sem fibras), indicando que a adição não foi capaz de impedir a separação total das partes sob este tipo de esforço.

Figura 38 – Corpos de prova rompidos do UHPC 1: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado



(a) (b) (c)

Fonte: Autora (2026).

Legenda: Corpos de prova cilíndricos do UHPC 1 após o ensaio de tração por compressão diametral. Em (a), (b) e (c), observa-se o padrão clássico de ruptura deste ensaio: uma fissura reta e longitudinal (fendilhamento) que atravessa todo o plano diametral, dividindo os cilindros em duas metades praticamente simétricas.

Figura 39 – Corpos de prova rompidos do UHPC 2: aos 28 dias (a); aos 78 dias (b); após envelhecimento acelerado (c)



(a) (b) (c)

Fonte: Autora (2026).
Legenda: Corpos de prova cilíndricos do UHPC 2 após o ensaio de tração por compressão diametral. Em (a), (b) e (c), nota-se o padrão de ruptura característico deste ensaio, marcado por uma fissura reta e longitudinal que divide os cilindros praticamente ao meio ao longo de seu plano diametral.

Figura 40 – Corpos de prova rompidos do UHPC 3 aos 28 dias



Fonte: Autora (2026).
Legenda: Corpos de prova cilíndricos do UHPC 3 após o ensaio de tração por compressão diametral aos 28 dias. Os cilindros encontram-se dispostos na vertical sobre uma bancada escura. É visível uma fissura longitudinal profunda e bem definida que divide os cilindros praticamente ao meio ao longo do seu plano diametral, ruptura característica deste ensaio.

4.5 CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO COM A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Ao confrontar os dados obtidos nas duas modalidades de ensaio, constata-se que os valores de resistência à tração na flexão são, de forma constante, superiores aos de tração por compressão diametral para todas as misturas e idades avaliadas. Essa diferença de magnitude é um comportamento esperado e tem forte associação com a forma como as tensões atuam em cada método. Na flexão, as tensões de tração

se concentram na região inferior da seção, atingindo seu valor máximo na fibra mais externa, enquanto o restante da seção permanece submetido a um gradiente de tensões. Por outro lado, na compressão diametral, a falha ocorre por tração indireta ao longo de um plano diametral, o que torna este ensaio bem mais sensível a eventuais defeitos internos ou falhas de empacotamento da matriz cimentícia. Essa distinção mecânica justifica não apenas a necessidade de coeficientes de correlação entre os métodos, mas também define o potencial informativo de cada ensaio.

Isso porque, enquanto o ensaio de tração por compressão diametral fornece, em especial, o valor da resistência máxima, o ensaio de tração na flexão permite a avaliação de parâmetros mais representativos do comportamento do material, como a tenacidade à fratura e a capacidade de deslocamento. Esses aspectos são fundamentais para o dimensionamento de estruturas em UHPC, embora dependam da eficiência do reforço fibroso em garantir a integridade do material após a fissuração.

Para concretos convencionais, a ABNT NBR 6118:2023 estabelece relações empíricas que permitem estimar a resistência à tração direta (uniaxial) a partir do ensaio indireto e o ensaio de tração na flexão. Conforme o item 8.2.5, adota-se um fator de 0,9 para a razão entre a resistência à tração uniaxial e a resistência obtida por compressão diametral, e o fator de 0,7 para a relação entre a resistência à tração uniaxial e a resistência à tração na flexão. Tais correlações foram desenvolvidas com base no comportamento do concreto convencional, cuja matriz não apresenta mecanismos significativos de reforço interno.

Como neste estudo não foi realizado o ensaio de tração direta, obteve-se uma relação teórica entre os dois métodos indiretos através da razão entre esses coeficientes (0,9 / 0,7), resultando em um fator de 1,29.

Entretanto, em materiais de alto desempenho, como o Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC), espera-se que a presença de fibras modifique de forma significativa os mecanismos de fissuração. O reforço fibroso, quando eficiente, promove maior capacidade de transferência de tensões após a formação da primeira fissura, além de elevar a tenacidade do material, o que pode influenciar de maneira distinta os resultados obtidos nos diferentes métodos de ensaio de tração.

Diante disso, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade dessa correlação ao UHPC estudado foram comparados os valores de resistência à tração obtidos por meio dos ensaios de tração na flexão e compressão diametral, considerando os dois traços com diferentes teores de fibras e o traço de referência (sem fibras). Os

resultados dessa análise, expressos pela razão entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral, encontram-se apresentados nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 – Correlação entre as resistências médias à tração do UHPC 1 e UHPC 2

	UHPC 1			**UHPC 2**		
	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado	28 dias	78 dias	Envelhecimento acelerado
Resistência à tração na flexão (MPa)	12,58	16,12	11,40	13,48	12,86	14,17
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	9,53	6,74	9,38	9,22	4,07	4,51
Correlação entre as resistências à tração	1,32	2,39	1,22	1,46	3,16	3,14

Fonte: Autora (2026).

Tabela 19 – Correlação entre as resistências média à tração do UHPC 3

	UHPC 3
	28 dias
Resistência à tração na flexão (MPa)	11,46
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	3,29
Correlação entre as resistências à tração	3,48

Fonte: Autora (2026).

A análise conjunta dos resultados apresentados nas Tabelas 18 e 19 evidencia que a correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral não se mantém constante para os compósitos avaliados, com ampla variação em função da idade, do teor de fibras e das características da matriz.

Para os traços com fibras, observa-se que o UHPC 1 (1,0%) apresenta valores de correlação entre 1,22 e 2,39. Aos 28 dias, o valor obtido (1,32) é bastante próximo da relação teórica de 1,29, indicando comportamento ainda semelhante ao de concretos convencionais nessa idade. Aos 78 dias, há um aumento expressivo da correlação (2,39), associado ao crescimento da resistência à flexão (16,12 MPa) e à

redução da resistência por compressão diametral (6,74 MPa), o que evidencia maior eficiência das fibras sob solicitação flexional. Após o envelhecimento acelerado, a correlação retorna a valores mais baixos (1,22), sugerindo um comportamento mais equilibrado entre os dois mecanismos resistentes.

Para o UHPC 2 (1,5%), a variação é ainda mais acentuada, com valores entre 1,46 e 3,16. Desde os 28 dias, a correlação (1,46) já supera a estimativa teórica, indicando maior influência das fibras mesmo em idades iniciais. Aos 78 dias, observa-se o maior valor (3,16), impulsionado, em especial, pela queda significativa da resistência à tração por compressão diametral (4,07 MPa), enquanto a resistência à flexão permanece elevada. Após o envelhecimento acelerado, a correlação se mantém alta (3,14), reforçando as diferenças entre as formas de distribuição e atuação das tensões em cada método de ensaio.

Para o UHPC 3, sem adição de fibras, a correlação obtida foi de 3,48, valor superior aos observados para o UHPC 1 e próximo aos mais elevados do UHPC 2. Esse resultado indica uma discrepância notável entre os métodos mesmo na ausência de reforço fibroso. Nesse caso, a baixa resistência à tração por compressão diametral (3,29 MPa) sugere elevada sensibilidade do ensaio a defeitos internos e microfissuras da matriz, enquanto a resistência à flexão (11,46 MPa) se mantém em um patamar elevado por depender de uma região localizada da seção.

De forma geral, verifica-se que os valores experimentais são, em sua maioria, superiores à relação teórica de 1,29, evidenciando que as correlações propostas para concretos convencionais não são de aplicação direta ao UHPC. Além disso, o aumento do teor de fibras tende a ampliar a diferença entre os resultados dos dois ensaios, uma vez que o ensaio de flexão apresenta maior sensibilidade à contribuição das fibras no aumento da resistência à tração, enquanto o ensaio diametral permanece sob forte influência da integridade da matriz e da presença de defeitos internos.

Por fim, destaca-se que a elevada correlação observada tanto em compósitos com fibras quanto no traço sem fibras indica que essa relação não depende apenas da presença de reforço fibroso, mas também das particularidades do ensaio de compressão diametral, que tende a ser mais sensível a defeitos internos e heterogeneidades da matriz em materiais de alta compacidade, como o UHPC. Dessa forma, conclui-se que a correlação entre as resistências à tração no UHPC apresenta alta dependência do método de ensaio, da composição do material e da idade, não

podendo ser representada por um fator único ou por expressões empíricas desenvolvidas para concretos convencionais.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo investigar a influência de diferentes teores de microfibras de vidro nas propriedades mecânicas do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (Ultra-High Performance Concrete- UHPC), considerando as idades de 28 e 78 dias, bem como os efeitos do envelhecimento acelerado por ciclos de imersão e secagem. Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência das fibras tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, contribuindo para a compreensão do comportamento desse compósito em diferentes condições de exposição.

Em relação ao estado fresco, verificou-se que todos os traços apresentaram elevada fluidez e adequada trabalhabilidade, com índices de consistência próximos de 30 cm. A incorporação das microfibras promoveu uma leve redução da fluidez, mais pronunciada no traço com 1,5% de fibras, evidenciando que o aumento do teor fibroso dificulta o escoamento da mistura devido à maior interação entre os filamentos e a matriz cimentícia. Apesar disso, todos os compósitos mantiveram condições adequadas para moldagem e adensamento.

Quanto às propriedades mecânicas, constatou-se que a presença das microfibras de vidro contribuiu para o aumento da resistência à compressão, da resistência à tração na flexão e da resistência à tração por compressão diametral quando comparadas ao traço sem fibras. Entretanto, os resultados demonstraram que o aumento do teor de fibras de 1% para 1,5% não resultou em melhorias generalizadas. Para a resistência à compressão, o UHPC 1 apresentou desempenho superior ao UHPC 2 em todas as condições avaliadas, indicando que o aumento do teor de fibras pode favorecer a formação de aglomerações e heterogeneidades na matriz, comprometendo sua integridade e capacidade resistente.

Em relação ao módulo de elasticidade, observou-se comportamento distinto das demais propriedades mecânicas. O UHPC 2 apresentou maior rigidez nas idades iniciais, evidenciando que o aumento do teor de fibras contribuiu para restringir as deformações elásticas sob carregamentos de baixa intensidade. No entanto, após o envelhecimento acelerado, os valores dos dois compósitos tornaram-se semelhantes,

indicando que os efeitos do envelhecimento reduziram as diferenças inicialmente observadas.

A análise das diferentes idades de cura demonstrou que o avanço da idade não resultou necessariamente em aumento das propriedades mecânicas. Em diversos ensaios, os resultados obtidos aos 78 dias foram inferiores aos registrados aos 28 dias, comportamento distinto daquele normalmente observado em concretos convencionais. Esse fato sugere que aspectos relacionados à dispersão das fibras, à variabilidade experimental e às características microestruturais do compósito exerceram influência significativa sobre o desempenho mecânico das misturas.

Os resultados do envelhecimento acelerado evidenciaram que a resposta dos compósitos depende diretamente do teor de fibras empregado. O UHPC 1 apresentou ganhos expressivos de resistência à compressão e aumento do módulo de elasticidade após os ciclos de envelhecimento, indicando boa estabilidade do compósito frente às condições impostas. Em contrapartida, o UHPC 2 apresentou redução em diversas propriedades mecânicas, sugerindo maior sensibilidade aos efeitos combinados da temperatura e da umidade quando associado ao maior teor de fibras.

Nos ensaios de tração, verificou-se que a incorporação das microfibras contribuiu para o aumento das resistências máximas quando comparadas à matriz sem reforço. Contudo, os modos de ruptura observados indicaram comportamento predominantemente frágil para todos os traços, caracterizado pela separação abrupta dos corpos de prova após a fissuração. Dessa forma, conclui-se que os teores de microfibras avaliados foram capazes de elevar a capacidade resistente do material, mas não promoveram mudanças significativas em seu mecanismo de ruptura.

Por fim, a análise da correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral demonstrou elevada dependência do método de ensaio, da composição do material e da condição de cura. Os resultados obtidos indicaram discrepâncias significativas em relação às correlações empregadas de forma tradicional para concretos convencionais, evidenciando que tais relações não podem ser aplicadas diretamente ao UHPC reforçado com microfibras de vidro.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o aumento do teor de microfibras de vidro não implica necessariamente em melhoria global das propriedades mecânicas do UHPC. Entre os teores avaliados, o compósito contendo 1% de microfibras apresentou o melhor equilíbrio entre trabalhabilidade, resistência

mecânica e desempenho após o envelhecimento acelerado. Assim, os resultados desta pesquisa contribuem para ampliar o conhecimento acerca da utilização de microfibras de vidro como alternativa de reforço em matrizes de UHPC, especialmente no que se refere ao comportamento em diferentes idades e sob condições aceleradas de degradação.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de diferentes geometrias e teores de microfibras de vidro, bem como a realização de análises microestruturais que permitam compreender com maior profundidade os mecanismos de interação fibra-matriz e os efeitos do envelhecimento sobre o desempenho mecânico do compósito.

REFERÊNCIAS

ABELLÁN, Joaquín; TORRES, Nancy; NÚÑEZ, Andrés; FERNÁNDEZ, Jaime. Concretos de muy altas prestaciones reforzados con fibras: estado del arte, aplicaciones y posibilidades en el mercado latinoamericano. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 38., 2018, Lima. **[Anais...]**. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú, 2018. ID XXXVIIIJSIE-07-001.

ABDULLAH, Muhd Afiq Hizami *et al.* **Recent Trends in Advanced Radiation Shielding Concrete for Construction of Facilities: Materials and Properties**. **Polymers**MDPI, , 1 jul. 2022.

ACKER, Paul; BEHLOUL, Mouloud. DUCTAL ® TECHNOLOGY: A LARGE SPECTRUM OF PROPERTIES, A WIDE RANGE OF APPLICATIONS. fib Symposium, Avignon, France, 2004.

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

AÏTCIN, Pierre-Claude. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1349-1359, 2000.

AHLBORN, Theresa M.; PEUSE, Erron J.; MISSON, Donald Li. **Ultra-High-Performance Concrete for Michigan Bridges**: material performance - phase I. Houghton: Michigan Technological University, Center for Structural Durability, 2008. (Research Report RC-1525).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 239R-18**: Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report. Reported by ACI Committee 239. Farmington Hills: ACI, 2018. 36 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15498**: Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas - Requisitos e métodos de ensaio. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17246-1**: Concreto de ultra-alto desempenho - Parte 1: Classificação, requisitos e especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2025. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. Versão corrigida 2023. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. Versão corrigida 2. 5 p. (Inclui Emenda 1, de 18.05.2011).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-1**: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 24 p.

ASSOCIATION FRANÇOISE DE GENIE CIVIL, AFGC. French interim recommendations of ultra-high performance Fiber reinforced concrete (UHPFRC). 2002.

AZIZ, Omar Q.; AHMED, Ghafur H. Mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *In*: 2012.

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

BAHMANI, Hadi; MOSTOFINEJAD, Davood. **Microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC) – A review study**. **Journal of Building Engineering**Elsevier Ltd, , 1 jun. 2022.

BANTHIA, Nemkumar; GUPTA, Rishi. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1263–1267, jul. 2006.

BRESCHI, Gabriel; SALVADOR FILHO, José Américo. Influência de diferentes tipos de fibras e aditivos na consistência de matrizes cimentícias de ultra alto desempenho. In: CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 2020, Brasília. **Anais...** Brasília: UnB, 2020.

CAMACHO, E. **Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties**. Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Science UPV, Universitat Politectica de Valencia, 2013

CAMACHO TORREGROSA, Esteban Efraím. **Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties**. 2013. 276 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)

– Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Universitat Politècnica de València, Valência, 2013.

CHEYREZY, M. Structural applications of RPC. Concrete, London. v. 33,

CHOI, Yeol; YUAN, Robert L. Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1587–1591, ago. 2005.

CHRIST, Roberto. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. 2019. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

DAWOOD, Eethar Thanon; RAMLI, Mahyuddin. Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 193–200, mar. 2012.

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

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997-1009, 1994.

DINTEN, Carolina Alexandra M. **Contribuição da adição de sílicas nas propriedades do concreto**. 2000. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Edificações) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. Mechanical properties of reactive powder concretes. **Materials and Structures**, v. 29, n. 4, p. 233-240, 1996.

ENAMI, Rodrigo M. **Reforço de pilares curtos de concreto armado por encamisamento com concreto de ultra-alto desempenho**. 2017. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

ENFEDAQUE, Alejandro; PARADELA, Laura Sánchez; SÁNCHEZ-GÁLVEZ, Vicente. An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC). **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 425–431, fev. 2012.

FANELLA, D. A.; NAAMAN, A. E. Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression. J. Am. Concr. Inst. 1985;82:475–83.

FEHLING, Ekkehard; BUNJE, Kai; LEUTBECHER, Torsten. Design relevant properties of hardened Ultra High Performance Concrete. In: INTERNATIONAL

SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 2., 2008, Kassel. **Proceedings...** Kassel: Kassel University Press, 2008. p. 1-12.

FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; STÜRWALD, S. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 2., 2008, Kassel. **Proceedings...** Kassel: Kassel University Press, 2008. (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10).

GHORPADE, Vaishali G. An experimental investigation on glass fibre reinforced high performance concrete with silica fume as admixture. In: **35th Conference on our world in concrete & structures, Singapore**. 2010. p. 1-8.

GRAYBEAL, Benjamin; DAVIS, Marshall. Cylinder or cube: Strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 6, p. 603-609, 2008.

HE, Jiayuan *et al.* The mechanical properties and damage evolution of UHPC reinforced with glass fibers and high-performance polypropylene fibers. **Materials**, v. 14, n. 9, 1 maio 2021a.

HE, Jiayuan *et al.* The mechanical properties and damage evolution of UHPC reinforced with glass fibers and high-performance polypropylene fibers. **Materials**, v. 14, n. 9, 1 maio 2021b.

HOLUBOVÁ, Barbora *et al.* Corrosion of glass fibres in ultra high performance concrete and normal strength concrete. **Ceramics - Silikaty**, v. 61, n. 4, p. 319–326, 2017.

KANG, Su Tae *et al.* The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2450–2457, maio 2011.

KÖNIG UND HEUNISCH PLANUNGSGESELLSCHAFT MBH LEIPZIG. Leipzig: KHP Leipzig, [s.d.]. Disponível em: https://www.khp-leipzig.de/?page_id=539. Acesso em: 16 mai. 2026.

KWON, Sukmin *et al.* Development of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced cement-based composites. **ACI Materials Journal**, v. 111, n. 3, p. 309–318, 2014.

LEE, N. P.; CHISHOLM, D. H. Reactive Powder Concrete. **STUDY REPORT**, n. 146, 2005.

LI, Jiayue; DENG, Zongcai. Tensile behavior of ultra-high performance concrete reinforced with different hybrid fibers. **Structural Concrete**, v. 24, n. 1, p. 1415–1435, 1 fev. 2023.

MADHKHAN, M.; SAEIDIAN, P. Mechanical properties of ultra-high performance concrete reinforced by glass fibers under accelerated aging. **International Journal of Engineering, Transactions B: Applications**, v. 34, n. 5, p. 1074–1084, 1 maio 2021.

MEDEIROS, Arthur. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MENG, Weina; KHAYAT, Kamal H. Experimental and numerical studies on flexural behavior of ultra-high-performance concrete panels reinforced with embedded glass fiber-reinforced polymer grids. **Transportation Research Record**, v. 2592, p. 38–44, 2016.

MIRZA, Faiz A.; SOROUSHIAN, Parviz. Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 24, n. 2, p. 223-227, 2002.

MOHAMMED, Barham H. *et al.* Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high performance fiber reinforced concretes: Effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 2, p. 1557–1567, 1 jun. 2021.

MUHYADDIN, Guler Fakhraddin. Mechanical and fracture characteristics of ultra-high performance concretes reinforced with hybridization of steel and glass fibers. **Heliyon**, v. 9, n. 7, 1 jul. 2023.

NEIRA, Andrés Leonardo M. **Efecto de la mezcla de micro-fibras y macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, 2020.

PARK, Seung Hun *et al.* Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 2, p. 172–184, fev. 2012.

PERRY, Vic H.; SEIBERT, Peter J. Fifteen years of UHPC construction experience in precast bridges in North America. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBRE-REINFORCED CONCRETE, 2013, Marseille. **Proceedings...** Marseille: RILEM, 2013. p. 229-238.

PERRY, White &.; AHLBORN. The first North American broad based structural design guide on UHPC - ACI 239C. In: INTERNATIONAL INTERACTIVE SYMPOSIUM ON UHPC, 1., 2016, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2016.

POURJAHANSHAHI, Amin; MADANI, Hesam. Chloride diffusivity and mechanical performance of UHPC with hybrid fibers under heat treatment regime. **Materials Today Communications**, v. 26, 1 mar. 2021.

RAO, Srinivasa P.; SEKHAR, Seshadri T. STRENGTH PROPERTIES OF GLASS FIBRE CONCRETE. v. 5, n. 4, 2010.

RICHARD, Pierre; CHEYREZY, Marcel. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995a.

RICHARD, Pierre; CHEYREZY, Marcel. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, 1995b.

RIGAUD, S.; CHANVILLARD, G.; CHEN, J. Characterization of Bending and Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete Containing Glass Fibers. In: PARRA-MONTESINOS, G. J.; REINHARDT, H. W.; NAAMAN, A. E. (ed.). **HPFRCC 6**. [S. l.]: RILEM, 2012. p. 373-380.

SCHIMDT, M.; FEHLING, E. Ultra -High performance concrete: Research development and application in Europe. In: **the 7th International Symposium on the Ultilization of High-Strength/High-Performance Concrete**, 2005. p. 51-78.

SCHMIDT, M.; FEHLING, Ekkehard.; GEISENHANSLÜKE, Carsten. **Ultra high performance concrete (UHPC) : proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, September 13-15, 2004**. *[S.l.]*: Kassel University Press, 2004.

SHI, Caijun *et al.* **A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design**. **Construction and Building Materials**Elsevier Ltd, , 30 dez. 2015.

SILVA, Mariana Lage da *et al*. The Influence of Materials on the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A Literature Review. **Materials**, v. 17, n. 8, 1 abr. 2024.

SPASOJEVIĆ, Ana. **Structural ImpIIcatIonS of ultra-HIgH performance fIbre-reInforced concrete In brIdge deSIgn**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Estruturas) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2008.

SUJITHA MAGDALENE, P. *et al.* Ultra-high-performance concrete with Iron ore tailings and non-metallic and hybrid fibers-A comprehensive experimental study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, 1 dez. 2023.

TASSEW, S. T.; LUBELL, A. S. Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 215–224, 31 jan. 2014.

TIAN, Huiwen *et al.* Experimental investigation on axial compressive behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) filled glass FRP tubes. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 678–691, 20 nov. 2019.

TOUTLEMONDE, François; RESPLENDINO, Jacques. Designing and Building with UHPFRC. [s.l: s.n.].

UYGUNOĞLU, Tayfun. Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 41, n. 8, p. 1441–1449, out. 2008.

VAN NGUYEN, T.; YE, G. The use of rice husk ash to produce ultra high perfoemance concrete for sustainable develop. In: **International RILEM conference-Adavances in**

construction materials through science and engineering. RILEM Publications SARL, 2011. p. 207-214.

WARNOCK, Robyn. Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Reactive Powder Concrete Beams. 2005. UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES, [s. l.], 2005.

WILLE, Kay; KIM, Dong Joo; NAAMAN, Antoine E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 44, n. 3, p. 583–598, abr. 2011.

YAN, Pei *et al.* Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre. **Construction and Building Materials**, v. 279, 12 abr. 2021.

YOO, Doo Yeol *et al.* Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. **Composite Structures**, v. 174, p. 375–388, 15 ago. 2017.

YU, Bowen *et al.* Impact toughness of polypropylene/glass fiber composites: Interplay between intrinsic toughening and extrinsic toughening. **Composites Part B: Engineering**, v. 92, p. 413–419, 1 maio 2016.