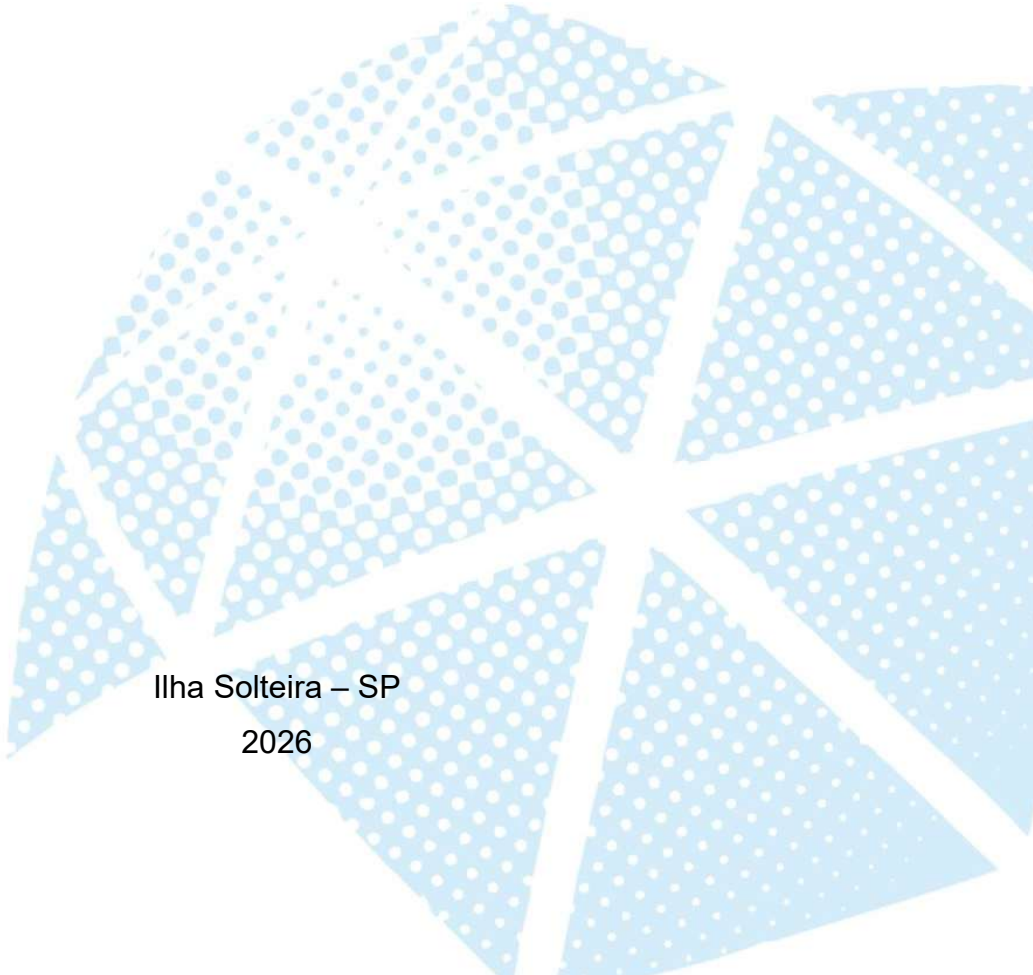
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CAMILLY ZUCATO BERTANI

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



Ilha Solteira – SP
2026

CAMILLY ZUCATO BERTANI

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO 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

Orientadora: Profa. Dra. Lisiane Pereira Prado

Ilha Solteira - SP

20226

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Bertani, Camilly Zucato.
B536i Investigação das propriedades mecânicas do concreto de ultra-alto desempenho com fibras de polipropileno considerando a idade inicial e envelhecimento acelerado / Camilly Zucato Bertani. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
75 f. : il.

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

Orientador: Lisiane Pereira Prado

Inclui bibliografia

1. Concreto de ultra-alto desempenho. 2. UHPC. 3. Fibras de polipropileno. 4. Propriedades mecânicas. 5. Envelhecimento acelerado.

Sandra Montibeller - CRB-8/060/2025

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A presente pesquisa apresenta impacto científico e tecnológico ao contribuir para o entendimento do comportamento do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD) reforçado com fibras de polipropileno, com ênfase na influência do teor de fibras e do envelhecimento acelerado sobre as propriedades mecânicas do material. Os resultados contribuíram para a identificação de um teor ótimo de fibras e para a compreensão dos efeitos da distribuição das fibras e de defeitos internos no desempenho do material. Além disso, o estudo evidencia o potencial das fibras de polipropileno como alternativa às fibras metálicas, devido ao menor custo e à resistência à corrosão, fornecendo subsídios para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de materiais cimentícios mais duráveis e eficientes.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research has scientific and technological significance by contributing to the understanding of the behavior of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) reinforced with polypropylene fibers, with emphasis on the influence of fiber content and accelerated aging on the mechanical properties of the material. The results contributed to the identification of an optimal fiber dosage and to a better understanding of the effects of fiber distribution and internal defects on material performance. Furthermore, the study highlights the potential of polypropylene fibers as an alternative to steel fibers due to their lower cost and corrosion resistance, providing support for future research and for the development of more durable and efficient cementitious materials.

FOLHA DE APROVAÇÃO

CAMILLY ZUCATO BERTANI

INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO 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. Lisiane 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. Xavier
UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira
03/07/2026

Dedico este trabalho aos meus pais e irmão, pelo amor incondicional, apoio constante e por todos os esforços realizados para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Vocês foram minha base em todos os momentos, oferecendo incentivo, confiança e força para seguir em frente diante as dificuldades. Esta conquista também é de vocês, que sempre acreditaram em mim e contribuíram para que este sonho se tornasse realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Érica e Varlei, e ao meu irmão, Ricardo, por todo o amor, apoio e incentivo ao longo da minha trajetória. Graças ao apoio e sustento de vocês que consegui concluir essa etapa importante da minha vida. Minha eterna gratidão por acreditarem em mim mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha orientadora, Prof. Dr. Lisiane, pela confiança depositada em meu trabalho, pela orientação dedicada e por todos os ensinamentos compartilhados ao longo desta pesquisa.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), expresso minha sincera gratidão por proporcionar uma formação de excelência. Agradeço a todos os professores que fizeram parte dessa trajetória, não apenas pelos conhecimentos transmitidos, mas também pelos exemplos de ética, profissionalismo e dedicação que contribuíram significativamente para minha formação pessoal e profissional.

Ao Ministério da Educação (MEC), pelo auxílio financeiro concedido, suporte fundamental que possibilitou minha permanência estudantil e a dedicação necessária ao desenvolvimento deste trabalho, destacando o apoio por meio do Programa de Educação Tutorial (PET). Agradeço ao tutor e colegas com quem tive a oportunidade de compartilhar projetos, as experiências vivenciadas nesse grupo foram essenciais para ampliar minha visão acadêmica, profissional e humana.

Aos meus amigos de graduação, Daniel, Kaique, Leonardo Pinheiro e Letícia, pela amizade, companheirismo e pelos inúmeros momentos compartilhados ao longo dessa jornada.

Agradeço, de forma especial, à Ana Carolina e ao Leonardo Cacuri, por estarem presentes em todos os momentos desta caminhada. Obrigada pela amizade verdadeira, pelo apoio constante, pela compreensão e por tornarem essa trajetória mais feliz, leve e significativa.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação. Cada apoio, incentivo e ensinamento recebido foi essencial para que eu chegasse até aqui.

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.” (Albert Einstein)

RESUMO

O Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) apresenta elevada resistência mecânica e durabilidade, porém comportamento frágil sob solicitações de tração. Nesse contexto, este trabalho avaliou a influência da incorporação de macrofibras de polipropileno nacionais nas propriedades mecânicas do UHPC aos 28 dias e após envelhecimento acelerado equivalente a um ano. Foram produzidos três traços contendo 0%, 1,0% e 1,5% de fibras, submetidos a ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral e peso específico. Os resultados demonstraram que o teor de 1,0% de fibras apresentou o melhor desempenho global**,** proporcionando aumento de aproximadamente 88% na resistência à compressão em relação ao concreto sem fibras. O aumento do teor para 1,5% reduziu a resistência à compressão em cerca de 31% quando comparado ao traço com 1,0% de fibras, indicando perda de trabalhabilidade e maior incorporação de vazios. O módulo de elasticidade permaneceu praticamente inalterado com 1,0% de fibras, apresentando diferença inferior a 0,1%**,** enquanto o teor de 1,5% promoveu redução de aproximadamente 8,8%**.** Na resistência à tração por compressão diametral, a adição de 1,0% de fibras proporcionou incremento de aproximadamente 122,5% em relação ao traço de referência, evidenciando a eficiência das fibras na transferência de tensões e no controle da propagação de fissuras. Após o envelhecimento acelerado, observou-se redução da resistência à compressão, porém aumento da resistência à tração indireta, indicando que o envelhecimento afeta de forma distinta os mecanismos resistentes do material. Conclui-se que a incorporação de 1,0% de fibras de polipropileno representa a dosagem mais adequada entre as avaliadas, proporcionando o melhor equilíbrio entre resistência, rigidez e comportamento pós-fissuração, embora as misturas não tenham atingido a resistência mínima de 100 MPa normalmente adotada para classificação como UHPC.

Palavras-chave: concreto de ultra-alto desempenho (CUAD); fibras de polipropileno; propriedades mecânicas; envelhecimento acelerado.

ABSTRACT

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) exhibits outstanding mechanical strength and durability; however, it also presents brittle behavior under tensile loading. In this context, this study evaluated the influence of incorporating domestically produced polypropylene macrofibers on the mechanical properties of UHPC at 28 days and after accelerated aging equivalent to one year. Three mixtures containing 0%, 1.0%, and 1.5% polypropylene fibers were produced and subjected to axial compressive strength, modulus of elasticity, flexural tensile strength, splitting tensile strength, and unit weight tests. The results showed that the mixture containing 1.0% fibers achieved the best overall performance, providing an approximately 88% increase in compressive strength compared with the mixture without fibers. Increasing the fiber content to 1.5% reduced compressive strength by approximately 31% compared with the 1.0% fiber mixture, indicating reduced workability and increased void formation. The modulus of elasticity remained virtually unchanged with 1.0% fiber addition, showing a difference of less than 0.1%, whereas the 1.5% fiber content resulted in an approximately 8.8% reduction. Regarding splitting tensile strength, the incorporation of 1.0% polypropylene fibers led to an increase of approximately 122.5% compared with the reference mixture, demonstrating the effectiveness of the fibers in stress transfer and crack propagation control. After accelerated aging, a reduction in compressive strength was observed, whereas indirect tensile strength increased, indicating that aging affects the material's resistance mechanisms differently. It can be concluded that the incorporation of 1.0% polypropylene fibers represents the most suitable dosage among those evaluated, providing the best balance between strength, stiffness, and post-cracking behavior, although none of the mixtures reached the minimum compressive strength of 100 MPa commonly adopted for UHPC classification.

Keywords: Ultra-High Performance Concrete (UHPC); polypropylene fibers; mechanical properties; accelerated aging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dimensão média dos materiais granulares utilizados no UHPC. 22
Figura 2 - Representação esquemática do efeito de ponte das fibras através das fissuras. 23
Figura 3 - Curva tensão–deformação do UHPC e do UHPRFC sob compressão (a) e tração (b). 23
Figura 4 - Microfibra (a) e macrofibra (b) de polipropileno.....25
Figura 5 - Ponte para pedestres Sherbrooke, Quebec, Canadá. 27
Figura 6 - Ponte Mars Hill, Iowa. 27
Figura 7 - *Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée* (MuCEM), em Marselha.....28
Figura 8 - Esquema de um pilar de ponte reforçado com estrutura de concreto de ultra-alto desempenho (UHPC). 29
Figura 9 - Reabilitação dos Viadutos de Arth-Goldnau. (a) Fotografia dos viadutos gêmeos (Fotografia: E. Brühwiler), (b) Concretagem com UHPFRC (Fotografia: A. Weykeystone) e (c) esquema da intervenção. 29
Figura 10 - Materiais utilizados na produção do UHPC.....33
Figura 11 - Materiais dosados em ambiente laboratorial.....34
Figura 12 - (a) fibra inteira, (b) fibra cortada e (c) comparação. 35
Figura 13 - Procedimento de mistura. 36
Figura 14 - Ensaio de compressão axial com instrumentação para medição de deformações. a) Esquema do ensaio de compressão; b) Ensaio de compressão em laboratório. 39
Figura 15 - Esquema do ensaio de flexão por 3 pontos. 40
Figura 16 - Ensaio de flexão de 3 pontos com o sensor e célula de carga. 41
Figura 17 - Ensaio de resistência à tração diametral: (a) esquema e (b) execução em laboratório. 41
Figura 18 - Ensaio de envelhecimento acelerado. 42
Figura 19 - Resistência à compressão axial aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano). 46
Figura 20 - Comparação das resistências médias à compressão axial entre os traços analisados e a literatura. 48

Figura 21 - Trechos elásticos das curvas tensão × deformação utilizados para determinação do módulo de elasticidade do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2. 50
Figura 22 - Comparação dos módulos de elasticidade médios entre os traços analisados e a literatura. 51
Figura 23 - Corpos de prova rompidos por compressão axial do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2. 52
Figura 24 - Resistência à tração na Flexão aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano). 54
Figura 25 - Comparação das resistências médias à tração na flexão entre os traços analisados e a literatura. 54
Figura 26 - Curvas tensão x deslocamento do ensaio de tração na flexão do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2. 56
Figura 27 - Corpos de prova rompidos por tração na flexão do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2. 57
Figura 28 - Ampliação da região de ruptura evidenciando a presença e atuação das fibras de polipropileno na transferência de tensões pós-fissuração. 57
Figura 29 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano). 59
Figura 30 - Comparação das resistências médias à tração por compressão diametral entre os traços analisados e a literatura. 60
Figura 31 - Corpos de prova rompidos por tração por compressão diametral do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2. 61
Figura 32 - Comparação de disposição das fibras nos ensaios de tração por compressão diametral (a) e tração na flexão (b). 63
Figura 33 - Comparação da relação entre as resistências à tração na flexão e por compressão diametral entre os traços analisados e a literatura 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica. 31
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica. ... 32
Tabela 3 - Propriedades das macrofibras de polipropileno. 34
Tabela 4 - Traço usado para o UHPC. 36
Tabela 5 - Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio. 37
Tabela 6 - Resultados de resistência à compressão axial (MPa) do UHPC aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano). 45
Tabela 7 - Valores do módulo de elasticidade do UHPC em 28 dias e 1 ano. 49
Tabela 8 - Resultados de resistência à tração na flexão do UHPC aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano) 53
Tabela 9 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral do UHPC aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano). 59
Tabela 10 - Correlação entre os valores de tração na flexão e tração por compressão diametral do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2. 64
Tabela 11 - Correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral dos estudos analisados na literatura. 65
Tabela 12 - Peso específico do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2. 67
Tabela 13 - Peso específico médio dos concretos UHPC em comparação ao concreto convencional. 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CP	Corpo de prova
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CUAD	Concreto de Ultra-Alto Desempenho
FHWA	Federal Highway Administration
FRC	Fiber-Reinforced Concrete (Concreto Reforçado com Fibras)
HPC	High Performance Concrete (Concreto de Alto Desempenho)
ITZ	Interfacial Transition Zone (Zona de Transição Interfacial)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PP	Polipropileno
PPF	Polypropylene Fiber (Fibra de Polipropileno)
RPC	Reactive Powder Concrete (Concreto de Pós Reativos)
SCC	Self-Compacting Concrete (Concreto Autoadensável)
UHPC	Ultra-High Performance Concrete (Concreto de Ultra-Alto Desempenho)
UHPFRC	Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do corpo de prova
D	Diâmetro do corpo de prova
E	Módulo de elasticidade
F	Força máxima aplicada
f_c	Resistência à compressão axial
$f_{ct,f}$	Resistência à tração na flexão
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração por compressão diametral
$f_{ct,m}$	Resistência média à tração direta
g	Aceleração da gravidade
m	Massa do corpo de prova
V	Volume do corpo de prova
ρ	Massa específica
γ	Peso específico
σ	Tensão
ε	Deformação específica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 JUSTIFICATIVA 19
1.2 OBJETIVO 19
1.2.1 Objetivo geral 19
1.2.2 Objetivos específicos 20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
2.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO (UHPC) E INFLUÊNCIA DAS FIBRAS EM SEU COMPORTAMENTO MECÂNICO. 20
2.2 FIBRAS DE POLIPROPILENO 24
2.3 APLICAÇÕES DO UHPC 26
2.4 CRITÉRIOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE FIBRAS E PARÂMETROS MECÂNICOS 30
3 MATERIAL E MÉTODO 33
3.1 MATERIAIS 33
3.2 PROPRIEDADES E PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO NACIONAIS 34
3.3 DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA 35
3.4.1 Módulo de elasticidade 38
3.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO POR 3 PONTOS 39
3.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 41
3.7 ENVELHECIMENTO ACELERADO 42
3.8 CORRELAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES ENSAIOS DE TRAÇÃO 43
3.9 PESO ESPECÍFICO 43
4 RESULTADOS 44
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL 44
4.1.1 Módulo de Elasticidade 48
4.1.2 Modo de Ruptura 51
4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO 53
4.2.1 Pós-fissuração e Modo de Ruptura 55
4.3 RESISTÊNCIA A TAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 58
4.3.1 Modo de Ruptura 60
4.4 CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO COM A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL 62

4.5 PESO ESPECÍFICO DO UHPC.....67
5 CONCLUSÃO.....68
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....70
REFERENCIAS.....72

1 INTRODUÇÃO

A evolução da engenharia civil tem impulsionado o desenvolvimento de materiais cimentícios com desempenho superior, capazes de atender às crescentes exigências de resistência, durabilidade e segurança estrutural. Nesse contexto, o Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) destaca-se como uma tecnologia inovadora devido às suas elevadas resistências mecânicas, reduzida porosidade e elevada durabilidade em comparação aos concretos convencionais. Essas características tornam o UHPC uma alternativa promissora para aplicações estruturais que demandam elevada vida útil e menor necessidade de manutenção.

O UHPC diferencia-se dos concretos tradicionais por apresentar uma matriz cimentícia extremamente densa, formulada com cimento, pós e agregados finos e reduzida quantidade de água. Apesar de suas excelentes propriedades mecânicas, o UHPC apresenta comportamento relativamente frágil, caracterizado pela baixa capacidade de deformação antes da ruptura. Dessa forma, a incorporação de fibras à matriz cimentícia tem sido amplamente estudada como alternativa para melhorar a ductilidade, controlar a propagação de fissuras e aumentar a capacidade de absorção de energia do material, assim se tornando Concreto de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras (UHPFRC). Entre os diferentes tipos de fibras disponíveis, as fibras de polipropileno (PPF) destacam-se pelo baixo custo, resistência à corrosão e facilidade de dispersão na mistura.

As fibras de polipropileno podem ser classificadas em microfibras e macrofibras, desempenhando funções distintas no compósito cimentício. As microfibras atuam principalmente no controle da retração plástica e na redução da formação de microfissuras, além de contribuírem para a diminuição do risco de lascamento explosivo em situações de altas temperaturas. Já as macrofibras atuam após a fissuração do concreto, promovendo maior capacidade de transferência de tensões entre as fissuras e aumentando a ductilidade e a tenacidade do material.

Contudo, ainda são escassos os estudos sobre macrofibras de polipropileno com redução dimensional, permanecendo lacunas quanto aos seus efeitos no desempenho mecânico, na dispersão das fibras e na interação fibra-matriz em compósitos de UHPC. Além disso, o comportamento desses materiais em longo prazo

ainda não é totalmente compreendido, especialmente sob envelhecimento acelerado e exposição prolongada a condições ambientais adversas.

1.1 JUSTIFICATIVA

A relevância deste estudo está associada à necessidade de ampliação do conhecimento sobre o uso de fibras poliméricas em concretos de ultra-alto desempenho, especialmente no que se refere ao seu comportamento ao longo do tempo. Ainda são escassos os estudos que investigam o comportamento de macrofibras de polipropileno submetidas à redução de comprimento. Dessa forma, permanecem lacunas quanto à compreensão da influência dessa modificação geométrica no desempenho mecânico, na dispersão das fibras e na interação fibra-matriz em compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho.

Além disso, destaca-se a importância da avaliação do comportamento do material em condições de longo prazo, uma vez que, embora as propriedades iniciais do UHPC reforçado com fibras sejam amplamente reconhecidas, ainda existem limitações no entendimento de seu desempenho quando submetido a processos de envelhecimento acelerado e exposição prolongada a condições ambientais adversas.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo investigar as propriedades mecânicas do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) reforçado com fibras contendo diferentes teores de fibras de polipropileno, avaliadas aos 28 dias e após um ano de idade. Para isso, foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado, constituídos por ciclos de imersão e secagem, com a finalidade de reproduzir, em um período reduzido, os efeitos decorrentes de um ano de exposição natural. A análise concentra-se no desempenho mecânico do material, com ênfase na resistência à tração, especialmente nos parâmetros de carga máxima e carga de fissuração.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

a) Avaliar a influência de diferentes teores de fibras de polipropileno nas propriedades físicas e mecânicas do UHPC, por meio da determinação da densidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, com o intuito de identificar a dosagem ideal;

b) Levantar parâmetros mecânicos na literatura técnica para fundamentar o confronto de dados aos 28 dias;

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 fibras;

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.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO (UHPC) E INFLUÊNCIA DAS FIBRAS EM SEU COMPORTAMENTO MECÂNICO.

O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) representa um avanço significativo na tecnologia de materiais cimentícios, sendo caracterizado por uma matriz extremamente densa, baixa porosidade e elevada durabilidade. Internacionalmente, documentos como os da *Federal Highway Administration* (FHWA) e do *American Concrete Institute* (ACI 239) definem o UHPC como um material com resistência à compressão superior a 150 MPa e resistência a tração superior à 7 Mpa aos 28 dias, associado a elevada resistência à tração e comportamento pós-fissuração aprimorado pela incorporação de fibras. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da ABNT NBR 17246:2025, classifica como UHPC os

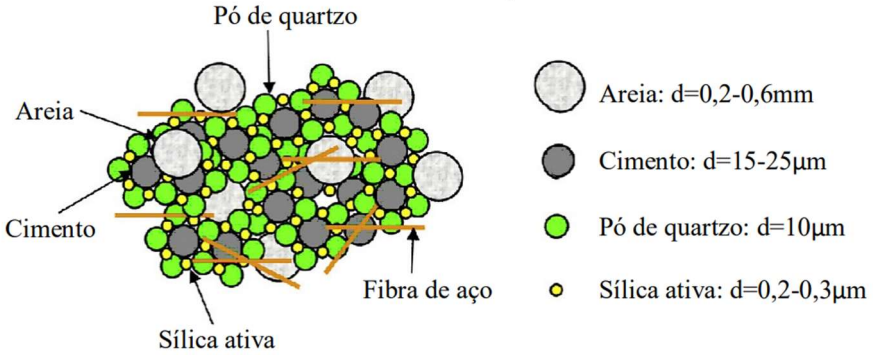
concretos com resistência à compressão acima de 100 MPa e resistência a tração acima de 6 Mpa, desde que atendam aos requisitos normativos relacionados ao desempenho mecânico, durabilidade e comportamento estrutural.

O elevado desempenho do UHPC está diretamente relacionado à sua composição e ao refinamento de sua microestrutura. Diferentemente dos concretos convencionais, o UHPC apresenta uma matriz cimentícia extremamente compacta, obtida pela utilização de baixíssima relação água/aglomerante, elevada quantidade de materiais cimentícios finos e otimização granulométrica dos constituintes.

A evolução dos materiais cimentícios ocorreu de forma gradual, acompanhando a crescente demanda por estruturas mais resistentes, duráveis e eficientes. Segundo Camacho Torregrosa (2013), a evolução mais significativa ocorreu a partir das últimas décadas do século XX, impulsionada pelo desenvolvimento de novos tipos de cimento, pela introdução das fibras como reforço estrutural e pelo avanço dos aditivos redutores de água de alta eficiência. Esses progressos possibilitaram o surgimento do concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), material que reúne conceitos provenientes dos Concreto Autoadensável (*Self-Compacting Concrete* - SCC), Concreto Reforçado com Fibras (*Fiber-Reinforced Concrete* - FRC) e Concreto de Alto Desempenho (*High Performance Concrete* - HPC).

O UHPC é frequentemente descrito como uma argamassa de ultra-alto desempenho devido à ausência ou à utilização muito limitada de agregados graúdos em sua composição. Em geral, esse material é constituído por cimento Portland, sílica ativa, quartzo moído, areia fina e aditivos superplastificantes de elevada eficiência, empregando predominantemente partículas com dimensões inferiores a 2 mm (Ramezani; Shafei, 2025). Essa composição, associada à otimização granulométrica dos constituintes, favorece o elevado empacotamento das partículas, reduzindo significativamente a quantidade de vazios capilares presentes na matriz cimentícia. A Figura 1 evidencia o conceito de empacotamento de partículas adotado para maximizar a compacidade da matriz e minimizar a presença de vazios.

Figura 1 - Dimensão média dos materiais granulares utilizados no UHPC.



Fonte: Oliveira (2019).

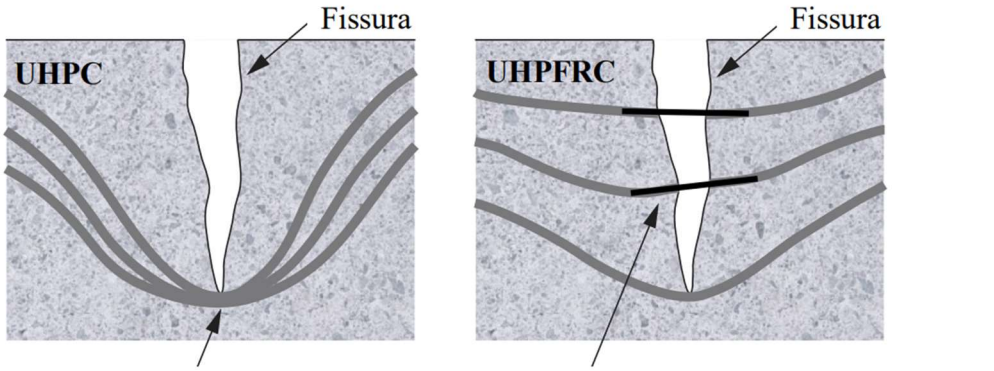
Essa configuração reduz significativamente a presença de vazios capilares e a espessura da zona de transição interfacial (*Interfacial Transition Zone* – ITZ) entre a pasta cimentícia e os agregados, região tradicionalmente considerada uma das partes mais frágeis dos concretos convencionais. Como consequência, o UHPC apresenta uma microestrutura extremamente densa e homogênea, com elevada compacidade e reduzida porosidade, resultando em baixíssima permeabilidade e elevada resistência à penetração de água, cloretos e outros agentes agressivos, fatores diretamente associados à sua elevada durabilidade (Li *et a*l., 2020; Ullah *et al*., 2022).

A baixa porosidade e elevada resistência mecânica tornam o material especialmente atrativo para aplicações em ambientes agressivos, estruturas marítimas, pontes, elementos pré-moldados e componentes estruturais esbeltos. Outra característica importante do UHPC é sua elevada resistência mecânica específica, permitindo a redução das seções estruturais e do peso próprio dos elementos sem comprometimento da capacidade resistente (Xue *et al*., 2020).

Entretanto, apesar de sua elevada resistência à compressão e da elevada rigidez proporcionada pela matriz densificada, o UHPC apresenta comportamento relativamente frágil quando submetido a esforços de tração e flexão (Richard; Cheyrezy, 1995). Isso ocorre devido à reduzida capacidade deformacional da matriz cimentícia e à rápida propagação de fissuras após o surgimento das tensões de tração. Nesse contexto, a incorporação de fibras torna-se fundamental para melhorar o comportamento pós-fissuração, aumentar a ductilidade e elevar a capacidade de absorção de energia do material. Conforme ilustrado na Figura 2, as fibras atuam como mecanismos de reforço interno, promovendo a transferência de tensões através das fissuras e dificultando sua propagação. Como consequência, ocorre aumento da tenacidade, melhoria da resistência à tração e maior controle da fissuração,

contribuindo também para o aumento da durabilidade do compósito cimentício (Fehling; Bunje; Leutbecher, 2004).

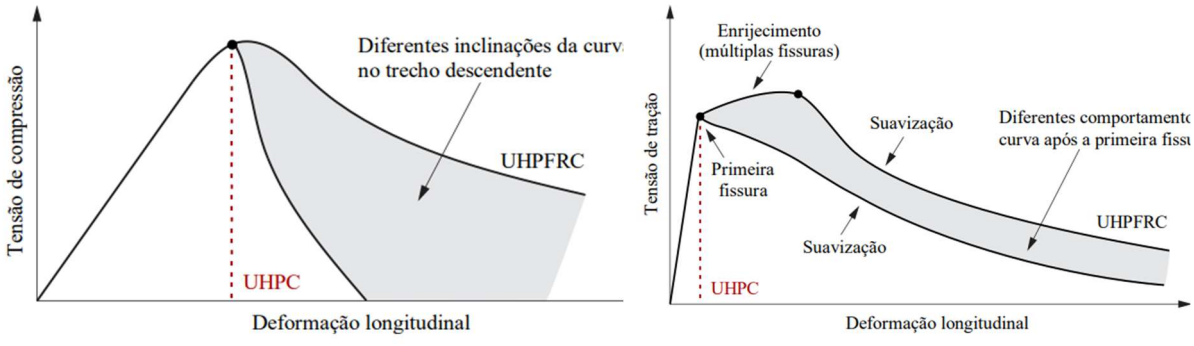
Figura 2 - Representação esquemática do efeito de ponte das fibras através das fissuras.



Fonte: Oliveira (2019).

As fibras desempenham papel fundamental no comportamento mecânico do UHPC, proporcionando ganhos significativos na resistência à tração na flexão, na ductilidade e no desempenho pós-fissuração. Sua incorporação permite que o material mantenha capacidade resistente mesmo após o surgimento das primeiras fissuras, favorecendo um comportamento mais tenaz e menos frágil (Fehling *et al.*, 2014). Esse efeito pode ser observado na Figura 3, que compara as curvas tensão-deformação de concretos sem fibras e reforçados com fibras, evidenciando o aumento da ductilidade e da capacidade resistente após a fissuração.

Figura 3 - Curva tensão–deformação do UHPC e do UHPRFC sob compressão (a) e tração (b).



(a) (b)

Fonte: Adaptado de Oliveira (2019)

Entre os diferentes tipos de reforço fibroso, as fibras metálicas, especialmente as microfibras de aço, são as mais empregadas em composições de UHPC. Essas fibras atuam como mecanismos de ponte sobre as fissuras, contribuindo para o aumento da resistência ao impacto, à fadiga e às solicitações dinâmicas, além de melhorar a capacidade de absorção de energia do material. Em razão dessas características, são amplamente utilizadas em elementos estruturais esbeltos, painéis pré-moldados, pontes e estruturas submetidas a elevadas solicitações mecânicas.

Apesar dos benefícios proporcionados pelas fibras de aço, sua utilização apresenta algumas limitações, como custo elevado, maior densidade, suscetibilidade à corrosão em ambientes agressivos e dificuldades relacionadas à dispersão homogênea durante o processo de mistura. Diante desse cenário, diversos estudos têm investigado a influência de diferentes materiais, geometrias e dimensões de fibras sobre o desempenho do UHPC. Pesquisas desenvolvidas por Neira (2020) e Khan, Abbas e Fares (2017) demonstram que a utilização de fibras alternativas, como as fibras de polipropileno, bem como a combinação híbrida entre fibras metálicas e sintéticas, pode modificar significativamente o comportamento mecânico do compósito.

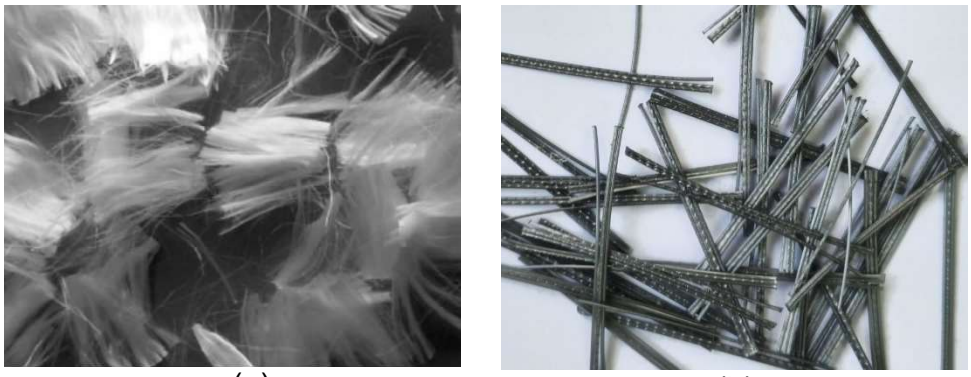
Essa estratégia busca explorar as vantagens específicas de cada tipo de fibra, promovendo simultaneamente o controle da microfissuração, a melhoria do comportamento pós-fissuração, o aumento da tenacidade e a elevação da resistência ao fogo. No caso das fibras de polipropileno, destaca-se ainda sua contribuição para a mitigação do fenômeno de lascamento explosivo (*spalling*) quando o material é submetido a altas temperaturas, tornando-se uma alternativa promissora para aplicações em estruturas sujeitas à ação do fogo.

2.2 FIBRAS DE POLIPROPILENO

As fibras de polipropileno podem ser classificadas em microfibras e macrofibras, sendo cada uma responsável por mecanismos distintos de reforço no compósito cimentício. Essa diferenciação está relacionada principalmente às dimensões das fibras e à escala de fissuração em que atuam. Segundo a ABNT NBR 16942:2021, essa classificação é realizada em função do diâmetro da fibra, sendo consideradas microfibras aquelas com diâmetro inferior a 0,30 mm e macrofibras

aquelas com diâmetro igual ou superior a 0,30 mm. A Figura 4 evidencia a diferenças geométricas e estruturais das macros e microfibras de polipropileno.

Figura 4 - Microfibra (a) e macrofibra (b) de polipropileno.



(a) (b)

Fonte: Autora (2026).

As microfibras de polipropileno apresentam reduzido diâmetro e elevada dispersão na matriz cimentícia, atuando principalmente no controle da retração plástica e da formação de microfissuras nas primeiras idades do concreto, contribuindo para a integridade e durabilidade do material (Neira, 2020; Feng *et al*., 2023; Shen *et al*., 2023). Além disso, quando submetidas a temperaturas próximas de 160 °C, essas fibras fundem-se e formam canais internos que facilitam a dissipação da pressão de vapor, reduzindo significativamente o risco de desplacamento explosivo (spalling) em concretos de alta resistência e UHPC (Zhang *et al*., 2021; Li *et al*., 2020).

As macrofibras de polipropileno possuem maiores comprimentos e relações de aspecto mais elevadas, sendo utilizadas principalmente para reforçar o concreto no estado endurecido. Diferentemente das microfibras, atuam em fissuras já desenvolvidas, promovendo o efeito de ponte entre suas faces e permitindo a transferência de tensões através dessas descontinuidades. Como consequência, contribuem para o aumento da resistência residual à tração, da tenacidade, da ductilidade e da capacidade de absorção de energia. Além disso, favorecem um comportamento pós-fissuração mais estável, reduzindo a propagação brusca das fissuras e promovendo uma melhor redistribuição de tensões no compósito. Dessa forma, o material mantém parte significativa de sua capacidade resistente mesmo após a fissuração, apresentando um processo de ruptura mais gradual, característica particularmente importante em elementos sujeitos a impactos, fadiga, vibrações e carregamentos cíclicos (Neira, 2020).

Em função da complementaridade de seus mecanismos de atuação, diversos estudos têm investigado o uso combinado de micro e macrofibras de polipropileno em concretos de ultra-alto desempenho. Essa abordagem busca promover simultaneamente o controle da microfissuração, a melhoria da durabilidade, o aumento da resistência ao fogo e o aprimoramento das propriedades mecânicas pós-fissuração, resultando em compósitos mais seguros e com melhor desempenho estrutural ao longo de sua vida útil.

2.3 APLICAÇÕES DO UHPC

Na história geral do concreto, o UHPC é considerado um material relativamente recente, embora venha sendo estudado há mais de 30 anos e desenvolvido há mais de duas décadas. Sua aceitação e aplicação na construção civil têm crescido gradualmente, enquanto universidades e pesquisadores apresentam avanços significativos nas investigações sobre UHPC e UHPFRC, principalmente devido ao elevado desempenho mecânico e às excelentes propriedades de durabilidade desses materiais (Perry; White; Ahlborn, 2016). Na América Latina a disseminação e o uso do UHPFRC ainda são limitados em razão da escassez de pesquisas e dos altos custos envolvidos, diversos países já apresentam ampla utilização dessa tecnologia, com destaque para Estados Unidos, Japão, França, Alemanha, Suíça e Países Baixos.

Entre as principais aplicações do material estão pontes de pedestres e rodoviárias, fachadas, varandas, mobiliário urbano, coberturas, escoras, sistemas de revestimento, componentes para infraestrutura subterrânea e de alta segurança, canais para tratamento de águas residuais, além de elementos arquitetônicos e estruturais pré-fabricados, entre outros (Perry; White; Ahlborn, 2016; Abellán *et al*., 2018a).

Entre as primeiras aplicações estruturais do concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC), destaca-se a ponte de pedestres de Sherbrooke, localizada em Quebec, Canadá, construída em 1997 (Figura 5). Considerada a primeira estrutura do mundo executada integralmente com UHPC, a obra utilizou concreto do tipo *Reactive Powder Concrete* (RPC) reforçado com fibras metálicas de aço. A estrutura com 60 metros de vão foi concebida com elementos pré-moldados protendidos, apresentando elevada resistência mecânica, baixo peso

próprio e grande durabilidade. O projeto teve como principal objetivo demonstrar a viabilidade estrutural do UHPFRC em aplicações reais, tornando-se uma referência mundial para o desenvolvimento do material em obras de infraestrutura (Perry & Seibert, 2013).

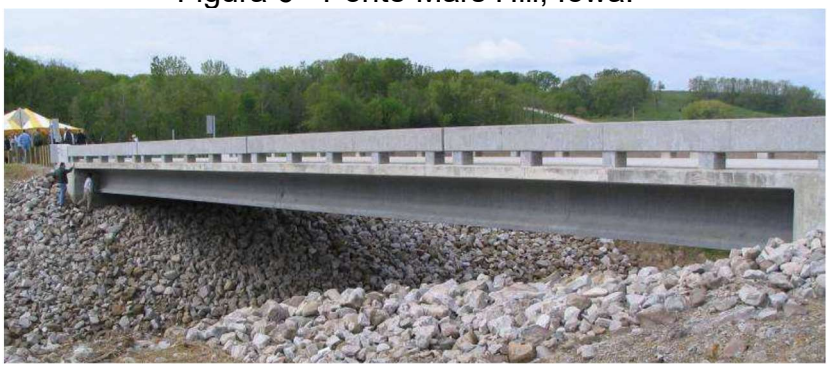
Figura 5 - Ponte para pedestres Sherbrooke, Quebec, Canadá.



Fonte: Adaptado de (Perry; Seibert, 2013).

O avanço das aplicações do UHPFRC não se restringiu às primeiras pontes experimentais e de pedestres, passando a ser empregado também em obras rodoviárias, arquitetônicas e de reabilitação estrutural. Um exemplo importante dessa expansão foi a construção da Mars Hill Bridge, em Iowa, Estados Unidos, concluída em 2006 (Figura 6). Considerada a primeira ponte rodoviária norte-americana a utilizar UHPC em elementos estruturais, a obra empregou concreto reforçado com aproximadamente 2% em volume de fibras de aço. O uso do material possibilitou a redução da quantidade de armadura transversal convencional, além de proporcionar elevada resistência mecânica, durabilidade e simplificação do processo construtivo. O sucesso da aplicação contribuiu significativamente para a difusão do UHPC em projetos de infraestrutura rodoviária nos Estados Unidos (Graybeal, 2009).

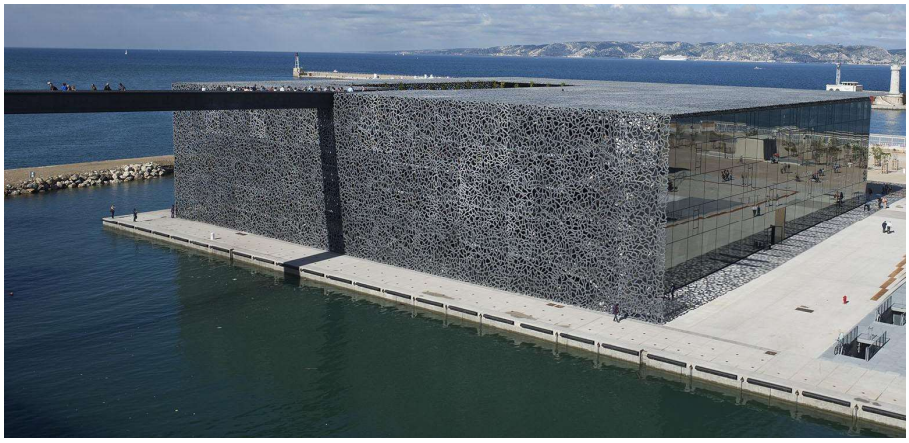
Figura 6 - Ponte Mars Hill, Iowa.



Fonte: Graybeal, 2009.

Um dos exemplos mais emblemáticos da aplicação do UHPFRC na arquitetura contemporânea é o *Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée* (MuCEM), inaugurado em 2013 na cidade de Marselha, França (Figura 7). Nessa obra, o UHPC reforçado com fibras metálicas foi utilizado na execução de fachadas vazadas, passarelas e diversos elementos estruturais e arquitetônicos. As elevadas resistências mecânicas e a durabilidade do material permitiram a produção de componentes extremamente delgados e de geometria complexa, características que seriam difíceis de alcançar com concretos convencionais. Além do aspecto estético, a utilização do UHPC foi fundamental para garantir o desempenho da estrutura em ambiente marítimo agressivo, sujeito à ação constante de cloretos e umidade (Benaicha, 2025).

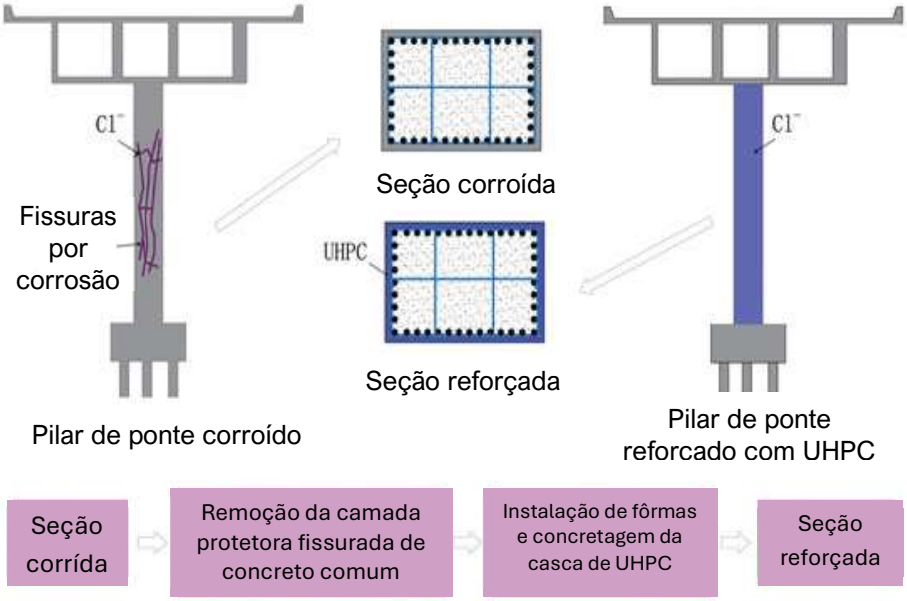
Figura 7 - *Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée* (MuCEM), em Marselha.



Fonte: Fotografia de Claude Paris/AP; adaptado de O Globo (2013).

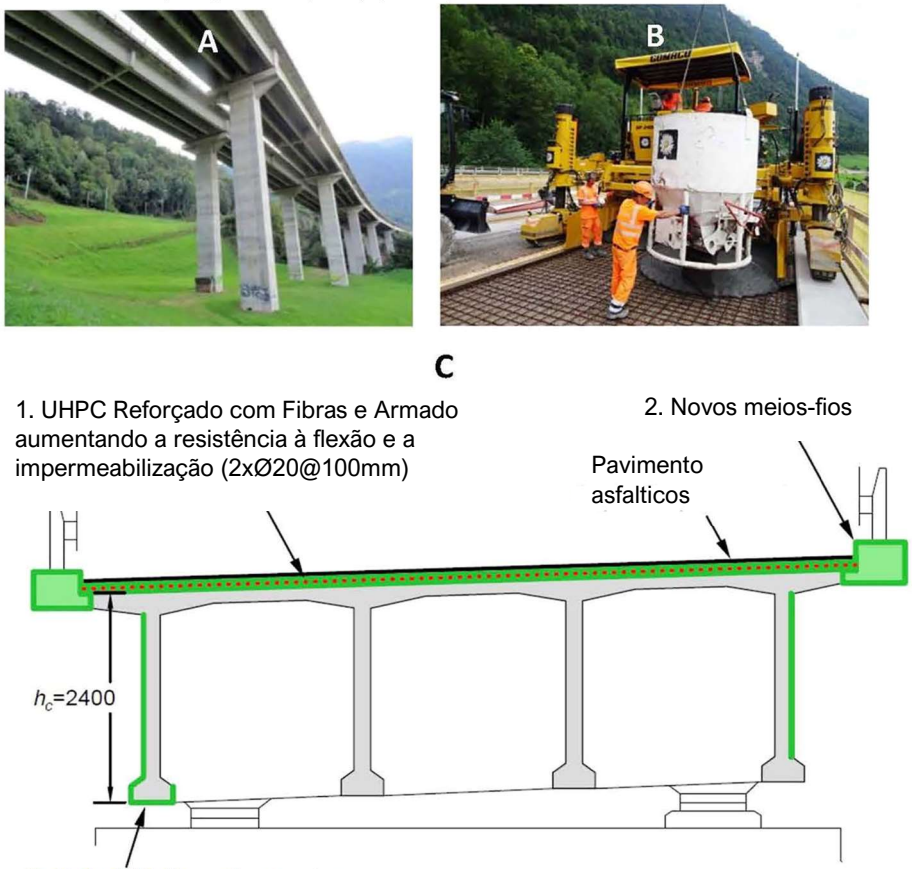
Além das novas construções, o UHPC tem sido utilizado em intervenções de recuperação e reforço estrutural, como mostra a Figura 8. Um exemplo notável é o reforço em três viadutos rodoviários localizados na região de Arth-Goldau, na Suíça Central (Figura 9). Com aproximadamente 45 anos de serviço e extensão total de cerca de 1.050 m, as estruturas apresentavam limitações na capacidade resistente devido ao comportamento contínuo adquirido durante a construção, além de problemas de corrosão das armaduras. Para solucionar essas deficiências, foi utilizado UHPFRC como material de reforço e recuperação, permitindo aumentar a capacidade de carga, melhorar a durabilidade e prolongar a vida útil dos viadutos (Bertola *et al*., 2021).

Figura 8 - Esquema de um pilar de ponte reforçado com estrutura de concreto de ultra-alto desempenho (UHPC).



Fonte: Adaptado de Li *et al*,, 2025.

Figura 9 - Reabilitação dos Viadutos de Arth-Goldnau. (a) Fotografia dos viadutos gêmeos (Fotografia: E. Brühwiler), (b) Concretagem com UHPFRC (Fotografia: A. Weykeystone) e (c) esquema da intervenção.



Fonte: Adaptado de Bertola *et al.*, 2021.

2.4 CRITÉRIOS PARA DEFINIÇÃO DO TEOR DE FIBRAS E PARÂMETROS MECÂNICOS

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos experimentalmente neste estudo com aqueles reportados na literatura técnica, foram selecionados 6 artigos científicos, apresentados na Tabela 1 e 2, para análise comparativa. A seleção dos trabalhos foi realizada com base em critérios previamente definidos, visando garantir a compatibilidade entre os materiais e os procedimentos adotados.

Os critérios de inclusão considerados foram: (i) estudos experimentais; (ii) avaliação das propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade; (iii) utilização de cura úmida; (iv) emprego de fibras de polipropileno como reforço, de modo que os resultados apresentados não fossem influenciados pela utilização simultânea de outros tipos de fibras; (v) teores de fibras próximos aos investigados nesta pesquisa, compreendidos entre 0% e 1,5%; e (vi) utilização de materiais constituintes e composições semelhantes às adotadas neste trabalho.

Em relação ao tipo de reforço fibroso, durante o levantamento bibliográfico, a intenção inicial foi selecionar e analisar separadamente estudos envolvendo microfibras e macrofibras de polipropileno, de modo a possibilitar comparações mais específicas entre os diferentes tipos de reforço. Contudo, constatou-se que a maior parte das pesquisas disponíveis na literatura sobre UHPC reforçado com fibras de polipropileno contempla o uso de microfibras, sendo escassos os estudos que avaliam exclusivamente macrofibras de polipropileno. Dessa forma, em razão da limitada disponibilidade de trabalhos com características semelhantes às adotadas nesta pesquisa, foram considerados predominantemente estudos envolvendo microfibras de polipropileno para fins de comparação, ressalvando-se as diferenças geométricas e os possíveis efeitos distintos desses reforços sobre o comportamento mecânico do compósito.

Tabela 1 - Dados dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica.

Título do artigo	Ano de publicação	Autores	Tipo de fibra	Teor de fibra
Effect of Curing Period on Properties of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Ultra-High Performance Concrete	2017	P. Smarzewski	Microfibra de polipropileno	0 0,5% 1,0% 1,5% 2,0%
Property Assessment of Hybrid Fiber-Reinforced Ultra-High-Performance Concrete	2018	P. Smarzewski, D. Barnat-Hunek	Microfibra de polipropileno	0 1,0%
Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre	2021	Yan *et al.*	Microfibra de polipropileno	0 0,5% 1,0% 1,5% 2,0% 2,5%
Early-age autogenous shrinkage, tensile creep, and restrained cracking behavior of ultra-high-performance concrete incorporating polypropylene fibers	2023	Shen *et al.*	Microfibra de polipropileno	0 1,0% 2,0% 3,0%
Effect of polypropylene fiber on early-age properties and stress relaxation of ultra-high-performance concrete under different degrees of restraint	2023	Feng *et al.*	Microfibra de polipropileno	0 1,0% 2,0% 3,0%
Mechanical behaviour and impact response of ultra-high-performance concrete incorporating steel and polypropylene fibers	2026	Khan *et al.*	Microfibra de polipropileno	0 0,5% 1,0% 1,5%

Fonte: Autora (2026).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica.

Autores	Teor de fibra	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
P. Smarzewski	0	139,80	7,70	9,40	48,60
	0,5%	131,40	8,00	10,50	43,70
	1,0%	118,50	7,00	10,20	42,60
	1,5%	115,80	6,50	9,90	40,90
	2,0%	114,70	5,60	9,40	40,00
P. Smarzewski, D. Barnat-Hunek	0	151,00	8,40	8,90	38,37
	1,0%	94,60	5,80	7,70	29,42
Yan *et al*.	0	120,00	19,00	-	-
	0,5%	127,00	21,00		
	1,0%	122,00	22,00		
	1,5%	120,00	23,00		
	2,0%	115,00	24,00		
	2,5%	110,00	25,00		
Shen *et al*.	0	106,45	7,94	10,67	45,15
	1,0%	104,84	5,48	11,48	43,72
	2,0%	102,97	4,64	11,86	42,37
	3,0%	101,34	6,26	11,65	39.84
Feng *et al.*	0	112,00	-	9,76	45,40
	1,0%	111,00		10,58	43,31
	2,0%	110,00		11,51	43,55
	3,0%	106,00		10,49	39,82
Khan *et al.*	0	111,00	-	5,10	30,40
	0,5%	93,00		8,70	45,87
	1,0%	99,00		8,50	55,50
	1,5%	122,00		9,50	57,59

Fonte: Autora (2026).

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção das misturas de UHPC foram obtidos de diferentes fornecedores. No contexto desta pesquisa, priorizou-se a utilização de materiais de origem nacional. A Figura 10 apresenta os materiais empregados na composição do concreto, compreendendo: cimento Portland CP V-ARI Ultrarrápido, fornecido pela Holcim; agregados constituídos por areia fina industrial com módulo de finura 80/100 e pó de quartzo (filler) SM 200, ambos provenientes da Mineração Jundu; sílica ativa não densificada, fornecida pela Elkem; aditivo superplastificante ADVA 585; e fibras de polipropileno (PP) de fabricação nacional (Concrefiber). Estas últimas foram submetidas a corte manual com alicate, de modo a obter fibras com comprimento aproximado de 12,5 mm, adequadas às condições experimentais adotadas nesta pesquisa.

Figura 10 - Materiais utilizados na produção do UHPC.



(a) cimento (b) areia (c) pó de quartzo (d) sílica ativa

(e) superplastificante (f) fibras de PP

Fonte: Autora (2026).

A Figura 11 apresenta os materiais em ambiente laboratorial, após o processo de pesagem, etapa fundamental para o controle da dosagem e garantia da reprodutibilidade das misturas.

Figura 11 - Materiais dosados em ambiente laboratorial.



Fonte: Autora (2026).

3.2 PROPRIEDADES E PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO NACIONAIS

O tipo de fibra selecionado para utilização neste projeto corresponde a macrofibras de polipropileno disponíveis no mercado nacional. As principais propriedades físicas e mecânicas dessas fibras estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades das macrofibras de polipropileno.

Característica	Especificação
Classificação	Copolímero de polipropileno
Classe	II (diâmetro ≥ 0,30 mm)
Coloração	Cinza
Tipo de agrupamento	Feixe
Tratamento superficial	N/A
Diâmetro equivalente	0,88 mm (± 5%)
Comprimento da fibra	51,5 mm (± 5%)
Forma	Recartilhada
Fator de forma	60 (± 10%)
Resistência à tração	400 a 500 MPa
Módulo de elasticidade	5,0 GPa
Densidade	0,99 g/cm³

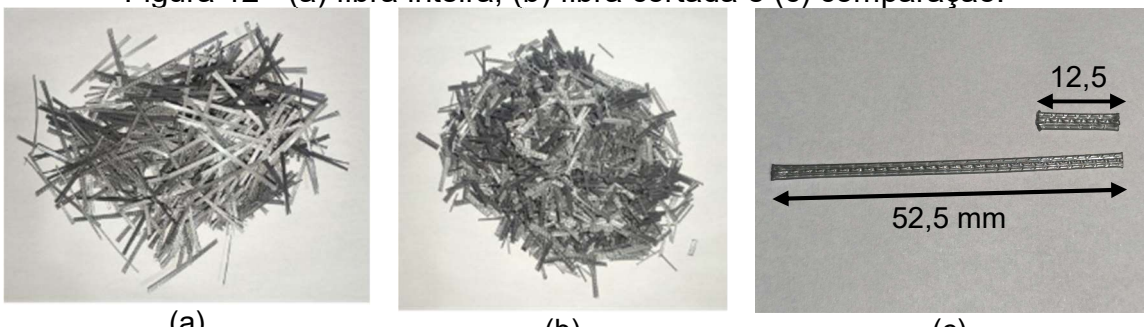
Fonte: Adaptado de Concrefiber (2024).

A fibra de polipropileno originalmente utilizada apresentava comprimento nominal de 51,5 mm e diâmetro equivalente de 0,88 mm, sendo classificada normativamente como macrofibra, conforme a EN 14889-2:2006 e a NBR 16942:2021. Visando melhorar a dispersão das fibras na matriz cimentícia e adequar suas dimensões às formas utilizadas nos ensaios experimentais (corpos de prova cilíndricos de 5 × 10 cm e prismáticos de 4 × 4 × 16 cm), as fibras foram manualmente cortadas para comprimento aproximado de 12,5 mm, resultando em fator de forma (*aspect ratio*) de aproximadamente 14,2, como é possível observar na Figura 12.

Essa adaptação buscou reduzir possíveis problemas relacionados ao empacotamento, orientação preferencial das fibras, formação de vazios e dificuldades de moldagem associadas ao uso de fibras excessivamente longas em corpos de prova de pequenas dimensões, além de aproximar a dimensão das fibras ao comprimento típico de microfibras de polipropileno. A redução do fator de forma também contribui para melhorar a trabalhabilidade e a homogeneidade do compósito, favorecendo uma distribuição mais uniforme das fibras na matriz cimentícia e reduzindo a ocorrência de aglomerações, fenômeno frequentemente observado em misturas com fibras longas e elevado aspecto geométrico.

Ressalta-se, contudo, que a redução do comprimento não altera a classificação normativa da fibra, que permanece caracterizada como macrofibra devido ao diâmetro equivalente superior a 0,30 mm.

Figura 12 - (a) fibra inteira, (b) fibra cortada e (c) comparação.



(a) (b) (c)

Fonte: Autora (2026).

3.3 DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

A Tabela 4 apresenta o traço referência do Concreto de Ultra-Alto Desempenho com Fibras (UHPC) utilizado para confecção dos corpos de provas, sendo uma

adaptação dos traços estudados por Prado, Carrazedo e Debs (2022), e Da Silva *et al.* (2024).

Serão investigadas duas misturas de UHPC com proporções de volume de fibra de polipropileno de 1,0% (UHPC 1) e 1,5% (UHPC 2). Também será analisada uma mistura de UHPC sem fibras (UHPC 0) para analisar a influência das fibras de polipropileno na mistura.

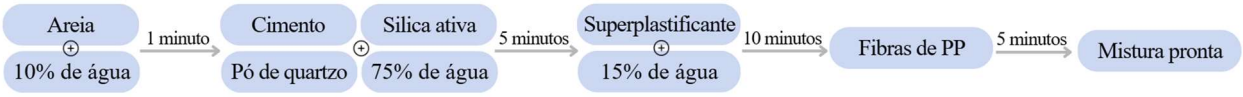
Tabela 4 - Traço usado para o UHPC.

Materiais	**UHPC 0 (kg/m3)**	**UHPC 1 (kg/m3)**	**UHPC 2 (kg/m3)**
Cimento CPV	757,20	757,20	757,20
Areia 80/100	950,00	950,00	950,00
Pó de quartzo / SM 200	50,00	50,00	50,00
Sílica ativa	230,00	230,00	230,00
Superplastificante	50,00	50,00	50,00
Água	160,00	160,00	160,00
Fibra de polipropileno	-	9,90	14,85

Fonte: Autora (2026).

Os procedimentos de mistura foram realizados em argamassadeira, seguindo uma sequência previamente estabelecida e cronometrada, a fim de garantir a adequada homogeneização dos materiais, como ilustra o diagrama da Figura 13.

Figura 13 - Procedimento de mistura.



Fonte: Autora (2026).

Durante o processo de mistura, buscou-se garantir a completa homogeneização dos materiais. Quando o equipamento era desligado para adição dos materiais, realizava-se a mistura manual com ajuda de uma colher de pedreiro, assegurando que todo o material fosse adequadamente incorporado.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme as recomendações da ABNT NBR 5738:2016. Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida por 28 dias, à temperatura de aproximadamente 25 °C.

Com o objetivo de assegurar a representatividade estatística e reduzir a dispersão dos resultados experimentais, estabeleceu-se a moldagem de, no mínimo, seis corpos de prova para cada idade de ensaio analisada. Após a realização dos ensaios, os resultados foram submetidos à análise de variabilidade, com a identificação e desconsideração de valores discrepantes, sendo então adotados os três resultados mais consistentes para a determinação da média representativa. Tal procedimento visa aumentar a confiabilidade e a robustez dos dados obtidos, contribuindo para maior precisão nas análises e interpretações dos resultados, conforme sintetizado na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio.

Ensaios de caracterização do concreto	**Quantidade de corpos de prova (un.)**				
	UHPC 0 (28 dias)	**UHPC 1 (28 dias)**	**UHPC 2 (28 dias)**	**UHPC 1 (1 ano)**	**UHPC 2 (1 ano)**
Resistência à compressão e módulo de elasticidade	3	3	3	3	3
Resistência à tração por compressão diametral	3	3	3	3	3
Resistência à tração na flexão	3	3	3	3	3

Fonte: Autora (2026).

3.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A resistência à compressão axial foi determinada em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, conforme os procedimentos estabelecidos pela 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.

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \quad (1)$$

Sendo:

f_c : resistência a compressão, em megapascals (MPa);

F : força máxima, em Newtons (N);

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

3.4.1 Módulo de elasticidade

O ensaio também possibilitou a determinação do módulo de elasticidade do UHPC, calculados a partir da expressão (2). Essa propriedade é essencial para a caracterização da rigidez do material e para a análise do seu comportamento deformacional em serviço. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 8522-1:2021, o módulo de elasticidade é definido pelo coeficiente angular da reta tangente à curva tensão-deformação na origem, sendo determinado, no regime elástico, pelo módulo secante correspondente ao intervalo compreendido entre uma tensão inicial e 30% da resistência à compressão do concreto.

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

Sendo:

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

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

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

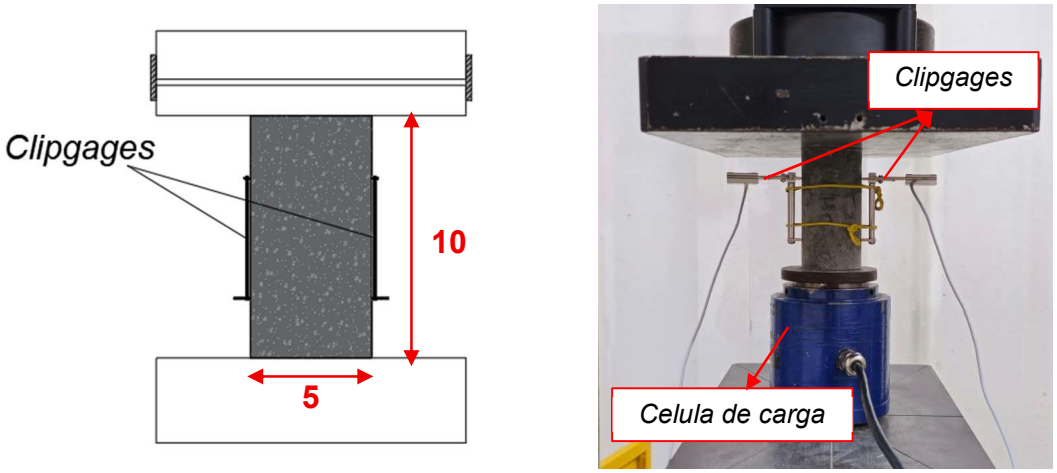
ε_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior.

Para a obtenção da curva tensão-deformação, os corpos de prova foram instrumentados com dispositivos de medição de deformação axial (*clipgages*) acoplados diretamente às amostras, permitindo o monitoramento contínuo das deformações durante a aplicação da carga, como mostra a Figura X-a. Os clip-gages registraram, em tempo real, os deslocamentos sofridos pelo corpo de prova submetido ao ensaio de compressão axial, possibilitando a caracterização do comportamento mecânico do material ao longo do carregamento. Em conjunto, a força aplicada foi medida por meio de uma célula de carga com capacidade de 3,96 tf, posicionada sobre o corpo de prova e conectada ao sistema de aquisição de dados. Os valores de carga foram enviados automaticamente ao software de monitoramento, que registrou simultaneamente os dados de força e deformação durante todo o ensaio.

Os dados obtidos foram posteriormente processados para a construção do diagrama tensão-deformação e para a determinação do módulo de elasticidade, parâmetro fundamental para a avaliação da rigidez do material e para a análise da

influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento mecânico do UHPC. O esquema e execução do ensaio de resistência à compressão axial é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Ensaio de compressão axial com instrumentação para medição de deformações. a) Esquema do ensaio de compressão; b) Ensaio de compressão em laboratório.



(a) (b)

Fonte: Autora (2026).

3.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO POR 3 PONTOS

O ensaio de flexão de três pontos de vigas prismáticas de concreto, determina a resistência à tração na flexão pelo princípio da viga biapoiada com carga concentrada no centro do vão e determina a contribuição das fibras como reforço da seção após os processos de fissuração. Para o ensaio foi adotado os procedimentos da NBR 13279:2005, utilizando corpos de prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm), aplicados em uma máquina de ensaio até a ruptura. A resistência à tração na flexão foi obtida através da equação (3).

$$R_f = \frac{1{,}5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \quad (3)$$

Sendo:

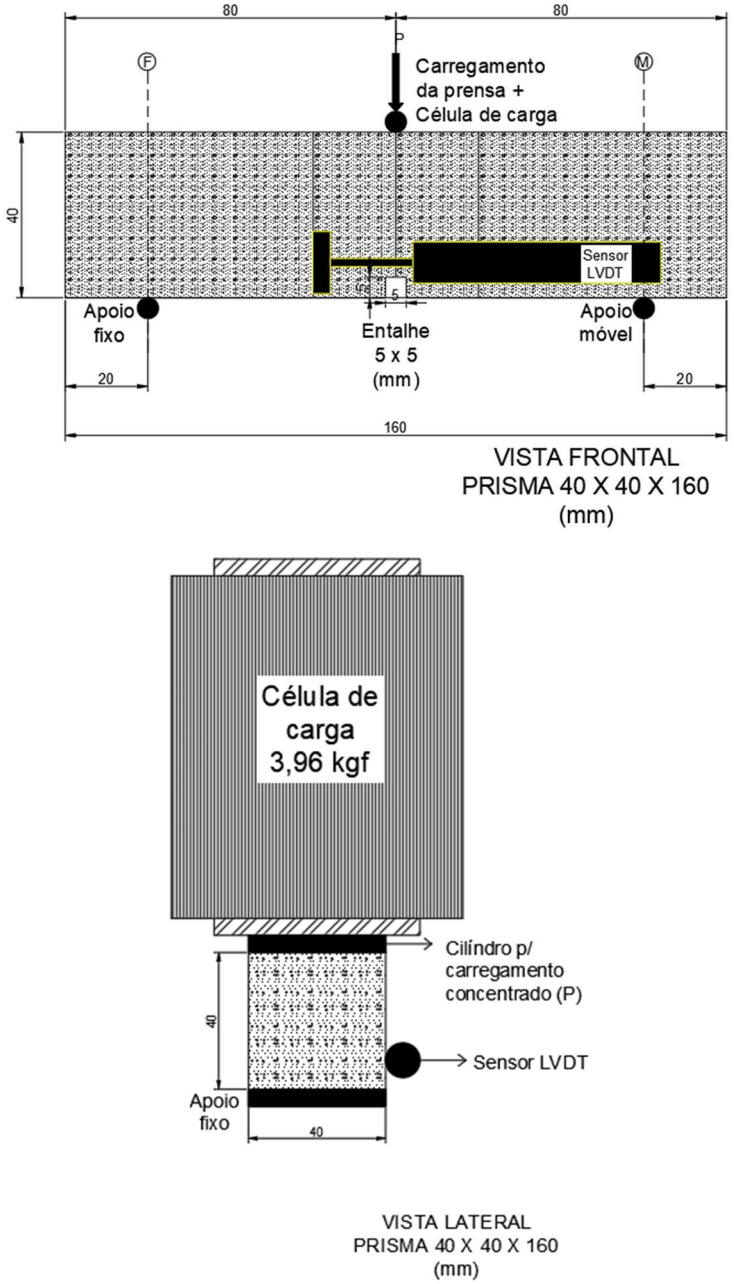
R_f : resistência à tração na flexão, em megapascals (MPa);

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

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

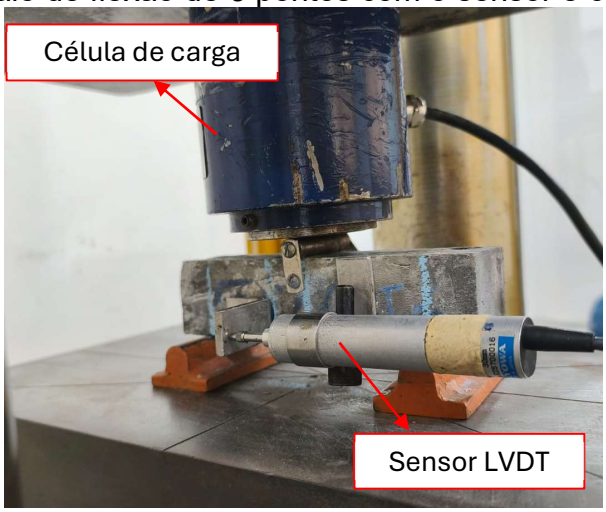
Para obtenção da curva tensão-deslocamento, foi instalado um transdutor de deslocamento (sensor LVDT) na face inferior para determinar o deslocamento na região tracionada. Um entalhe central foi feito no vão central do prisma, com 5 mm de espessura e 5 mm de altura, com a finalidade de induzir a ruptura na região central. Foi colocada uma célula de carga sobre a amostra prismática a fim de registrar a força de ruptura. O esquema do ensaio é apresentado na Figura 15 e a execução do ensaio em laboratório é apresentado na Figura 16.

Figura 15 - Esquema do ensaio de flexão por 3 pontos.



Fonte: Autora (2026).

Figura 16 - Ensaio de flexão de 3 pontos com o sensor e célula de carga.

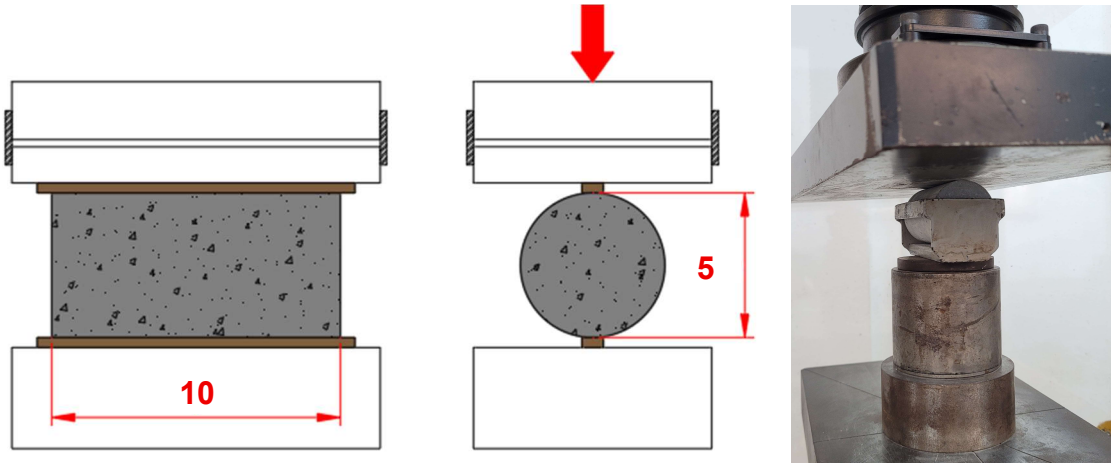


Fonte: Autora (2026).

3.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio foi realizado a partir da ABNT NBR 7222:2011, que descreve o ensaio de tração indireta, também chamado de *brasilian test*. O corpo de prova cilíndrico é submetido a carregamentos na direção diametral, até a ruptura, como apresenta a Figura 17.

Figura 17 - Ensaio de resistência à tração diametral: (a) esquema e (b) execução em laboratório.



(a) (b)

Fonte: Autora (2026).

A Equação (4) apresenta o cálculo da resistência à tração por compressão diametral.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (4)$$

Em que:

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

F : Força máxima obtida no ensaio, em Newtons (N);

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

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

3.7 ENVELHECIMENTO ACELERADO

Para o ensaio de envelhecimento acelerado, os corpos de prova foram submetidos a ciclos de imersão e secagem conforme os procedimentos da ABNT NBR 15498:2021, após os 28 dias de cura úmida. Inicialmente, os corpos de prova são submersos em água por um período de 18 horas. Em seguida, foram colocados em estufa ventilada à temperatura de (60 ± 5) °C e umidade relativa inferior a 20% durante 6 horas (Figura 18). Esse procedimento foi repetido por 50 ciclos, sendo que tal processo de envelhecimento acelerado corresponde, de forma aproximada, à simulação de 1 ano de exposição em condições naturais.

Figura 18 - Ensaio de envelhecimento acelerado.



Fonte: Autora (2026).

3.8 CORRELAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES ENSAIOS DE TRAÇÃO

Para estabelecer uma correlação entre os resultados dos ensaios de tração na flexão e tração por compressão diametral, foi adotada como referência a relação teórica proposta pela ABNT NBR 6118:2026 para concretos convencionais, uma vez que não foram identificadas recomendações normativas nacionais ou internacionais que estabeleçam correlações equivalentes para UHPC. Dessa forma, a relação teórica prevista pela norma foi utilizada apenas como referência comparativa, não como critério de validação dos resultados experimentais.

A norma não estabelece diretamente uma relação entre a resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) e a resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$). O que a norma fornece são correlações entre essas resistências e a resistência à tração direta média ($f_{ct,m}$), conforme mostra as Equações (5) e (6).

$$f_{ct,m} = 0{,}9 \cdot f_{ct,sp} \tag{5}$$

$$f_{ct,m} = 0{,}7 \cdot f_{ct,f} \tag{6}$$

Portanto, a partir das relações propostas pela NBR 6118:2026 entre as resistências à tração indireta e a resistência à tração direta média, pode-se deduzir uma relação teórica entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral, resultando em um fator de aproximadamente 1,29, como apresenta a equação (7).

$$\frac{f_{ct,f}}{f_{ct,sp}} = \frac{0{,}9}{0{,}7} = 1{,}29 \tag{7}$$

3.9 PESO ESPECÍFICO

A determinação da massa específica dos concretos foi realizada a partir da medição da massa dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos após o período de cura correspondente a cada traço analisado. Para isso, utilizou-se uma balança digital de precisão modelo AS5500C, da marca Marte.

Após a determinação das massas e volumes, a massa específica aparente foi obtida pela através da expressão (8).

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{8}$$

Onde:

ρ : é a massa específica (g/cm³);

m : é a massa do corpo de prova (g);

V : é o volume do corpo de prova (cm³).

Posteriormente, os valores de massa específica foram convertidos em peso específico por meio da relação (9).

$$\gamma = \rho \cdot g \tag{9}$$

Em que:

γ : é o peso específico;

g : é a aceleração da gravidade (g = 9,81 m/s²).

4 RESULTADOS

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados de resistência à compressão axial apresentados na Tabela 6 e na Figura 19 evidenciam que, embora o traço tenha sido desenvolvido com base em dosagens de UHPC reportadas na literatura, os valores de resistência obtidos ficaram abaixo dos limites geralmente adotados para a classificação desse material, aproximando-se daqueles observados em concretos de alto desempenho (CAD).

Ainda assim, os resultados demonstram o efeito benéfico da incorporação de fibras em comparação ao traço de referência (UHPC 0), bem como a influência do teor de fibras no comportamento mecânico após o processo de envelhecimento acelerado. Aos 28 dias, o traço UHPC 1 apresentou a maior resistência média à compressão, alcançando 89,87 MPa, valor aproximadamente 45% superior ao obtido pelo UHPC 2 (61,90 MPa) e cerca de 88% superior ao registrado para o UHPC 0 (47,87 MPa).

A Figura 19 permite visualizar a dispersão dos resultados individuais, demonstrando que o UHPC 1 aos 28 dias apresentou desempenho consistentemente superior em todos os corpos de prova ensaiados.

Após o envelhecimento acelerado correspondente a um ano, observou-se redução da resistência para ambos os traços reforçados com fibras. O UHPC 1 apresentou resistência média de 69,68 MPa, correspondendo a uma redução de aproximadamente 22,5% em relação aos resultados obtidos aos 28 dias. Já o UHPC 2 atingiu resistência média de 44,02 MPa, representando uma redução de cerca de 28,9%. Apesar da perda de desempenho mecânico, a tendência observada aos 28 dias foi mantida, com o UHPC 1 apresentando resistências superiores às do UHPC 2 também após o envelhecimento.

A redução da resistência após o envelhecimento pode estar associada à formação e propagação de microfissuras decorrentes dos ciclos de temperatura e umidade empregados no procedimento acelerado, os quais podem comprometer parcialmente a integridade da matriz cimentícia e da zona de transição entre fibras e matriz.

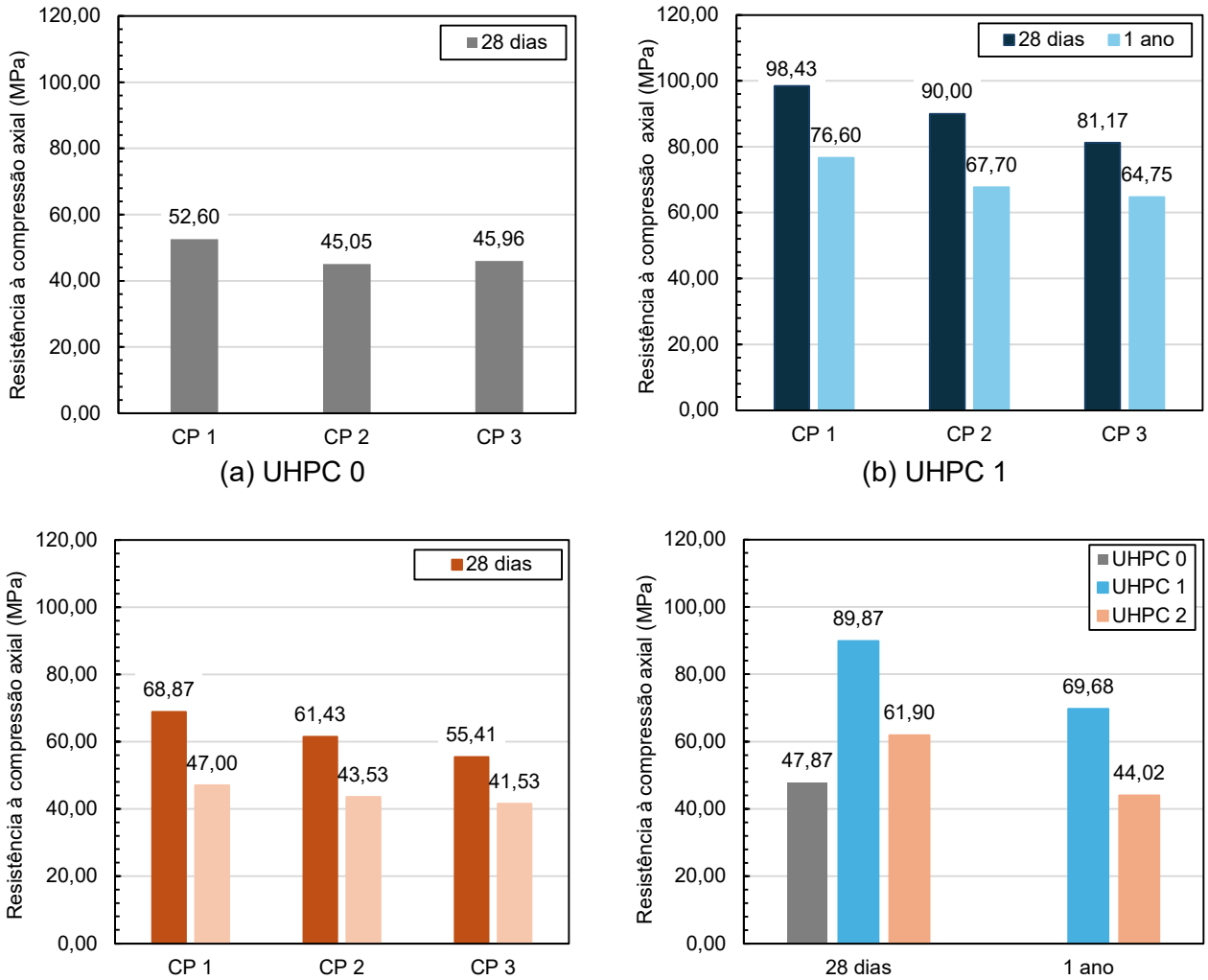
Os coeficientes de variação obtidos variaram entre 6,28% e 10,89%. O menor valor foi registrado para o UHPC 2 após um ano de envelhecimento (6,28%), enquanto o maior ocorreu para o UHPC 2 aos 28 dias (10,89%). De modo geral, os resultados indicam dispersão moderada, superior ao valor de referência frequentemente recomendado para ensaios mecânicos em concretos (aproximadamente 6%). Segundo Ziad *et al*. (2026), coeficientes de variação elevados em concretos reforçados com fibras podem estar associados à heterogeneidade do material, à distribuição não uniforme das fibras e a variações inerentes aos processos de moldagem e ensaio.

Tabela 6 - Resultados de resistência à compressão axial (MPa) do UHPC aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano).

Amostras	**28 dias**			**1 ano**	
	UHPC 0	**UHPC 1**	**UHPC 2**	**UHPC 1**	**UHPC 2**
CP 1 (MPa)	52,60	98,43	68,87	76,60	47,00
CP 2 (MPa)	45,05	90,00	61,43	67,70	43,53
CP 3 (MPa)	45,96	81,17	55,41	64,75	41,53
Média (MPa)	47,87	89,87	61,90	69,68	44,02
Coeficiente de variação (%)	8,60	9,60	10,89	8,86	6,28

Fonte: Autora (2026).

Figura 19 - Resistência à compressão axial aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano).



Fonte: Autora (2026).

Comparando os resultados experimentais obtidos aos 28 dias com os valores médios reportados na literatura (Tabela 2), conforme ilustrado na Figura 20, observa-se que as resistências obtidas nesta pesquisa foram inferiores às médias encontradas em estudos semelhantes. Para o teor de 1,0% de fibras, a literatura apresentou resistência média de 114,38 MPa, enquanto o UHPC 1 atingiu 89,87 MPa, representando uma diferença de aproximadamente 21,4%. Já para o teor de 1,5% de fibras, a resistência média reportada na literatura foi de 124,27 MPa, ao passo que o UHPC 2 apresentou 61,90 MPa, correspondendo a uma redução de cerca de 50,2%.

Além disso, verifica-se que o traço de referência desta pesquisa (UHPC 0) apresentou resistência média de 47,87 MPa, significativamente inferior ao valor médio de 123,38 MPa obtido na literatura para misturas sem fibras. Essas diferenças podem

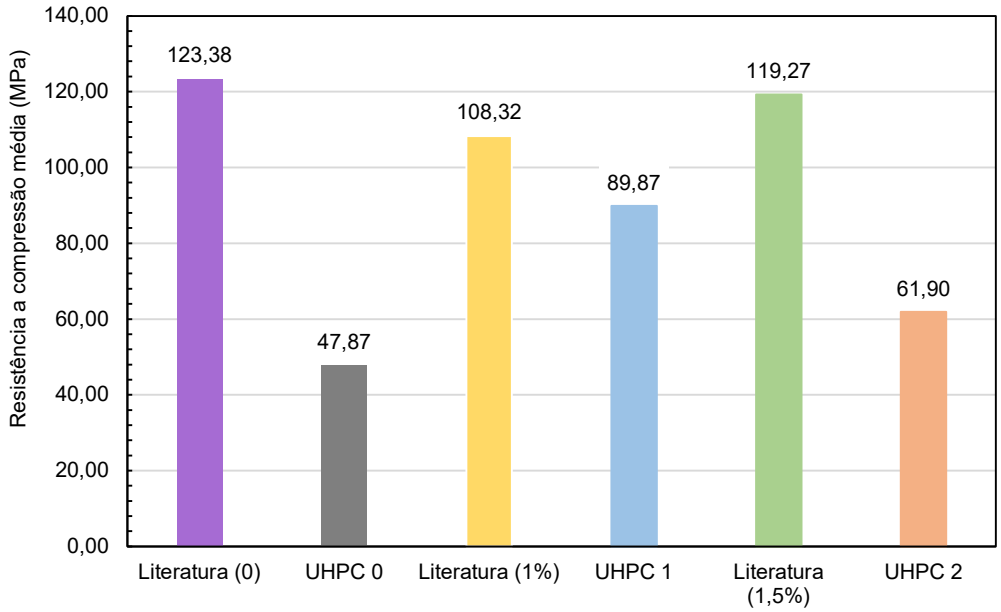
ser atribuídas a diversos fatores, tais como diferenças na composição dos traços, relação água/aglomerante, características dos materiais constituintes, métodos de mistura, condições de cura, procedimentos de moldagem e compactação, além das características geométricas e mecânicas das fibras empregadas (Ullah *et al*., 2022).

Outro aspecto relevante refere-se à influência do teor de fibras sobre a resistência mecânica. Os resultados médios da literatura indicam tendência de aumento da resistência com o incremento do teor de fibras, passando de 108,32 MPa para 119,27 MPa quando o teor é elevado de 1,0% para 1,5%. Em contrapartida, os resultados desta pesquisa apresentaram comportamento inverso, com redução da resistência de 89,87 MPa para 61,90 MPa. Esse comportamento pode estar associado à perda de trabalhabilidade decorrente do aumento da quantidade de fibras, favorecendo a formação de vazios, aglomeração de fibras e dificuldades de compactação da mistura.

Analisando individualmente os estudos utilizados na revisão bibliográfica, verifica-se que trabalhos como os de Smarzewski (2017) e Yan *et al*. (2021) também reportaram reduções na resistência à flexão quando o teor de fibras foi aumentado de 1,0% para 1,5%. Da mesma forma, estudos que utilizaram macrofibras de polipropileno, como He *et al*. (2021) e Birol e Avcialp (2025), apresentaram resistências superiores para o teor de 1,0% em comparação ao teor de 1,5%, indicando que o aumento da quantidade de fibras nem sempre resulta em melhorias mecânicas.

Além disso, os demais estudos apresentados na Tabela 2 demonstram que, embora a incorporação inicial de fibras geralmente promova ganhos de resistência, o aumento excessivo do teor fibroso tende a provocar reduções na resistência à compressão para teores mais elevados, como 2,0% e 3,0%. Esse comportamento sugere a existência de um teor ótimo de fibras, acima do qual os benefícios proporcionados pelo reforço passam a ser limitados ou até superados pelos efeitos negativos decorrentes da perda de trabalhabilidade, da formação de vazios, da aglomeração de fibras e da dificuldade de compactação da mistura.

Figura 20 - Comparação das resistências médias à compressão axial entre os traços analisados e a literatura.



Fonte: Autora (2026).

4.1.1 Módulo de Elasticidade

Analisando os resultados de modulo de elasticidade, apresentados na Tabela 7, observa-se que a incorporação das fibras não promoveu ganhos significativos de rigidez ao material. A Figura 21 apresenta os trechos elásticos das curvas tensão-deformação dos diferentes traços, evidenciando a semelhança da inclinação inicial entre as misturas. Aos 28 dias de cura úmida, o UHPC 0 apresentou módulo de elasticidade médio de 47,87 GPa, enquanto o UHPC 1 apresentou média de 47,84 GPa. A diferença entre ambos foi inferior a 0,1%, indicando que a adição de 1,0% de fibras não alterou significativamente a rigidez inicial do compósito.

Por outro lado, o aumento do teor de fibras para 1,5% (UHPC 2) resultou em uma redução do módulo de elasticidade para 43,66 GPa, correspondendo a uma diminuição de aproximadamente 8,8% em relação ao traço sem fibras. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de as fibras de polipropileno apresentarem módulo de elasticidade significativamente inferior ao da matriz cimentícia do UHPC. Enquanto a matriz endurecida possui módulo tipicamente superior a 40 GPa, a fibra de polipropileno apresenta módulo 5 GPa. Dessa forma, o aumento da fração volumétrica de fibras tende a influenciar positivamente a

ductilidade e a capacidade de absorção de energia, mas não contribui para o aumento da rigidez global do compósito.

Após 1 ano de envelhecimento acelerado, observou-se redução do módulo de elasticidade do UHPC 1, que passou de 47,84 GPa para 44,10 GPa, representando uma diminuição de aproximadamente 7,8%. Em contrapartida, o UHPC 2 apresentou pequeno aumento, passando de 43,66 GPa para 44,98 GPa, equivalente a um acréscimo de cerca de 3,0%. Como resultado, os dois traços apresentaram valores muito próximos após o envelhecimento, sugerindo que os ciclos de exposição utilizados não provocaram degradação significativa da rigidez do material.

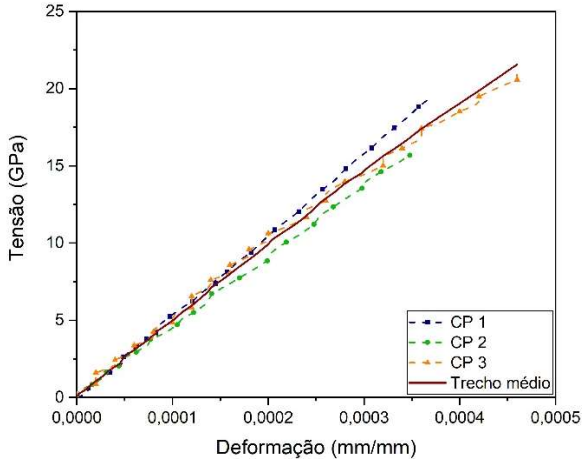
A convergência dos resultados após o envelhecimento acelerado pode indicar que os efeitos da continuidade da hidratação e do refinamento microestrutural compensaram parcialmente possíveis danos decorrentes dos ciclos de exposição. Além disso, as diferenças observadas entre as médias são relativamente pequenas quando comparadas aos coeficientes de variação obtidos, os quais variaram entre 8,43% e 18,03%, valores considerados aceitáveis para ensaios de materiais cimentícios de elevada resistência.

Tabela 7 - Valores do módulo de elasticidade do UHPC em 28 dias e 1 ano.

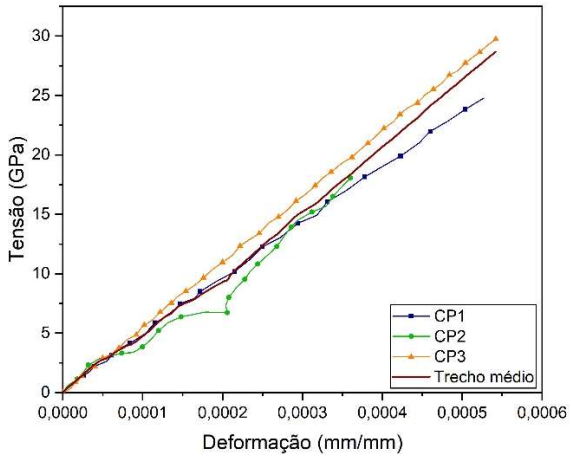
Amostras	**28 dias**			**1 ano**	
	UHPC 0	**UHPC 1**	**UHPC 2**	**UHPC 1**	**UHPC 2**
CP1 (GPa)	52,60	54,85	46,76	53,20	52,36
CP2 (GPa)	45,96	47,02	44,61	40,60	44,46
CP3 (GPa)	45,05	41,63	39,59	38,50	38,14
Média (GPa)	47,87	47,84	43,66	44,10	44,98
Coeficiente de variação (%)	8,6	13,90	8,43	18,03	15,83

Fonte: Autora (2026).

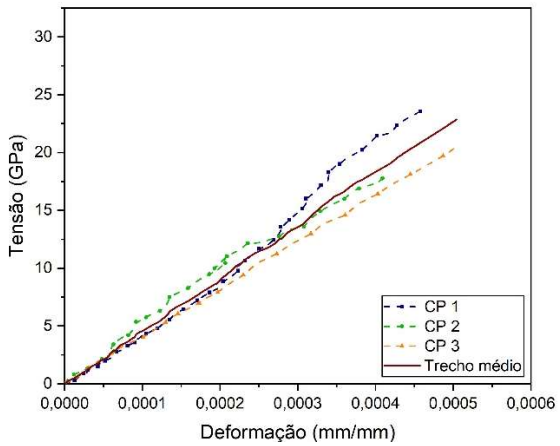
Figura 21 - Trechos elásticos das curvas tensão × deformação utilizados para determinação do módulo de elasticidade do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2.



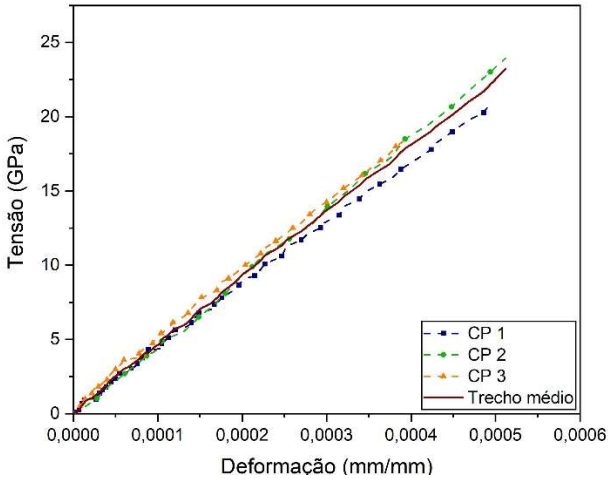
(a) UHPC 0 – 28 dias



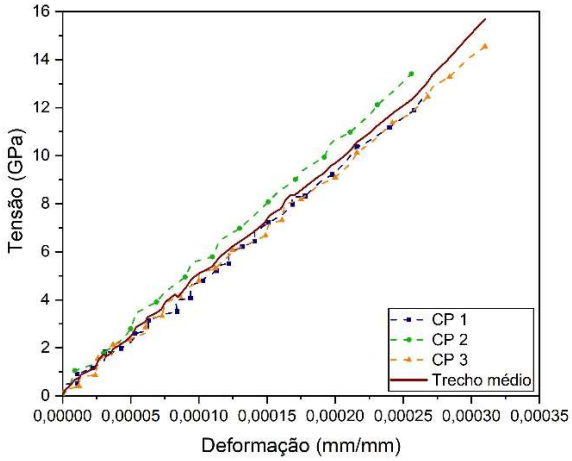
(b) UHPC 1 – 28 dias



(c) UHPC 1 – 1 ano



(d) UHPC 2 – 28 dias



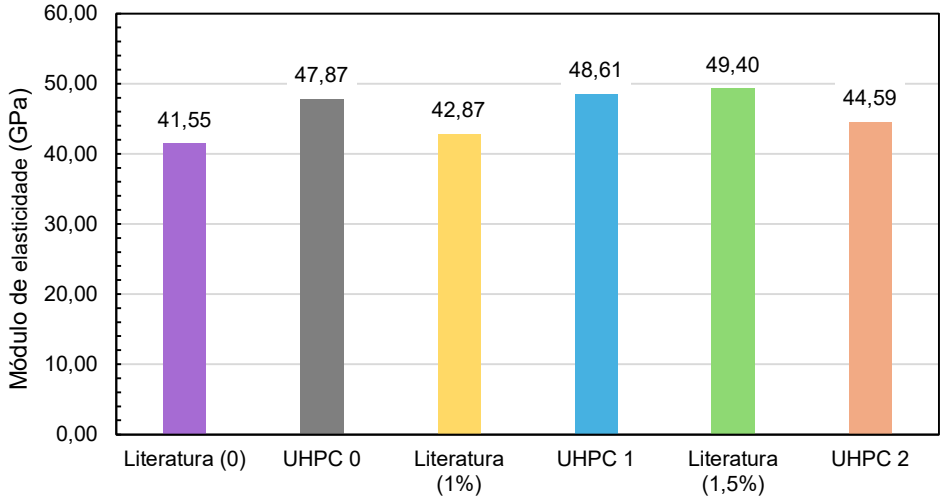
(f) UHPC 2 – 1 ano

Fonte: Autora (2026).

Comparando os resultados experimentais com os valores médios encontrados na literatura (Tabela 2), verifica-se na Figura 22 que o UHPC 0 e UHPC 1 apresentaram módulos de elasticidade superiores às respectivas médias reportadas pelos estudos analisados. Por outro lado, para o teor de 1,5% de fibras, o módulo de elasticidade experimental foi aproximadamente 11% inferior ao valor médio encontrado na literatura, evidenciando uma redução da rigidez do material em teores mais elevados de fibras. Entretanto, a análise individual dos trabalhos incluídos na revisão bibliográfica revelou que a maioria dos autores também observou diminuição do módulo de elasticidade à medida que o teor de fibras aumentava. Dessa forma, o comportamento observado para o UHPC 2 está alinhado à tendência predominante reportada pelos estudos analisados.

Esse comportamento pode ser atribuído à maior dificuldade de dispersão das fibras em teores elevados, ao aumento da incorporação de vazios e à redução da compacidade da matriz cimentícia, fatores que tendem a diminuir a rigidez global do material. Resultados semelhantes foram observados em estudos que empregaram tanto macrofibras quanto microfibras de polipropileno.

Figura 22 - Comparação dos módulos de elasticidade médios entre os traços analisados e a literatura.



Fonte: Autora (2026).

4.1.2 Modo de Ruptura

A Figura 23 apresenta os modos de ruptura dos traços UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2 após o ensaio de compressão axial. Observa-se que o UHPC 0, sem adição

de fibras, apresentou ruptura predominantemente frágil, caracterizada por intensa fragmentação e destacamento do material. Em contrapartida, os traços UHPC 1 e UHPC 2 exibiram comportamento mais dúctil, evidenciado pela manutenção da integridade do corpo de prova após a ruptura. Nota-se ainda que o UHPC 2 apresentou menor desplacamento superficial e menor dispersão de fragmentos em comparação ao UHPC 1, resultado atribuído ao maior teor de fibras incorporado à matriz, que contribuiu para o confinamento do material, a limitação da propagação das fissuras e o aumento da capacidade de absorção de energia após o pico de resistência.

Figura 23 - Corpos de prova rompidos por compressão axial do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2.



(a) UHPC 0 – 28 dias



(b) UHPC 1 – 28 dias



(c) UHPC 2 – 28 dias



(d) UHPC 1 – 1 ano



(e) UHPC 2 – 1 ano

Fonte: Autora (2026).

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados de resistência à tração na flexão, apresentados na Tabela 8 e ilustrados no Figura 24, mostram que aos 28 dias, o UHPC 2 apresentou maior resistência, com acréscimo de aproximadamente 11,0% em relação ao UHPC 1, o que pode ser associado ao maior teor de fibras, favorecendo a transferência de tensões após a fissuração. Entretanto, essa diferença corresponde a um incremento de aproximadamente 1,3 MPa, representando uma variabilidade relativamente baixa, que pode estar dentro da variabilidade experimental inerente ao ensaio.

Após o envelhecimento acelerado, observa-se uma inversão de comportamento, com o UHPC 1 apresentando desempenho superior ao UHPC 2, porém a diferença entre as médias após o envelhecimento (aproximadamente 1,0 MPa) também é relativamente pequena e pode, em parte, ser atribuída à variabilidade experimental do ensaio.

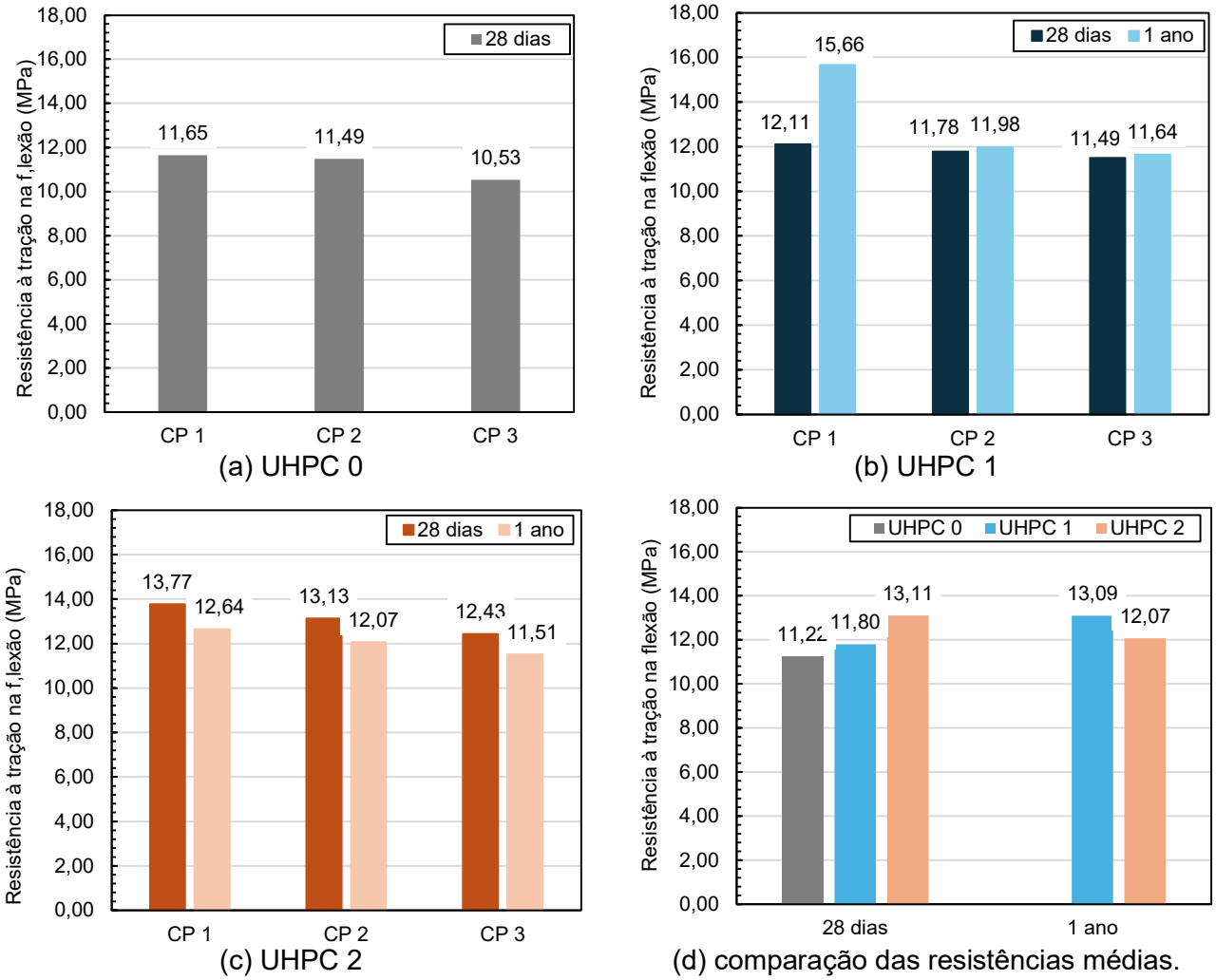
Tabela 8 - Resultados de resistência à tração na flexão do UHPC aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano)

Amostras	**28 dias**			**1 ano**	
	UHPC 0	**UHPC 1**	**UHPC 2**	**UHPC 1**	**UHPC 2**
CP 1 (MPa)	11,65	12,11	15,66	13,77	12,64
CP 2 (MPa)	11,49	11,78	11,98	13,13	12,07
CP 3 (MPa)	10,53	11,49	11,64	12,43	11,51
Média (MPa)	11,22	11,80	13,09	13,11	12,07

Fonte: Autora (2026).

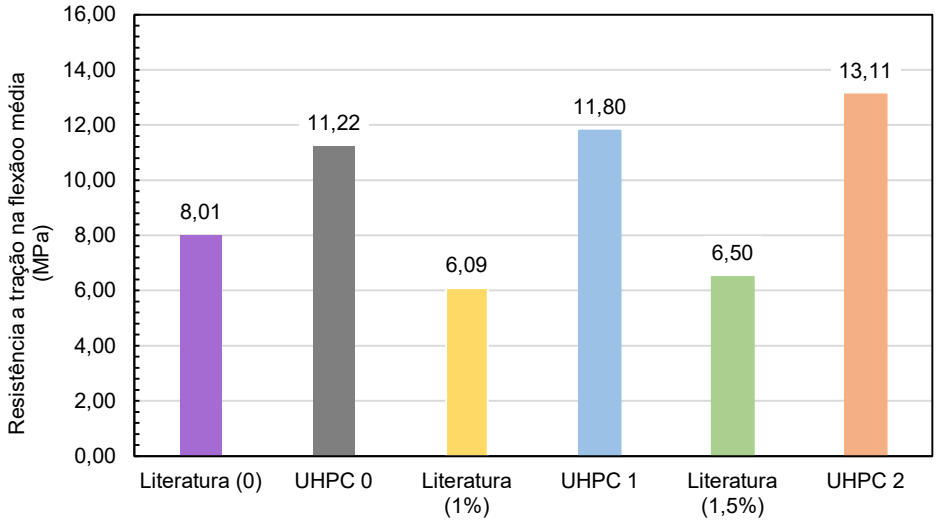
Comparando as médias de resistência à tração na flexão dos traços analisados com os valores médios reportados na literatura (Tabela 2), conforme apresentado no Figura 25, observa-se que, para o teor de 1,0% de fibra, a literatura apresentou um desempenho ligeiramente inferior, enquanto para o teor de 1,5%, a literatura apresentou um resultado superior, porém ainda próximo ao valor dos traços analisados na pesquisa. As variações podem ser atribuídas às particularidades dos traços e a estrutura das fibras utilizadas. No entanto, para o ensaio de tração na flexão, essas diferenças não se mostraram significativamente relevantes, uma vez que os resultados experimentais apresentaram valores próximos aos da literatura.

Figura 24 - Resistência à tração na Flexão aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano).



Fonte: Autora (2026).

Figura 25 - Comparação das resistências médias à tração na flexão entre os traços analisados e a literatura.



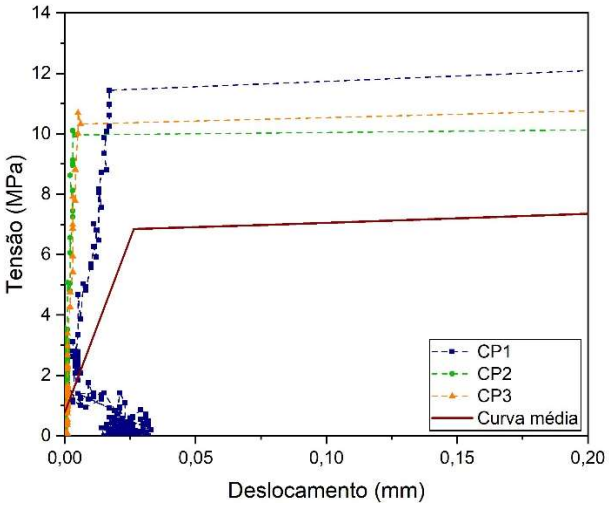
Fonte: Autora (2026)

4.2.1 Pós-fissuração e Modo de Ruptura

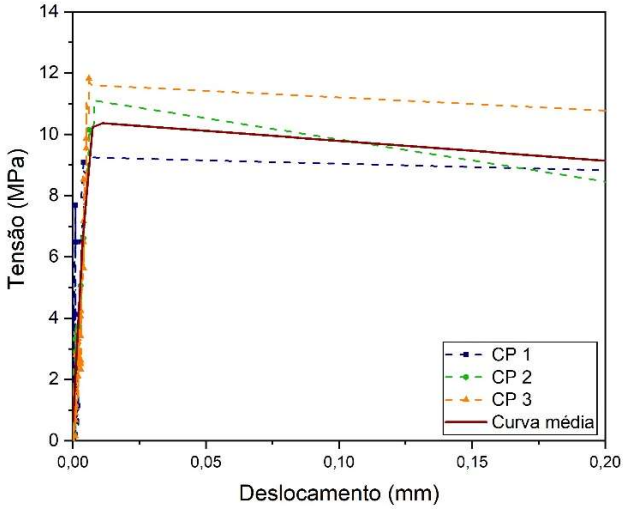
As curvas tensão–deslocamento apresentadas na Figura 26 evidenciam que a incorporação de fibras de polipropileno proporciona um comportamento pós-fissuração mais pronunciado ao concreto. Enquanto os corpos de prova sem fibras apresentam perda abrupta de resistência após o surgimento da fissura, os compósitos reforçados com fibras mantêm capacidade residual de suporte de carga, resultando em uma resposta mais dúctil e em maior absorção de energia. Esse comportamento está associado ao efeito de ponte das fibras, que atravessam as fissuras e promovem a transferência de tensões entre suas faces, retardando sua propagação e reduzindo a velocidade de degradação da resistência após a fissuração.

Esse comportamento também pode ser observado na Figura 27, que apresenta os corpos de prova após o ensaio de flexão. Verifica-se que os espécimes reforçados com fibras mantiveram sua integridade estrutural mesmo após a ruptura da matriz cimentícia, permanecendo unidos pelas fibras distribuídas ao longo da seção fissurada. Em contraste, os corpos de prova sem fibras sofreram separação mais acentuada das partes rompidas, característica típica de materiais com comportamento frágil. A Figura 28 apresenta uma ampliação da região fissurada após a ruptura, permitindo visualizar as fibras de polipropileno atuando como elementos de ligação entre as faces da fissura. Esse fenômeno evidencia o mecanismo de ponte de fissuras (*crack bridging*), responsável pela transferência de tensões através da descontinuidade e pela manutenção da capacidade resistente residual do material. Tais observações corroboram os resultados obtidos nas curvas tensão–deslocamento, confirmando a contribuição das fibras de polipropileno para o aumento da tenacidade, da ductilidade e da capacidade de carga residual do concreto após a formação das fissuras.

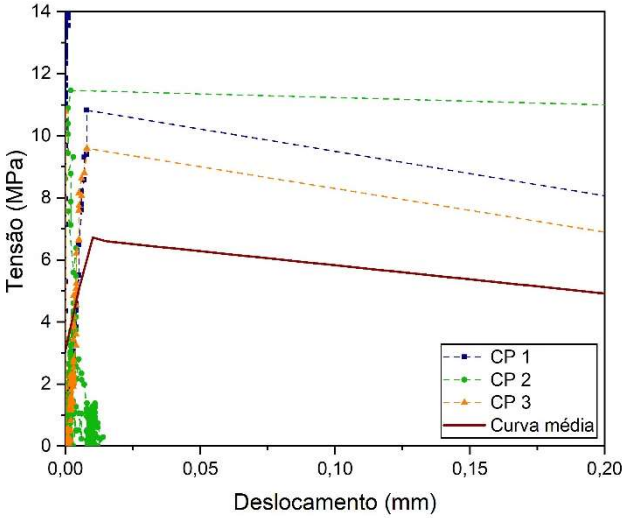
Figura 26 - Curvas tensão x deslocamento do ensaio de tração na flexão do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2.



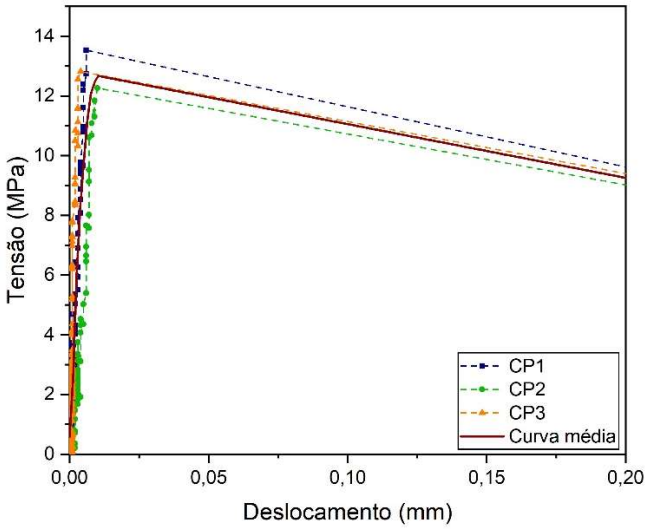
(a) UHPC 0 – 28 dias



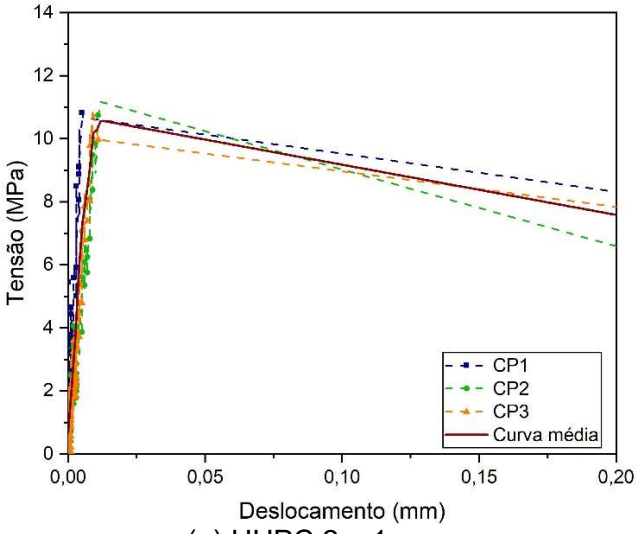
(b) UHPC 1 – 28 dias



(c) UHPC 1 – 1 ano



(d) UHPC 2 – 28 dias



(e) UHPC 2 – 1 ano

Fonte: Autora (2026).

Figura 27 - Corpos de prova rompidos por tração na flexão do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2.



(a) UHPC 0 – 28 dias



(b) UHPC 1 – 28 dias



(c) UHPC 2 – 28 dias



(d) UHPC 1 – 1 ano



(e) UHPC 2 – 1 ano

Fonte: Autora (2026).

Figura 28 - Ampliação da região de ruptura evidenciando a presença e atuação das fibras de polipropileno na transferência de tensões pós-fissuração.



Fonte: Autora (2026).

4.3 RESISTÊNCIA A TAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados apresentados na Tabela 9 e Figuras 29 evidenciaram superioridade do UHPC 1 em todas as idades. Aos 28 dias a adição de 1% de fibras promoveu um aumento expressivo de aproximadamente 122% em relação ao concreto sem fibras. Esse resultado demonstra a eficiência das fibras no controle da propagação de fissuras e na transferência de tensões de tração através do mecanismo de ponte de fissuras, retardando a ruptura da matriz cimentícia.

Por outro lado, o aumento do teor de fibras para 1,5% não resultou em incremento adicional da resistência, sendo apenas 19% superior ao UHPC de referência e cerca de 46% inferior ao UHPC 1. Esse comportamento sugere que a elevação do teor de fibras pode ter comprometido a trabalhabilidade da mistura, favorecendo a aglomerações de fibras e distribuição não uniforme dos reforços na matriz. Consequentemente, os benefícios proporcionados pelas fibras não foram plenamente mobilizados, reduzindo sua eficiência no aumento da resistência à tração.

Após o envelhecimento acelerado equivalente a aproximadamente um ano, observou-se aumento da resistência à tração em todas as misturas contendo fibras, conforme ilustrado na Figura 29(b), (c) e (d). Em relação a cada teor aos 28 dias, UHPC 1 e UHPC 2 apresentou um acréscimo de aproximadamente 21% e um acréscimo de cerca de 38%, respectivamente.

Esse ganho de resistência ao longo do tempo pode ser atribuído à continuidade das reações de hidratação e às reações pozolânicas promovidas pela sílica ativa, que contribuem para o refinamento da microestrutura da matriz, redução da porosidade e fortalecimento da zona de transição entre pasta e fibras. Além disso, a densificação progressiva da matriz melhora a aderência fibra-matriz, aumentando a eficiência do mecanismo de transferência de tensões.

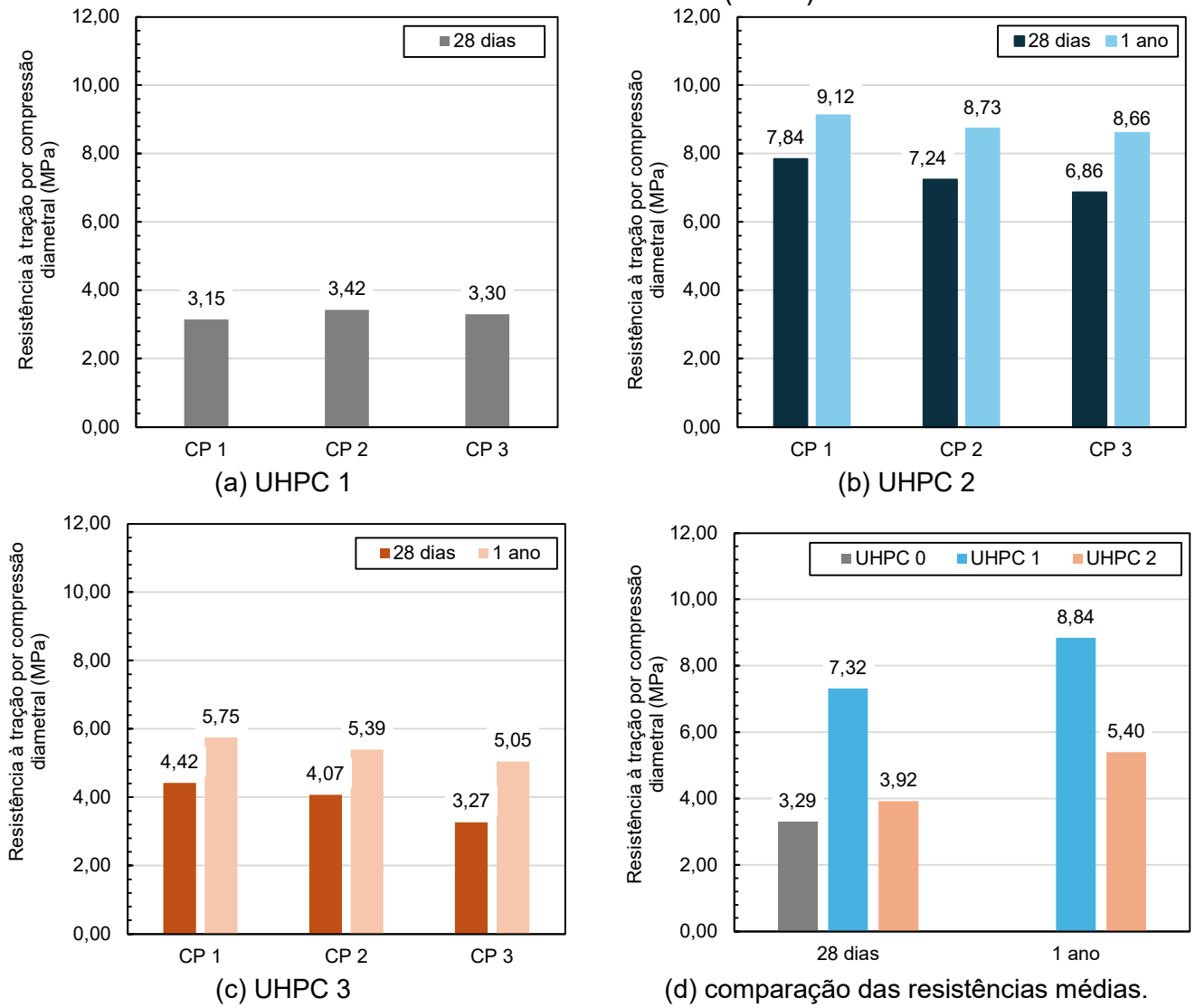
De forma geral, os resultados demonstram que a incorporação moderada de fibras de polipropileno contribui significativamente para o aumento da resistência à tração por compressão diametral do UHPC. Entretanto, o aumento do teor de fibras de 1% para 1,5% não resultou em ganhos proporcionais, indicando a existência de um teor ótimo de fibras para a composição estudada. Além disso, o envelhecimento acelerado mostrou-se positivo, evidenciando o ganho de resistência ao longo do tempo.

Tabela 9 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral do UHPC aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano).

Amostras	28 dias			1 ano	
	UHPC 0	UHPC 1	UHPC 2	UHPC 1	UHPC 2
CP 1 (MPa)	3.15	7,84	4.42	9.12	5.75
CP 2 (MPa)	3.42	7,24	4.07	8.73	5.39
CP 3 (MPa)	3.30	6,86	3.27	8.66	5.05
Média (MPa)	3.29	7,32	3.92	8.84	5.40

Fonte: Autora (2026).

Figura 29 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias e após envelhecimento acelerado (1 ano).



(a) UHPC 1 (b) UHPC 2

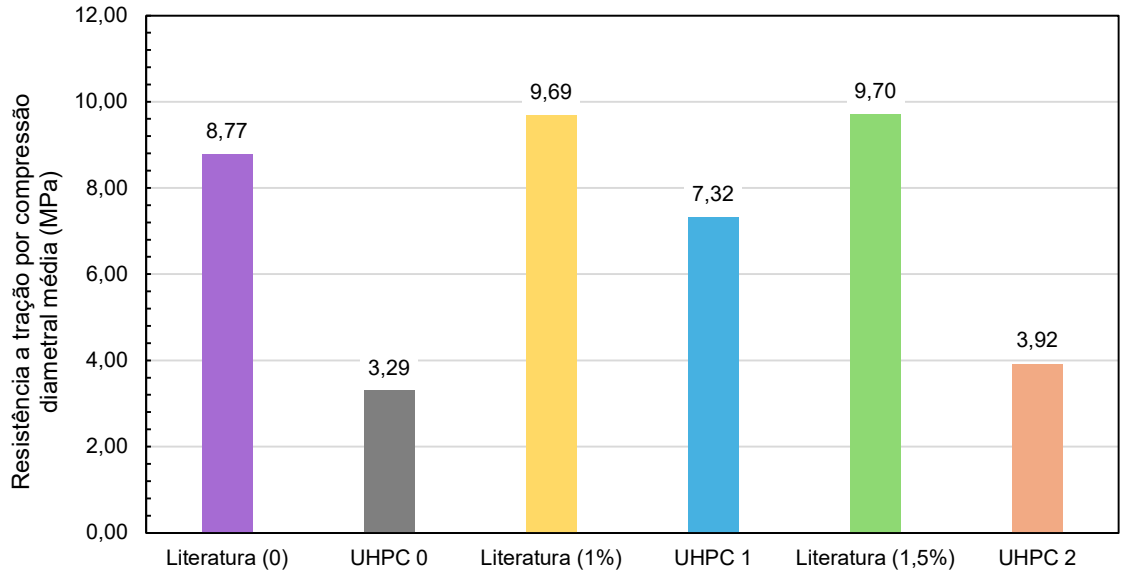
(c) UHPC 3 (d) comparação das resistências médias.

Fonte: Autora (2026).

A Figura 30 apresenta a comparação dos resultados médios aos 28 dias com os resultados encontrados na literatura (Tabela 2), observa-se que todas as misturas

avaliadas apresentaram resistências à tração por compressão diametral inferiores às reportadas por outros pesquisadores. O valor médio encontrado para o UHPC de referência foi aproximadamente 62,5% inferior à média da literatura. Da mesma forma, o UHPC 1 e UHPC 2 apresentou uma diferença de aproximadamente 24,5% e 59,6% inferior, respectivamente. Essas diferenças podem estar relacionadas às características das fibras utilizadas, ao método de mistura, à orientação e dispersão das fibras na matriz, bem como às condições de cura e composição do concreto. Ainda assim, os resultados seguiram a tendência observada na literatura, evidenciando que a incorporação de fibras aumenta a resistência à tração, embora exista um teor ótimo de adição acima do qual os ganhos podem ser reduzidos devido à perda de homogeneidade da mistura.

Figura 30 - Comparação das resistências médias à tração por compressão diametral entre os traços analisados e a literatura.



Fonte: Autora (2026).

4.3.1 Modo de Ruptura

A Figura 31 apresenta os corpos de prova após o ensaio de tração por compressão diametral. Observa-se que o concreto sem adição de fibras apresentou ruptura completa ao longo do plano diametral de tração, resultando na separação das partes do corpo de prova e evidenciando seu comportamento frágil. Em contrapartida, os concretos reforçados com 1,0% e 1,5% de fibras de polipropileno apresentaram

apenas pequenas fissuras visíveis, mantendo a integridade do espécime mesmo após atingir a carga máxima.

Figura 31 - Corpos de prova rompidos por tração por compressão diametral do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2.



(a) UHPC 0 – 28 dias



(b) UHPC 1 – 28 dias



(c) UHPC 1 – 1 ano



(d) UHPC 2 – 28 dias



(e) UHPC 2 – 1 ano

Fonte: Autora (2026).

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

A Tabela 10 apresenta a comparação e relação entre os resultados obtidos nos ensaios de tração na flexão e de tração por compressão diametral. Observa-se que, para todos os teores de fibras e idades avaliadas, as resistências à tração determinadas pelo ensaio de flexão foram superiores às obtidas por compressão diametral. Esse comportamento está diretamente relacionado às diferenças nos estados de tensão desenvolvidos em cada método. No ensaio de flexão, as tensões de tração atingem seu valor máximo apenas na fibra mais solicitada da seção transversal, enquanto o restante da seção é submetido a tensões progressivamente menores. Já no ensaio de compressão diametral, a ruptura ocorre devido ao desenvolvimento de tensões de tração indireta ao longo de um plano diametral, tornando o resultado mais sensível à presença de vazios, defeitos internos e heterogeneidades da matriz cimentícia.

Além das diferenças nos mecanismos de ruptura, cada ensaio fornece informações distintas sobre o comportamento mecânico do material. O ensaio de compressão diametral é amplamente utilizado para determinar a resistência máxima à tração indireta, enquanto o ensaio de flexão permite avaliar parâmetros adicionais, como a tenacidade, a capacidade de redistribuição de tensões e o comportamento pós-fissuração. Essas características são particularmente relevantes para concretos reforçados com fibras, nos quais a capacidade de absorção de energia após a fissuração constitui um dos principais benefícios do reforço fibroso.

A Figura 32 permite compreender alguns dos mecanismos que podem ter influenciado os resultados obtidos nos ensaios de tração. Na Figura 32(a), correspondente ao corpo de prova submetido ao ensaio de tração por compressão diametral, observa-se que a fissura formada atravessou uma região com reduzida quantidade de fibras orientadas perpendicularmente ao plano de ruptura. Embora o corpo de prova não tenha se separado completamente após o ensaio, a abertura da fissura evidencia que poucas fibras atuaram efetivamente como pontes de transferência de tensões (*crack bridging*) ao longo da superfície fissurada. Dessa forma, a resistência obtida nesse ensaio passou a depender majoritariamente da capacidade resistente da matriz cimentícia, reduzindo a contribuição do reforço fibroso

e justificando, em parte, os valores relativamente baixos de resistência à tração por compressão diametral observados nesta pesquisa.

Em contraste, a Figura 32(b), referente ao ensaio de tração na flexão, evidencia diversas fibras atravessando a fissura principal e posicionadas aproximadamente de forma perpendicular à sua abertura. Essa configuração favorece o mecanismo de ponte de fissuras, permitindo que as fibras absorvam parte das tensões de tração após o início da fissuração da matriz. Como consequência, ocorre maior transferência de tensões entre as faces da fissura, retardando sua propagação e contribuindo para os maiores valores de resistência observados nos ensaios de flexão, bem como para o comportamento pós-fissuração mais pronunciado apresentado pelos compósitos reforçados com fibras.

Outro aspecto relevante observado na Figura 32(a) é a presença de um vazio interno de dimensões consideráveis. não perceptível externamente antes da ruptura do corpo de prova apesar da baixa porosidade observada. Considerando que esse vazio somente se tornou visível após a abertura do corpo de prova, não se pode descartar a hipótese de que defeitos semelhantes estivessem presentes em outros espécimes ensaiados. Além disso, observa-se na mesma figura uma aglomeração de fibras em um dos cantos superiores do corpo de prova, indicando uma distribuição não uniforme do reforço. Esses fatores podem ter contribuído para a variabilidade experimental observada e para o desempenho mecânico inferior ao esperado.

Figura 32 - Comparação de disposição das fibras nos ensaios de tração por compressão diametral (a) e tração na flexão (b).



(a) (b)

Fonte: Autora (2026).

Tabela 10 - Correlação entre os valores de tração na flexão e tração por compressão diametral do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2.

	UHPC 0	UHPC 1		UHPC 2	
	28 dias	28 dias	1 ano	28 dias	1 ano
Resistência à tração na flexão (MPa)	11,22	11,80	13,09	13,11	12,07
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	3,29	7,32	8,84	3,92	5,40
Relação das resistências	3,41	1,61	1,48	3,34	2,24

Fonte: Autora (2026).

Comparando os valores obtidos com o fator teórico de referência (1,29) determinado anteriormente na equação (7), observa-se que essa relação não é consistentemente atendida pelos resultados experimentais. O UHPC 0 apresentou a maior discrepância em relação ao valor teórico, com uma relação de 3,41 entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral. Com a incorporação de fibras, verificou-se uma redução dessa diferença no UHPC 1, que apresentou relações de 1,61 aos 28 dias de cura e 1,48 após um ano (envelhecimento acelerado), valores mais próximos de 1,29, e uma maior homogeneidade comparada aos outros teores. Já o UHPC 2 apresentou relações de 3,34 aos 28 dias e 2,24 após um ano, mantendo-se significativamente acima do valor teórico. Observa-se ainda que o valor obtido para o UHPC 2 aos 28 dias foi bastante próximo ao verificado para o UHPC 0, sugerindo que o aumento do teor de fibras para 1,5% não foi suficiente para promover uma aproximação da correlação experimental ao valor de referência. Esse comportamento indica que a simples elevação do teor de fibras não garante maior eficiência do reforço, uma vez que fatores como orientação, dispersão e distribuição das fibras na matriz podem exercer influência mais significativa sobre a resposta mecânica do material.

Com base nos dados da literatura apresentados na Tabela 2, foi estabelecida a relação entre as resistências à tração na flexão e à tração por compressão diametral dos estudos que disponibilizaram resultados para ambos os ensaios, os valores obtidos são apresentados na Tabela 11. Observa-se que os estudos de Shen et al. (2023), Smarzewski (2017) e Smarzewski e Barnat-Hunek (2018) apresentaram relações inferiores ao valor teórico de 1,29. Isso indica que, nesses trabalhos, os valores de resistência à tração por compressão diametral foram superiores aos valores de resistência à tração na flexão.

Em contrapartida, os resultados obtidos nesta pesquisa apresentaram comportamento oposto, com relações significativamente superiores ao valor teórico, evidenciando que as resistências à tração na flexão foram substancialmente maiores que as resistências à tração por compressão diametral. Essa diferença torna-se ainda mais evidente ao comparar os resultados individuais dos ensaios, uma vez que as resistências à flexão obtidas neste estudo foram superiores às reportadas na literatura, enquanto as resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral apresentaram valores inferiores aos normalmente observados para UHPC.

Uma possível explicação para esse comportamento está relacionada ao desempenho da matriz cimentícia. Como o ensaio de tração por compressão diametral depende diretamente da aplicação de esforços compressivos ao corpo de prova, reduções na resistência à compressão tendem a refletir em menores valores de resistência à tração indireta. Dessa forma, os menores valores de resistência à compressão axial observados nesta pesquisa podem ter contribuído para os reduzidos resultados de tração por compressão diametral. Por outro lado, a elevada resistência à tração na flexão sugere uma atuação eficiente das fibras no mecanismo de ponte de fissuras, aumentando a capacidade de transferência de tensões após a fissuração da matriz e resultando em valores superiores aos reportados na literatura.

Vale ressaltar que Birol e Avialp (2025), utilizando macrofibras de polipropileno, verificaram que a variação do teor de fibras não produziu alterações significativas na resistência à tração na flexão, sugerindo que a resposta mecânica do material depende não apenas da quantidade de fibras incorporadas, mas também de fatores como geometria, orientação, dispersão e aderência fibra-matriz.

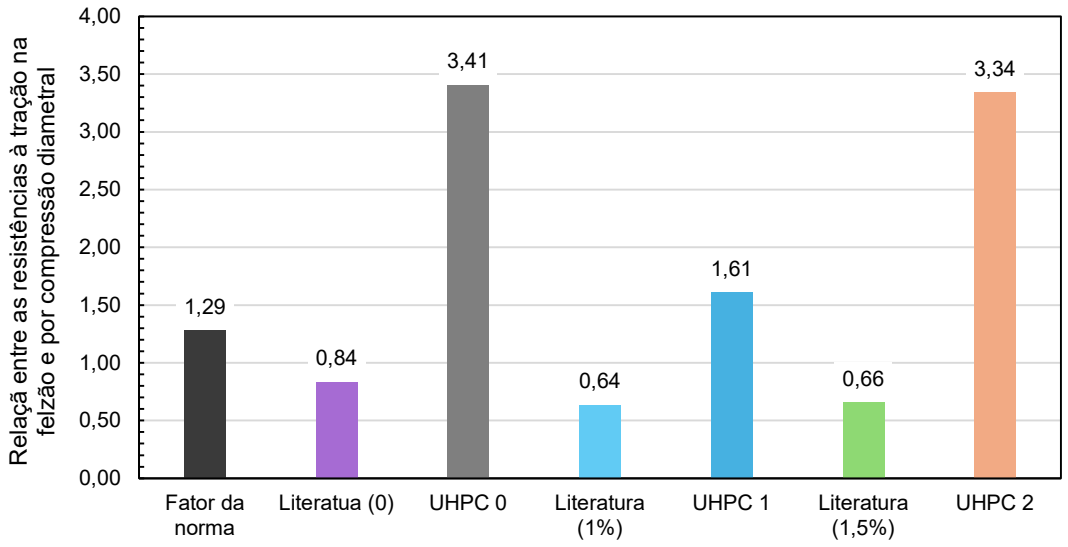
Tabela 11 - Correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral dos estudos analisados na literatura.

	Shen *et al.*		**P. Smarzewski**			**P. Smarzewski; D. Barnat-Hunek**	
	0%	**1%**	**0%**	**1%**	**1,5%**	**0%**	**1%**
Resistência à tração na flexão (MPa)	7,94	5,48	7,70	7,00	6,50	8,40	5,80
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	10,67	11,48	9,40	10,20	9,90	8,90	7,70
Relação das resistências	0,74	0,48	0,82	0,69	0,66	0,94	0,75

Fonte: Autora (2026).

Considerando que as relações entre a resistência à tração apresentadas na Tabela 11 apresentaram pouca variação para os diferentes teores de fibras dentro de cada estudo, optou-se por comparar os valores médios obtidos na literatura com aqueles determinados experimentalmente nesta pesquisa. Essa comparação é apresentada na Figura 33.

Figura 33 - Comparação da relação entre as resistências à tração na flexão e por compressão diametral entre os traços analisados e a literatura



Fonte: Autora (2026)

Os resultados apresentados neste estudo, em conjunto com aqueles reportados na literatura, indicam que a correlação proposta pela ABNT NBR 6118:2026 para concretos convencionais não representa adequadamente o comportamento do UHPC reforçado com fibras. Observa-se que a relação entre as resistências à tração na flexão e por compressão diametral apresenta elevada variabilidade, podendo assumir valores significativamente distintos em função das características da mistura e das condições experimentais adotadas.

Essa variabilidade evidencia a influência de diversos fatores sobre o desempenho mecânico do UHPC reforçado com fibras poliméricas, incluindo as propriedades dos materiais constituintes, o teor e a distribuição das fibras, os procedimentos de mistura e adensamento, a presença de vazios ou defeitos internos, bem como as condições de cura e ensaio. Dessa forma, tanto a resistência à compressão quanto as resistências à tração podem ser significativamente afetadas

por essas variáveis, dificultando o estabelecimento de correlações universais para esse tipo de compósito cimentício.

4.5 PESO ESPECÍFICO DO UHPC

A massa específica aparente dos concretos foi determinada a partir das dimensões geométricas e das massas dos corpos de prova endurecidos. Para os corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 5 x 10 cm, adotou-se volume de 196,35 cm³. Já para os corpos de prova prismáticos, com dimensões de 4 × 4 × 16 cm, o volume considerado foi de 256,00 cm³. A Tabela 12 apresenta os valores do peso específico obtidos para os traços UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2, considerando diferentes idades de ensaio e diferentes geometrias de corpos de prova.

Tabela 12 - Peso específico do UHPC 0, UHPC 1 e UHPC 2.

Traço	**Idade**	**Cilíndrico**	**Prismático**	**Diferença entre geometrias (%)**	**Média entre geometrias**	**Diferença entre idades (%)**
		γ **(kN/m³)**	γ **(kN/m³)**		γ **(kN/m²)**	
UHPC 0	28 dias	21,51	21,44	0,31	21,48	-
UHPC 1	28 dias	21,99	21,88	0,50	21,94	0,74
	1 ano	21,79	21,76	0,12	21,77	
UHPC 2	28 dias	21,46	21,37	0,40	21,42	0,51
	1 ano	21,59	21,03	2,65	21,31	

Fonte: Autora (2026).

Observa-se que as diferenças entre os valores obtidos para corpos de prova cilíndricos e prismáticos foram reduzidas, permanecendo inferiores a 1,0% para a maioria dos casos. Esse comportamento indica boa uniformidade dos concretos analisados e confirma a consistência do procedimento experimental adotado. Apenas o traço UHPC 2 aos 1 anos apresentou diferença mais significativa entre as geometrias, possivelmente associada a variações de compactação, distribuição de fibras ou presença de vazios internos.

Além disso, as diferenças entre as idades de 28 dias e 1 ano também foram pequenas, com variações inferiores a 1,0% para os traços analisados. Esse comportamento indica estabilidade da massa específica ao longo do tempo, sugerindo

que não ocorreram alterações significativas na densificação da matriz cimentícia após o envelhecimento acerelado.

Considerando que as diferenças observadas entre as geometrias e entre as idades foram reduzidas, adotou-se a média dos resultados como valor representativo do peso específica de cada traço, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Peso específico médio dos concretos UHPC em comparação ao concreto convencional.

Traço	γ (kN/m³)	Relação com concreto convencional (%)
UHPC 0	21,28	-14,09
UHPC 1	21,76	-12,58
UHPC 2	21,17	-14,56
Concreto convencional	25,00	—

Fonte: Autora (2026).

Os três traços apresentaram valores de peso específico bastante próximos, com variação máxima de aproximadamente 2,8%, indicando que a incorporação de diferentes teores de fibras de polipropileno não promoveu alterações significativas na densidade das misturas.

Comparando-se os resultados obtidos com o peso específico típico do concreto convencional, adotado como aproximadamente 25 kN/m³, verificou-se que o UHPC 1 apresentou redução de cerca de 12,6%, enquanto os traços UHPC 0 e UHPC 2 apresentaram reduções de 14,1% e 14,6%, respectivamente. Os valores obtidos também ficaram próximos ao peso reportado pela NBR 17246, que varia entre 22 e 28 kg/m³ (aproximadamente 21,6 e 27,5 kN/m³).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou a influência da incorporação de fibras de polipropileno e do envelhecimento acelerado nas propriedades mecânicas de um concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), por meio de ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral.

Em comparação ao traço de referência (UHPC 0), o UHPC 1 apresentou aumento de aproximadamente 88% na resistência à compressão axial, elevando a

resistência média de 47,87 MPa para 89,87 MPa. O UHPC 2 resultou em resistência média de 61,90 MPa, representando redução de cerca de 31% em relação ao UHPC 1 e evidenciando que o aumento da quantidade de fibras não necessariamente promove ganhos mecânicos adicionais.

Apesar dos ganhos observados com a incorporação das fibras, nenhuma das misturas atingiu a resistência mínima de 100 MPa, frequentemente adotada para a classificação de UHPC e recomendada pela ABNT NBR 16942:2021. Embora tenham sido utilizados os mesmos materiais comumente empregados na produção de UHPC e o traço tenha sido adaptado daqueles propostos por Prado, Carrazedo e Debs (2022) e Da Silva et al. (2024), variações nas características como a granulometria e fornecedor dos materiais, bem como diferenças no procedimento de mistura e nas condições de cura, podem influenciar significativamente o desenvolvimento da resistência mecânica do concreto.

Em relação ao módulo de elasticidade, a incorporação de 1,0% de fibras praticamente não alterou a rigidez do material, sendo observada diferença inferior a 0,1% em relação ao traço sem fibras. Já o teor de 1,5% promoveu redução de aproximadamente 8,8%, indicando que a adição excessiva de fibras pode comprometer parcialmente a compacidade da matriz e, consequentemente, sua rigidez.

Na resistência à tração na flexão observa-se aumentos de aproximadamente 5,2% para o UHPC 1 e 16,7% para o UHPC 2 em relação ao traço de referência. Os ensaios e os modos de ruptura evidenciaram uma expressiva melhoria no comportamento pós-fissuração com a adição de fibras, com maior integridade dos corpos de prova após a ruptura e aumento da tenacidade do compósito.

Para tração por compressão diametral, o UHPC 1 apresentou resistência média de 7,32 MPa, valor 122,5% superior ao UHPC 0 (3,29 MPa). Por outro lado, o UHPC 2 atingiu apenas 3,92 MPa, demonstrando que o aumento do teor de fibras não resultou em melhoria proporcional dessa propriedade.

O envelhecimento acelerado produziu efeitos distintos sobre as propriedades analisadas. A resistência à compressão apresentou reduções de aproximadamente 22,5% para o UHPC 1 e 28,9% para o UHPC 2, indicando possível formação de microfissuras decorrentes dos ciclos de umedecimento e secagem. Em contrapartida, a resistência à tração por compressão diametral aumentou cerca de 20,8% para o

UHPC 1 e 37,8% para o UHPC 2 após o envelhecimento, comportamento atribuído à continuidade das reações de hidratação e ao aprimoramento da interface fibra-matriz. Já a resistência à tração na flexão apresentou variações pouco significativas, com aumento de aproximadamente 11,1% para o UHPC 1 e redução de cerca de 7,8% para o UHPC 2, indicando que os efeitos benéficos e prejudiciais do envelhecimento tenderam a se equilibrar para essa propriedade.

A análise da correlação entre as resistências à tração na flexão e à tração por compressão diametral evidenciou a elevada variabilidade nos valores obtidos experimentalmente, com redução dessa diferença apenas em determinados casos, especialmente no UHPC 1. Esse comportamento indica que a relação entre essas duas propriedades não é constante para o UHPC reforçado com fibras, sendo fortemente influenciada por fatores como teor, dispersão e orientação das fibras, além da qualidade da matriz cimentícia e da presença de defeitos internos.

Em relação ao peso específico dos concretos, os resultados obtidos indicaram valores bastante uniformes entre os diferentes traços, geometrias de corpos de prova e idades de ensaio, com variações reduzidas e dentro de uma faixa inferior a 3%, indicando ausência de alterações significativas na densificação da matriz cimentícia. Quando comparados ao concreto convencional, os UHPCs apresentaram massa específica de 12 a 14% inferior, o que pode ser atribuído à ausência de agregados graúdos e à presença de fibras poliméricas.

De modo geral, os resultados demonstram que a incorporação de 1,0% de fibras de polipropileno proporcionou o melhor equilíbrio entre resistência, rigidez e comportamento pós-fissuração. Além disso, verificou-se que o envelhecimento acelerado afeta de maneira distinta os mecanismos resistentes do material, reduzindo a resistência à compressão, mas favorecendo o desempenho à tração indireta.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que estudos futuros realizem análises microestruturais detalhadas, por meio de técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de interface fibra-matriz, com o objetivo de compreender com maior profundidade os mecanismos de aderência, ancoragem e transferência de tensões,

bem como os efeitos do envelhecimento sobre a integridade da matriz cimentícia e a durabilidade do compósito.

Também recomenda-se o desenvolvimento de estudos que relacionem os resultados experimentais com modelos analíticos e equações de dosagem e resistência disponíveis na literatura, permitindo a validação ou adaptação de modelos existentes para concretos reforçados com fibras, especialmente no contexto de concretos de alto e ultra-alto desempenho.

REFERENCIAS

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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

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. (Inclui Emenda 1, de 18.05.2011).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:** *Concreto* - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

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.

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.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16942:** Fibras poliméricas para concreto - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17246-2:** Concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) - Parte 2: Ensaios de validação de dosagem e de produçã**o**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

BENAICHA, M. **Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée: A Sustainable Fusion of Heritage and Innovation Through Ultra-High-Performance Concrete**. Sustainability, v. 17, n. 9, 3808, 2025.

BERTOLA, N. *et al.* **A Review of the Use of UHPFRC in Bridge Rehabilitation and New Construction in Switzerland.** Frontiers in Built Environment, v. 7, 769686, 2021.

BIROL, T.; AVCIALP, A. **Impact of Macro-Polypropylene Fiber on the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete.** Polymers, v. 17, n. 9, 1232, 2025.

CAMACHO TORREGROSA, Esteban. 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.

DA SILVA, M. L. *et al*. **The Influence of Materials on the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A Literature Review.** Materials, v. 17, n. 8, 1801, 2024.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14889-2:2006:** Fibres for concrete – Part 2: Polymer fibres – *Definitions, specifications and conformity*. Brussels: CEN, 2006.

FEHLING, E.; BUNJE, K.; LEUTBECHER, T., 2004. **Design relevant properties of hardened ultra high performance concrete.** In: SCHMIDT, M.; FEHLING, E.; GEISENHANSLÜKE, C. (ed.). Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, 2004. Kassel: Kassel University Press, 2004. (Structural Materials and Engineering Series, v. 3).

FEHLING, Ekkehard; SCHMIDT, Michael; WALRAVEN, Joost C.; LEUTBECHER, Torsten; FRÖHLICH, Susanne. **Ultra-high performance concrete (UHPC): fundamentals, design, examples.** Hoboken: Wiley, 2014. 198 p. (Beton-Kalender Series). ISBN 978-3-433-03087-5

FENG, Z. *et al.* **Effect of polypropylene fiber on early-age properties and stress relaxation of ultra-high-performance concrete under different degrees of restraint.** Journal of Building Engineering, v. 68, 106035, 2023

GRAYBEAL, Benjamin A. **Design and construction of field-cast UHPC connections.** McLean, VA: Federal Highway Administration, 2014. (FHWA-HRT-14-084).

GRAYBEAL, Benjamin A. **UHPC in the U.S. Highway Infrastructure.** In: AFGC-SIA INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED CONCRETE, 2009, Marseille. Proceedings... Marseille: AFGC, 2009.

HE, J. *et al*. **The Mechanical Properties and Damage Evolution of UHPC Reinforced with Glass Fibers and High-Performance Polypropylene Fibers.** Materials, v. 14, n. 9, 2455, 2021.

KHAN, M. I.; ABBAS, Y. M.; FARES, G. **Review of high and ultrahigh performance cementitious composites incorporating various combinations of fibers and ultrafines**. Journal of King Saud University – Engineering Sciences, v. 29, n. 4, p. 339-347, 2017.

KHAN, M. M. *et al*. **Mechanical behaviour and impact response of ultra-high-performance concrete incorporating steel and polypropylene fibers**. Next Materials, v. 10, 101436, 2026.

LI, J. *et al*. **Durability of ultra-high performance concrete – A review**. Construction and Building Materials, v. 255, 119296, 2020.

LI, Y.; YUAN, W.; CHANG, J.; ZHAO, B. **Seismic performance of corroded RC bridge piers strengthened with UHPC shells.** Buildings, v. 15, n. 21, p. 3863, 2025.

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.

OLIVEIRA, C. O. E. Estudo numérico e experimental da distribuição das fibras de aço em vigas de UHPFRC. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

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

PERRY, V. H.; WHITE, P.; AHLBORN, T. M. *The First North American Broad Based Structural Design Guide on UHPC – ACI 239C*. In: **International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete**, 1., 2016, Des Moines, USA. Proceedings… 2016.

PRADO, L. P.; CARRAZEDO, R.; EL DEBS, M. K. **Interface strength of High-Strength concrete to Ultra-High-Performance concrete.** Engineering Structures, v. 252, 113591, 2022.

RAMEZANI, A.; SHAFEI, B. **Advances in lightweight ultra-high performance concrete: Mixture requirements, strength characteristics, and durability properties.** Journal of Building Engineering, v. 112, 113681, 2025.

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

SHEN, D. *et al*. **Early-age autogenous shrinkage, tensile creep, and restrained cracking behavior of ultra-high-performance concrete incorporating polypropylene fibers.** Cement and Concrete Composites, v. 138, 104948, 2023.

SMARZEWSKI, P. **Effect of Curing Period on Properties of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Ultra-High Performance Concrete.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 245, n. 3, 032059, 2017.

SMARZEWSKI, P.; BARNAT-HUNEK, D. **Property Assessment of Hybrid Fiber-Reinforced Ultra-High-Performance Concrete.** International Journal of Civil Engineering, v. 16, p. 593-606, 2018.

ULLAH, R. *et al.* **Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review.** Materials, v. 15, n. 12, 4131, 2022.

XUE, J. *et al*. Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering. Construction and Building Materials, v. 260, 119844, 2020.

YAN, P. *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, 122489, 2021.

ZAID, O. *et al.* **State of the art review on ultra-high-performance fiber reinforced concrete properties standardization and structural applications.** Discover Sustainability, v. 7, 83, 2026.

ZHANG, D. *et al.* **Effect of spatial distribution of polymer fibers on preventing spalling of UHPC at high temperatures.** Cement and Concrete Research, v. 140, 106281, 2021.