

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**LETICIA RAQUEL ALVES BATISTA**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO  
DESEMPENHO REFORÇADO COM MICROFIBRAS DE AÇO E DE  
POLIPROPILENO, CONSIDERANDO A IDADE INICIAL E ENVELHECIMENTO  
ACELERADO**

Ilha Solteira - SP  
2026





**LETICIA RAQUEL ALVES BATISTA**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO  
DESEMPENHO REFORÇADO COM MICROFIBRAS DE AÇO E DE  
POLIPROPILENO, CONSIDERANDO A IDADE INICIAL E ENVELHECIMENTO  
ACELERADO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Conselho de Curso de  
Graduação em Engenharia Civil da  
Faculdade de Engenharia do Campus de  
Ilha Solteira, Universidade Estadual  
Paulista, como parte dos requisitos para  
obtenção do diploma de Graduação em  
Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lisiane Pereira  
Prado

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B333e Batista, Leticia Raquel Alves.  
Estudo das propriedades mecânicas do concreto de ultra-alto desempenho reforçado com microfibras de aço e de polipropileno, considerando a idade inicial e envelhecimento acelerado / Leticia Raquel Alves Batista. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026  
62 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. Microfibras de aço. 3. Microfibras de polipropileno. 4. Propriedades mecânicas. 5. Envelhecimento acelerado.

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

O presente projeto tem potencial para contribuir de forma significativa nos âmbitos científico, técnico e social, ao investigar o comportamento do concreto de ultra-alto desempenho com fibras, material inovador de grande relevância para a engenharia estrutural moderna. A pesquisa promove avanços econômicos e sustentáveis, ao utilizar microfibras nacionais, reduzindo custos e impacto ambiental, além de fomentar a inovação tecnológica e a competitividade industrial. No campo educacional e cultural, a iniciativa fortalece a formação de recursos humanos qualificados e amplia a difusão do conhecimento científico em níveis local, regional e nacional, com repercussões em congressos. Assim, a proposta se alinha aos princípios de desenvolvimento sustentável, reforçando a inserção acadêmica e social, ao mesmo tempo em que expande as fronteiras do conhecimento na temática de materiais avançados para construção civil.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This project has the potential to make significant contributions in the scientific, technical, and social spheres by investigating the behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, an innovative material of great relevance to modern structural engineering. The research promotes economic and sustainable advances by utilizing domestic microfibers, reducing costs and environmental impact, while fostering technological innovation and industrial competitiveness. In the educational and cultural spheres, the initiative strengthens the training of qualified human resources and expands the dissemination of scientific knowledge at the local, regional, and national levels, with repercussions at conferences. Thus, the proposal aligns with the principles of sustainable development, strengthening academic and social inclusion while expanding the frontiers of knowledge in the field of advanced materials for civil construction.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: LETÍCIA RAQUEL ALVES BATISTA

Título: ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM MICROFIBRAS DE AÇO E 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. Julio M. Carlos Junior  
UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)

Prof. Dr. Luiz Carlos P. Prado  
UNESP – Campus de Ilha Solteira

Prof. Dr. Alex Michel Santos da Silva  
UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

15 / 05 / 2026

Dedico este trabalho à minha mãe, Aurea. Ela foi e sempre será meu lar e minha força em todos os momentos, sendo mãe, pai e melhor amiga. Nada disso seria possível sem você, essa conquista é, acima de tudo, nossa!

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente eu agradeço à Deus por sempre estar comigo, mesmo quando pensei estar sozinha. Agradeço infinitamente pelas bênçãos e proteções que nunca faltaram e nunca faltarão.

Agradeço à minha família, que me ensinou o significado de casa muito antes da faculdade de engenharia civil. Agradeço, em especial, minha mãe e minha vó materna, Aurea e Maria Helena, que são a minha fortaleza, cada passo que dei até aqui carrega o amor, os sacrifícios e os ensinamentos delas.

Também agradeço a meu pai, Celso, por sempre estar presente, apoiando meus sonhos desde pequena e ajudando agora com a vida adulta. Gratidão às minhas tias, tios e madrinha, Elaine, Davi, Solange e Marta, por sempre acreditarem em mim, obrigada pelos conselhos, pelas rezas e por me amarem em voz alta.

Do fundo do meu coração, eu agradeço às minhas primas e primo, Livia, Felipe, Sofia e Helena, que junto com a minha tata, Sara, me mostram o melhor da vida, vocês tornaram essa trajetória mais leve e divertida. Vocês são, de longe, a melhor parte de mim.

Agradeço à minha melhor amiga, Mariana, que sempre esteve comigo em todas as fases, crescendo e aprendendo tudo juntas. À meus amigos e colegas de turma, Eric, Gustavo, Matheus, Camilly, Ana, Kaique, Leonardo e Daniel, por passarem essa trajetória comigo.

À professora Dr<sup>a</sup> Lisiane Pereira Prado e Victor Hugo Couto Xavier, agradeço pelo apoio na elaboração deste trabalho, pelo suporte durante toda a pesquisa, pelas correções e conselhos.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, agradeço pela formação acadêmica de qualidade e pelo suporte oferecido ao longo desta trajetória.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio do Processo nº 2025/01437-0.

“Se você tem disposição para correr o risco, a vista do outro lado é espetacular” (Meredith Grey).

## RESUMO

O concreto de ultra-alto desempenho (ultra-high performance concrete, UHPC) tem se destacado em aplicações estruturais submetidas a elevadas solicitações mecânicas, em razão de suas elevadas resistências à compressão e à tração e de seu alto módulo de elasticidade, propriedades diretamente influenciadas pelo tipo e pela proporção de fibras quando incorporadas à matriz cimentícia, visto que atuam na transferência de tensões e no controle da fissuração. Nesse contexto, a seleção adequada de fibras metálicas e poliméricas torna-se fundamental para o equilíbrio entre rigidez, ductilidade e durabilidade do material. Assim, este estudo tem como objetivo comparar o desempenho mecânico e a resposta ao envelhecimento acelerado de duas composições de UHPC: UHPC 1, com 2% de microfibras de aço e 1% de polipropileno, e UHPC 2, com 1,5% de cada tipo de fibra, visando avaliar a influência dessas proporções no comportamento do material e contribuir para sua aplicação estrutural. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão da literatura, preparação das microfibras, produção das misturas, moldagem dos corpos de prova, realização dos ensaios e tratamento dos dados, sendo avaliadas a consistência, a resistência à compressão, o módulo de deformação e as resistências à tração na flexão e por compressão diametral, conforme normas técnicas brasileiras, em idades iniciais e após processos de envelhecimento acelerado. Os resultados demonstraram que o teor e a combinação das fibras influenciam diretamente o desempenho do UHPC, evidenciando que o traço UHPC 1 apresentou maior estabilidade mecânica em resposta ao envelhecimento térmico, associadas à maior rigidez e resistência térmica proporcionadas pelas fibras metálicas, enquanto o UHPC 2 apresentou melhor desempenho inicial, porém maior sensibilidade às variações térmicas, com redução significativa da resistência à compressão e à tração na flexão após os envelhecimentos acelerados; na tração por compressão diametral, os resultados foram semelhantes entre as composições, indicando atuação eficiente das microfibras por mecanismos distintos. Verificou-se, ainda, que o desempenho em longo prazo do UHPC está diretamente condicionado ao tipo e à proporção de fibras empregadas, evidenciando a importância desse parâmetro na definição do comportamento mecânico do material. Nesse contexto, a coerência entre os resultados experimentais e teóricos, aliada à baixa variabilidade dos dados, reforça a confiabilidade da metodologia adotada. Além disso, a adaptação do procedimento de envelhecimento acelerado mostrou-se adequada para a avaliação do UHPC, permitindo simular, de forma consistente, diferentes condições de exposição e seus efeitos nas propriedades mecânicas. Por fim, esses resultados, associados ao desempenho satisfatório das misturas, indicam a viabilidade do uso de fibras nacionais na produção de UHPC, contribuindo para a ampliação de sua aplicação em estruturas de alto desempenho.

**Palavras-chave:** concreto de ultra-alto desempenho; microfibras de aço; microfibras de polipropileno; propriedades mecânicas; envelhecimento acelerado.

## ABSTRACT

Ultra-high performance concrete (UHPC) has become prominent in structural applications subjected to high mechanical stresses due to its high compressive and tensile strength and high modulus of elasticity. These properties are directly influenced by the type and proportion of fibers incorporated into the cementitious matrix, as they act in stress transfer and crack control. In this context, the appropriate selection of metallic and polymeric fibers becomes fundamental for balancing the stiffness, ductility, and durability of the material. Thus, this study aims to compare the mechanical performance and response to accelerated aging of two UHPC compositions: UHPC 1, with 2% steel microfibers and 1% polypropylene, and UHPC 2, with 1.5% of each type of fiber, in order to evaluate the influence of these proportions on the material's behavior and contribute to its structural application. The research was developed through literature review, preparation of microfibers, production of mixtures, molding of test specimens, performance of tests and data processing, evaluating consistency, compressive strength, modulus of deformation and tensile strength in bending and diametral compression, according to Brazilian technical standards, at initial ages and after accelerated aging processes. The results demonstrated that the fiber content and combination directly influence the performance of UHPC, showing that the UHPC 1 mix exhibited greater mechanical stability in response to thermal aging, associated with the greater stiffness and thermal resistance provided by the metallic fibers, while UHPC 2 showed better initial performance but greater sensitivity to thermal variations, with a significant reduction in compressive and tensile strength in bending after accelerated aging; in diametral compression tensile strength, the results were similar between the compositions, indicating efficient action of the microfibers through distinct mechanisms. It was also found that the long-term performance of UHPC is directly conditioned by the type and proportion of fibers used, highlighting the importance of this parameter in defining the mechanical behavior of the material. In this context, the consistency between experimental and theoretical results, combined with the low variability of the data, reinforces the reliability of the methodology adopted. Furthermore, the adaptation of the accelerated aging procedure proved adequate for the evaluation of UHPC, allowing for the consistent simulation of different exposure conditions and their effects on mechanical properties. Finally, these results, combined with the satisfactory performance of the blends, indicate the viability of using domestic fibers in the production of UHPC, contributing to the expansion of their application in high-performance structures.

**Keywords:** high-performance concrete; steel microfibers; polypropylene microfibers; mechanical properties; accelerated aging.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Passarela confeccionada com o concreto de pós reativos, no Canadá ...                                                                        | 20 |
| Figura 2 – Função das fibras no UHPC: (a) UHPC sem reforço fibroso; (b) UHPFRC.<br>.....                                                                | 24 |
| Figura 3 - Amostra dos materiais utilizados: (a) Sílica ativa; (b) Cimento; (c) Pó de<br>quartzo; (d) Areia.....                                        | 27 |
| Figura 4 – Amostra das fibras utilizadas: (a) SF; (b) PP. ....                                                                                          | 27 |
| Figura 5 – Misturas analisadas.....                                                                                                                     | 28 |
| Figura 6 – Fluxograma da fase VI .....                                                                                                                  | 29 |
| Figura 7 - Fibra de aço nacional antes e depois da preparação.....                                                                                      | 32 |
| Figura 8 – Ensaio de compressão axial: (a) esquema do ensaio; (b) ensaio no<br>laboratório. ....                                                        | 35 |
| Figura 9 – Ensaio de resistência à tração na flexão: (a) esquema do ensaio; (b) ensaio<br>no laboratório. ....                                          | 36 |
| Figura 10 – Ensaio de tração por compressão diametral: (a) esquema do ensaio; (b)<br>ensaio no laboratório.....                                         | 37 |
| Figura 11 – Misturas na mesa de abatimento: (a) UHPC sem fibras; (b) UHPC 1; (c)<br>UHPC 2. ....                                                        | 38 |
| Figura 12 – Módulo de elasticidade do UHPC 1 e do UHPC 2.....                                                                                           | 40 |
| Figura 13 - Curvas tensão-deformação do ensaio de compressão axial do UHPC 1:<br>(a) 28 dias; (b) Envelhecimento tipo 1; (c) Envelhecimento tipo 2..... | 41 |
| Figura 14 - Curvas tensão-deformação do ensaio de compressão axial do UHPC 2:<br>(a) 28 dias; (b) Envelhecimento tipo 1; (c) Envelhecimento tipo 2..... | 41 |
| Figura 15 – Resistência à compressão axial do UHPC 1 e do UHPC 2.....                                                                                   | 43 |
| Figura 16 – Corpos de prova rompidos por compressão axial aos 28 dias: (a) UHPC<br>sem fibras; (b) UHPC 1; (c) UHPC 2. ....                             | 44 |
| Figura 17 - Prisma após a ruptura por flexão aos 28 dias: (a) UHPC 1; (b) UHPC 2.<br>.....                                                              | 46 |
| Figura 18 - Resistência à tração na flexão do UHPC 1 e do UHPC 2.....                                                                                   | 46 |
| Figura 19 – Curva tensão-deformação do ensaio de flexão de 3 pontos do UHPC sem<br>fibras, do UHPC 1 e do UHPC 2 aos 28 dias .....                      | 48 |
| Figura 20 - Corpos de prova rompidos por flexão de 3 pontos aos 28 dias: (a) UHPC<br>sem fibras; (b) UHPC 1; (c) UHPC 2. ....                           | 48 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 21 - Resistência à tração por compressão diametral do UHPC 1 e UHPC 2 .                                           | 50 |
| Figura 22 - Corpos de prova rompidos por compressão diametral aos 28 dias: (a) UHPC sem fibras; (b) UHPC 1; (c) UHPC 2 . | 52 |
| Figura 23 - Módulo de elasticidade, valores teóricos e experimentais .                                                   | 53 |
| Figura 24 - Resistência à compressão axial, valores teóricas e experimentais .                                           | 54 |
| Figura 25 - Resistência à tração na flexão, valores teóricos e experimentais .                                           | 55 |
| Figura 26 - Resistências à tração por compressão diametral, valores experimentais .                                      | 56 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Dados dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica – SF ..... | 30 |
| Tabela 2 - Dados dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica – PP ..... | 31 |
| Tabela 3 - Traço empregado para ambos UHPC .....                                | 33 |
| Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio .....        | 33 |
| Tabela 5 – Módulo de elasticidade .....                                         | 39 |
| Tabela 6 – Resistência à compressão axial .....                                 | 42 |
| Tabela 7 - Resistência à tração na flexão .....                                 | 45 |
| Tabela 8 - Resistência à tração por compressão diametral .....                  | 49 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|        |                                                  |
|--------|--------------------------------------------------|
| UHPC   | Ultra-High Performance Concrete                  |
| NRs    | Normas Regulamentadoras                          |
| AFGC   | Associação Francesa de Engenharia Civil          |
| RPC    | Reactive Powder Concrete                         |
| UHPRFC | Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete |
| E1     | Envelhecimento Acelerado tipo 1                  |
| E2     | Envelhecimento Acelerado tipo 2                  |
| PP     | Polypropylene fiber                              |
| SF     | Steel fiber                                      |

## SUMÁRIO

|              |                                                                      |           |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                              | <b>18</b> |
| <b>2</b>     | <b>OBJETIVOS .....</b>                                               | <b>19</b> |
| 2.1          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                          | 19        |
| <b>3</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                   | <b>19</b> |
| 3.1          | CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO.....                               | 19        |
| 3.2          | FIBRAS .....                                                         | 21        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Fibras de aço .....</b>                                           | <b>22</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>Fibras de polipropileno .....</b>                                 | <b>23</b> |
| <b>3.2.3</b> | <b>Efeito da combinação de fibra de aço e de polipropileno .....</b> | <b>23</b> |
| 3.3          | COMPORTAMENTO MECÂNICO DO UHPC REFORÇADO COM FIBRAS                  | 24        |
| 3.4          | INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO ACELERADO NO UHPC .....                 | 26        |
| <b>4</b>     | <b>MATERIAIS.....</b>                                                | <b>26</b> |
| <b>5</b>     | <b>METODOLOGIA .....</b>                                             | <b>28</b> |
| 5.1          | COLETA DE DADOS TEÓRICOS.....                                        | 29        |
| 5.2          | PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DE AÇO NACIONAIS .....                         | 32        |
| 5.3          | PRODUÇÃO DA MISTURA E CONCRETAGEM DOS CORPOS DE PROVA                | 32        |
| 5.4          | ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....                                       | 33        |
| <b>5.4.1</b> | <b>Índice de consistência .....</b>                                  | <b>33</b> |
| <b>5.4.2</b> | <b>Ensaio de envelhecimento acelerado .....</b>                      | <b>34</b> |
| 5.4.2.1      | Envelhecimento acelerado por imersão em água quente.....             | 34        |
| 5.4.2.2      | Envelhecimento acelerado por ciclos de imersão e secagem .....       | 34        |
| <b>5.4.3</b> | <b>Ensaio de resistência à compressão axial.....</b>                 | <b>35</b> |
| <b>5.4.4</b> | <b>Módulo de elasticidade .....</b>                                  | <b>36</b> |
| <b>5.4.5</b> | <b>Ensaio de resistência à tração na flexão.....</b>                 | <b>36</b> |
| <b>5.4.6</b> | <b>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....</b> | <b>37</b> |
| <b>6</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                 | <b>38</b> |
| 6.1          | ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA .....                                         | 38        |
| 6.2          | COMPARAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO DO UHPC 1 E DO UHPC 2               | 39        |
| <b>6.2.1</b> | <b>Módulo de elasticidade .....</b>                                  | <b>39</b> |

|              |                                                            |           |
|--------------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6.2.2</b> | <b>Resistência à compressão axial.....</b>                 | <b>42</b> |
| 6.2.2.1      | Comportamento na ruptura .....                             | 44        |
| <b>6.2.3</b> | <b>Resistência à tração na flexão .....</b>                | <b>45</b> |
| 6.2.3.1      | Comportamento na ruptura .....                             | 48        |
| <b>6.2.4</b> | <b>Resistência à tração por compressão diametral .....</b> | <b>49</b> |
| 6.2.4.1      | Comportamento na ruptura .....                             | 51        |
| 6.3          | ANÁLISE DE VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS AOS 28 DIAS    |           |
|              | 52                                                         |           |
| <b>6.3.1</b> | <b>Módulo de elasticidade .....</b>                        | <b>53</b> |
| <b>6.3.2</b> | <b>Resistência à compressão axial.....</b>                 | <b>53</b> |
| <b>6.3.3</b> | <b>Resistência à tração na flexão .....</b>                | <b>55</b> |
| <b>6.3.4</b> | <b>Resistência à tração por compressão diametral .....</b> | <b>56</b> |
| <b>7</b>     | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                     | <b>57</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                    | <b>58</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço da engenharia civil tem sido fortemente direcionado pela necessidade de desenvolvimento de materiais com desempenho superior, capazes de atender às exigências de durabilidade, segurança estrutural e redução de custos de manutenção das construções. Nesse cenário, o Concreto de Ultra-Alto Desempenho (Ultra-High Performance Concrete – UHPC) emerge como um material de alta eficiência e comportamento superior, em comparação ao concreto convencional, em condições severas de exposição.

Contudo, sua matriz à base de cimento com alta resistência apresenta falha repentina após a primeira fissura. Nesse sentido, a utilização de fibras como elemento de reforço tem se consolidado como uma solução eficaz para mitigar esse comportamento, retardando a rápida interconexão entre microfissuras iniciais e ativando mecanismos de tenacidade (SMARZEWSKI, 2017).

Todavia, além da natureza das fibras, diversos estudos indicam que fatores como geometria, dimensões e teor volumétrico exercem influência direta na eficiência do reforço, afetando a aderência fibra-matriz, o comportamento pós-fissuração e a ductilidade do compósito (Wu *et al.*, 2016; YOO *et al.*, 2014a; YOO *et al.*, 2014b; Yoo *et al.*, 2018). Nesse contexto, a combinação das fibras de aço e de polipropileno mostram-se promissora para otimizar o desempenho global do material, proporcionando um comportamento com maior o equilíbrio entre desempenho mecânico, durabilidade e viabilidade econômica.

Ademais, destaca-se a importância da avaliação do desempenho do material em condições de longo prazo, uma vez que, embora suas propriedades iniciais sejam amplamente reconhecidas, ainda persistem lacunas quanto à compreensão de seu comportamento quando submetido a processos de envelhecimento acelerado (AREL *et al.*, 2016).

Paralelamente, além dessas incertezas relacionadas ao desempenho ao longo do tempo, ainda existem limitações relacionadas à disponibilidade de microfibras de aço no mercado nacional, o que tem impulsionado o desenvolvimento de soluções alternativas que viabilizem a utilização de materiais comercialmente disponíveis no país, ampliando sua aplicação em escala.

## **2 OBJETIVOS**

Estudar as propriedades mecânicas de dois traços de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras, considerando a associação de microfibras de aço e de polipropileno nacionais, na idade de 28 dias e na idade de 1 ano, por meio de ensaios de envelhecimento acelerado.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar a proporção ideal entre microfibras de aço e microfibras de polipropileno no UHPC;
- Avaliar o efeito do envelhecimento acelerado nas propriedades mecânicas do UHPC;
- Investigar a adaptação do procedimento de envelhecimento acelerado da norma ABNT NBR 15498:2021;
- Estudar a viabilidade do uso de fibras nacionais na produção de UHPC.

## **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **3.1 CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO**

O Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) surgiu a partir das pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais cimentícios com desempenho superior, iniciadas nas décadas de 1970 e 1980. Esse desenvolvimento foi consolidado na década de 1990, com a introdução do concreto do tipo Reactive Powder Concrete (RPC), demonstrado e estudado por Pierre Richard e Marcel Cheyrezy em 1995. A partir desse desenvolvimento, o UHPC passou a ser aplicado em estruturas reais, iniciando no ano de 1997, com a construção de uma passarela na cidade de Sherbrooke, no Canadá, ilustrada na Figura 1. Na ocasião, a estrutura da ponte foi confeccionada com o concreto de pós reativos (CPR), com resistência à compressão de 200 MPa (CHRIST, 2019).

Figura 1 – Passarela confeccionada com o concreto de pós reativos, no Canadá



Fonte: Perry e Corvez (2016).

Nesse contexto, o UHPC foi desenvolvido com o objetivo de superar as limitações do concreto convencional, proporcionando elevadas resistências mecânicas, reduzida porosidade e maior durabilidade, especialmente em ambientes agressivos, o que possibilita a execução de estruturas mais esbeltas e com maior vida útil.

Para alcançar tais propriedades o UHPC caracteriza-se por uma composição cuidadosamente otimizada, visando a obtenção de uma matriz cimentícia altamente densa e com reduzida porosidade. De modo geral, sua composição é constituída por cimento Portland, materiais pozolânicos (como a sílica ativa), agregados finos (principalmente areia de granulometria controlada), adições minerais ultrafinas (como o pó de quartzo), água e aditivos superplastificantes de alta eficiência. Em muitos casos, também são incorporadas fibras para melhoria do comportamento mecânico, embora sua presença não seja obrigatória para a definição do UHPC.

O cimento Portland atua como o principal ligante hidráulico, sendo responsável pelo desenvolvimento das resistências mecânicas por meio das reações de hidratação. A sílica ativa, por sua vez, desempenha papel fundamental na densificação da matriz, reagindo com o hidróxido de cálcio e promovendo a formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), além de contribuir para o refinamento da microestrutura. O pó de quartzo e outras partículas ultrafinas atuam no preenchimento dos vazios entre os grãos maiores, melhorando o empacotamento das partículas e reduzindo a porosidade do material.

Os agregados utilizados no UHPC são predominantemente finos, uma vez que a ausência de agregados graúdos favorece a homogeneidade da matriz e reduz pontos de descontinuidade interna. A água é utilizada em baixa quantidade,

resultando em uma reduzida relação água/aglomerante, o que contribui significativamente para a elevada densidade e, consequentemente, para o desempenho do material. Contudo, essa baixa relação água/aglomerante compromete a trabalhabilidade da mistura, tornando necessária a utilização de aditivos superplastificantes, os quais promovem a dispersão das partículas cimentícias e garantem a adequada fluidez do concreto.

Essa combinação de materiais resulta em um compósito cimentício com elevada compacidade, maior estabilidade frente a agentes agressivos e propriedades mecânicas superiores, como resistências à compressão superiores a 150 MPa (AFGC, 2002; GRAYBEAL, 2006; RUSSELL *et al.*, 2013) e resistência à tração direta superando 8 MPa (CHRIST, 2019). Nesse contexto, os códigos normativos brasileiros definem, por meio da ABNT NBR 17246:2025, o UHPC como um concreto de matriz cimentícia homogêneo, com baixa porosidade, resistência à compressão superior a 100 MPa e comportamento dúctil à tração.

### 3.2 FIBRAS

A utilização de fibras no concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) constitui uma estratégia eficiente para o aprimoramento de suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Essas fibras podem apresentar diferentes comprimentos, geometrias e materiais constituintes, sendo sua incorporação responsável pela formação do chamado concreto reforçado com fibras.

Sob o ponto de vista mecânico, as fibras podem ser classificadas em função do módulo de elasticidade em duas categorias: fibras de baixo módulo de elasticidade, cujo valor é inferior ao do concreto, e fibras de alto módulo de elasticidade, que apresentam módulo superior ao da matriz cimentícia. Para que desempenhem adequadamente a função de controle da fissuração, é fundamental que as fibras possuam resistência mecânica superior à do concreto, permitindo que atuem como pontes de transferência de tensões ao longo das fissuras e, assim, retardem sua propagação.

Dentre os diferentes tipos disponíveis, as fibras de aço destacam-se pela elevada resistência e capacidade de absorção de energia, contribuindo significativamente para o aumento da ductilidade do material.

No Brasil, a ABNT NBR 15530:2019 estabelece os requisitos e métodos de ensaio para fibras de aço destinadas ao uso em concreto. De acordo com essa norma, as fibras podem ser classificadas quanto à sua origem em:

- Classe I: provenientes de arame trefilado a frio;
- Classe II: provenientes de chapas laminadas cortadas a frio;
- Classe III: provenientes de arame trefilado e posteriormente escarificado.

Quanto à geometria, as fibras são classificadas em:

- Tipo A: com ancoragem nas extremidades;
- Tipo C: corrugadas;
- Tipo R: retas, sem ancoragem.

Para garantir desempenho adequado, as fibras devem ser produzidas com materiais e processos que atendam aos requisitos normativos, enquadrando-se nas classes e tipos especificados.

Além dessas classificações, a norma ABNT NBR 15530:2019, destaca o fator de forma ( $\lambda$ ), definido como a razão entre o comprimento e o diâmetro equivalente da fibra. Esse parâmetro exerce influência direta no comportamento mecânico do compósito, especialmente na capacidade de transferência de tensões e no controle da abertura de fissuras.

### **3.2.1 Fibras de aço**

As fibras de aço são amplamente empregadas em concretos UHPC devido à sua elevada resistência mecânica e ao seu módulo de elasticidade superior ao da matriz cimentícia, o que favorece uma interação eficiente entre fibra e matriz. Sua principal contribuição está associada ao aumento da resistência à tração e à flexão, além da melhoria significativa no controle da fissuração. Estudos experimentais indicam que a incorporação de aproximadamente 1% de fibras de aço em matrizes de UHPC pode proporcionar incrementos expressivos nas propriedades mecânicas, com aumentos da ordem de 60% na resistência à tração e cerca de 34% na resistência à flexão em comparação a composições sem fibras (SHI *et al.*, 2021).

Além do ganho de resistência, a adição de fibras ativa de mecanismos de tenacificação na interface fibra-matriz, resultando em um comportamento caracterizado como pseudoendurecimento por deformação, no qual o material

continua suportando incrementos de carga mesmo após o início da fissuração (KRAHL; CARRAZEDO; EL DEBS, 2018).

Apesar das vantagens mecânicas, a utilização de fibras de aço apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. Entre os principais aspectos destacam-se o maior peso específico, a suscetibilidade à corrosão em ambientes agressivos, especialmente na presença de umidade, e o custo mais elevado em comparação a outros tipos de fibras. Esses fatores podem restringir sua aplicação em determinadas situações, como em elementos com função estética ou em ambientes altamente corrosivos, exigindo uma análise criteriosa na etapa de dosagem e especificação do material (YAN *et al.*, 2021).

### **3.2.2 Fibras de polipropileno**

As fibras de polipropileno apresentam menor resistência mecânica em comparação às fibras de aço, porém contribuem significativamente para o controle de fissuração plástica e redução da retração. Estudos indicam que misturas de UHPC com teores de aproximadamente 2,3% de fibras de PP apresentam redução significativa da retração livre quando comparadas tanto a composições sem fibras quanto àquelas reforçadas apenas com fibras de aço, evidenciando a eficiência desse tipo de fibra no controle de deformações volumétricas (FENG *et al.*, 2023).

Além dos benefícios relacionados à fissuração, as fibras de polipropileno apresentam vantagens importantes do ponto de vista de durabilidade e viabilidade econômica. Por serem polímeros sintéticos, não estão sujeitas à corrosão, o que as torna particularmente adequadas para ambientes agressivos ou expostos à umidade. Adicionalmente, possuem baixa densidade, o que contribui para a redução do peso específico da mistura. Em termos econômicos, a substituição parcial de fibras de aço por fibras de PP pode resultar em reduções expressivas de custo, chegando a valores superiores a 70%, dependendo da proporção adotada (WEI *et al.*, 2023), favorecendo assim suas aplicações estruturais.

### **3.2.3 Efeito da combinação de fibra de aço e de polipropileno**

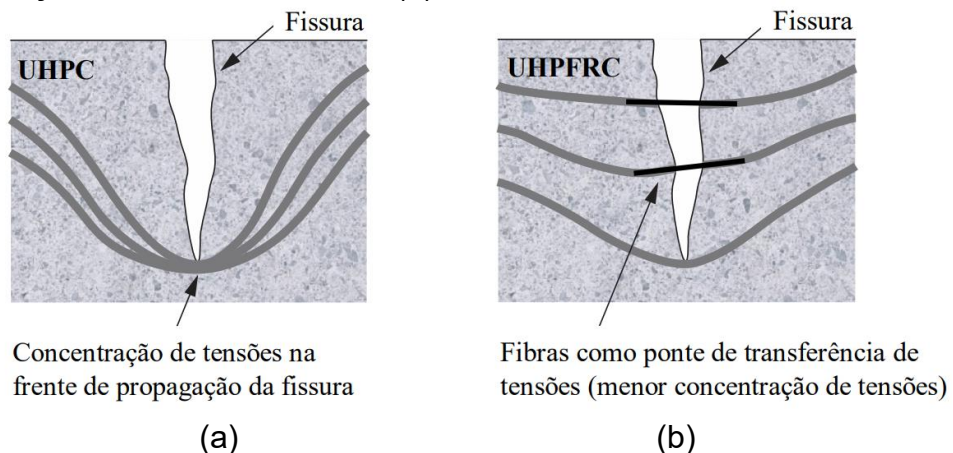
A literatura indica que a ruptura do UHPC sob tração ocorre de forma progressiva e em múltiplas escalas, iniciando-se na microestrutura do material e

evoluindo até o comportamento macroscópico. Nesse contexto, fibras de aço e de polipropileno, são combinadas com o objetivo de inibir a propagação de fissuras desde suas fases iniciais. Essa abordagem contribui para uma melhoria significativa do comportamento à tração do UHPC, devido ao maior controle e à melhor redistribuição do processo de fissuração ao longo de múltiplas escalas de dano (SMARZEWSKI, 2017). Assim, o efeito sinérgico entre essas fibras, promove a melhoria do desempenho global do compósito, equilibrando propriedades como resistência mecânica, ductilidade, durabilidade e viabilidade econômica, contribuindo para a eficiência do UHPC e ampliando sua aplicabilidade em estruturas submetidas a elevadas solicitações.

### 3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO UHPC REFORÇADO COM FIBRAS

O comportamento mecânico do UHPC é fortemente influenciado pela presença de fibras, que promovem modificações significativas em sua resposta sob carregamento. Enquanto o UHPC sem fibras apresenta concentração de tensões nos pontos de descontinuidade e, conseqüentemente, rápida propagação de fissuras após o início da ruptura como ilustra a Figura 2 (a), a incorporação de fibras altera esse mecanismo ao introduzir capacidade de redistribuição de tensões na matriz cimentícia. Esse efeito está associado à atuação das fibras como elementos de ponte (*bridging*) nas fissuras, restringindo sua abertura e retardando sua propagação com ilustra a Figura 2 (b).

Figura 2 – Função das fibras no UHPC: (a) UHPC sem reforço fibroso; (b) UHPFRC.



Fonte: elaborado por OLIVEIRA (2019) e adaptado por NUNES e AGOPYAN (1998).

Dessa forma, o material passa a apresentar maior ductilidade, tenacidade e capacidade de absorção de energia. Tais características decorrem, em grande parte, da interação entre a microestrutura densificada da matriz e o reforço fibroso, que conjuntamente controlam o processo de fissuração e o modo de ruptura do compósito.

No que diz respeito à resistência à compressão, estudos como Alsalman, Dang e Micah Hale, (2017), Soliman e Tagnit Hamou, (2016) mostram que o crescimento da resistência do UHPC com 2% de fibras é de, aproximadamente, 8%, aumento este devido pela inibição da propagação de fissuras provocadas pelo esforço axial durante o carregamento (CHRIST, 2019). Além disso, as fibras auxiliam na contenção de instabilidades locais na matriz, promovendo um comportamento ligeiramente mais estável próximo à ruptura, embora o mecanismo resistente dependa da resistência da matriz, das fibras e da interação entre ambos (SOLIMAN *et al.*, 2023).

Sob solicitações que envolvem estados de tração, como nos ensaios de tração na flexão e por compressão diametral, os efeitos das fibras tornam-se significativamente mais expressivos, uma vez que passam a atuar diretamente nos mecanismos de controle da fissuração. Nesse contexto, fibras metálicas, caracterizadas por elevado módulo de elasticidade e maior diâmetro, são mobilizadas predominantemente após o surgimento das fissuras, exercendo função de ponte de transferência de tensões entre as faces fissuradas, o que contribui para o aumento da resistência pós-fissuração e da ductilidade do material (QUININO, 2015). Por outro lado, fibras sintéticas, como as de polipropileno, apresentam menor módulo de elasticidade e dimensões reduzidas, o que favorece sua distribuição mais homogênea na matriz cimentícia. Essas características tornam-nas mais eficazes no controle da microfissuração, atuando ainda nas fases iniciais de carregamento ao dificultar a coalescência de fissuras e contribuir para o incremento da resistência à tração antes da fissuração macroscópica (QUININO, 2015). Dessa forma, a atuação combinada desses diferentes tipos de fibras promove uma redução da concentração de tensões e uma redistribuição mais uniforme dos esforços ao longo do material.

Em relação ao módulo de elasticidade, a incorporação de fibras de aço no UHPC tende a promover um incremento no módulo de elasticidade proporcional ao volume adicionado, devido à elevada rigidez intrínseca do aço (cerca de 200 GPa) em comparação com a matriz cimentícia (KRAHL; CARRAZEDO; EL DEBS, 2018). Por outro lado, as fibras de polipropileno (PP) possuem um módulo de elasticidade muito baixo (entre 3 e 8 GPa), o que faz com que sua influência no módulo de elasticidade

global seja discreta ou até negativa, podendo causar reduções na rigidez da matriz em teores mais elevados devido à sua baixa rigidez e potencial aumento da porosidade (WEI et al., 2023; FENG et al., 2023).

### 3.4 INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO ACELERADO NO UHPC

Os processos de cura desempenham papel fundamental no comportamento do UHPC, uma vez que influenciam diretamente nas reações de hidratação do cimento e na formação da microestrutura do material. Nesse contexto, o envelhecimento acelerado tem sido amplamente utilizado como uma ferramenta para simular, em um curto período de tempo, as condições de exposição ao longo da vida útil das estruturas.

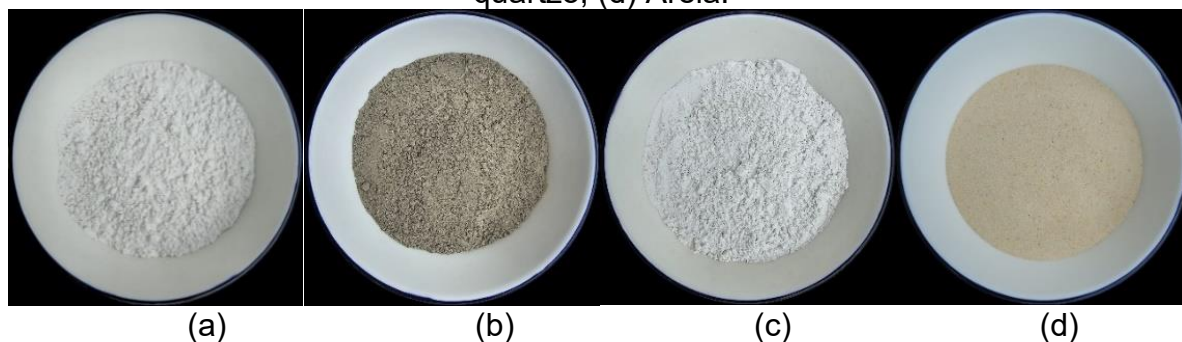
A análise desse tipo de ensaio torna-se, portanto, essencial para a compreensão da estabilidade do material em serviço e para a estimativa de seu desempenho a longo prazo em aplicações reais. Estudos indicam que o envelhecimento acelerado pode provocar alterações significativas nas propriedades mecânicas do UHPC, como a redução da tenacidade e do módulo de ruptura. Por outro lado, em determinadas condições, pode haver incremento na resistência à compressão, em função do avanço das reações de hidratação e da consequente densificação da matriz cimentícia (MADHKHAN; SAEIDIAN, 2021).

Apesar de sua relevância, ainda são observadas lacunas na literatura quanto ao comportamento do UHPC em idades mais avançadas. Nesse sentido, investigações que avaliem o desempenho mecânico do material sob condições de envelhecimento acelerado mostram-se fundamentais para ampliar o entendimento sobre sua evolução ao longo do tempo, contribuindo para a aplicação mais segura e eficiente.

## 4 MATERIAIS

Os materiais utilizados na composição do UHPC, para ambos os traços estudados, foram previamente selecionados conforme suas propriedades físicas e mecânicas, de modo a garantir a reprodutibilidade da mistura e a confiabilidade dos resultados experimentais. Na sequência, é apresentada a imagem dos materiais empregados na produção das misturas na Figura 3.

Figura 3 - Amostra dos materiais utilizados: (a) Sílica ativa; (b) Cimento; (c) Pó de quartzo; (d) Areia.



Fonte: elaboração própria (2026).

Para garantir a trabalhabilidade das misturas com baixa relação água/aglomerante, foi utilizado aditivo superplastificante de alto desempenho à base de policarboxilato (MC-POWERFLOW 4001), permitindo adequada dispersão das partículas cimentícias sem comprometer a coesão do material.

No que se refere ao reforço com fibras, as fibras de aço (SF) utilizadas foram obtidas a partir de macrofibras de fabricação nacional, originalmente com 30 mm de comprimento, 0,55 mm de diâmetro, densidade de 7,8 g/cm<sup>3</sup>, fator de forma de 54,54 e resistência à tração de 1000 MPa. Devido à indisponibilidade de microfibras no mercado nacional, essas fibras foram adaptadas por meio de corte manual ao meio, resultando em elementos com comprimento final de 15 mm e fator de forma de 27,27.

Adicionalmente, foram utilizadas microfibras de polipropileno (PP) de fabricação nacional com comprimento de 6 mm, densidade de 0,91 g/cm<sup>3</sup> e resistência à tração de 300 MPa. A Figura 4 apresenta as fibras utilizadas no referente estudo.

Figura 4 – Amostra das fibras utilizadas: (a) SF; (b) PP.



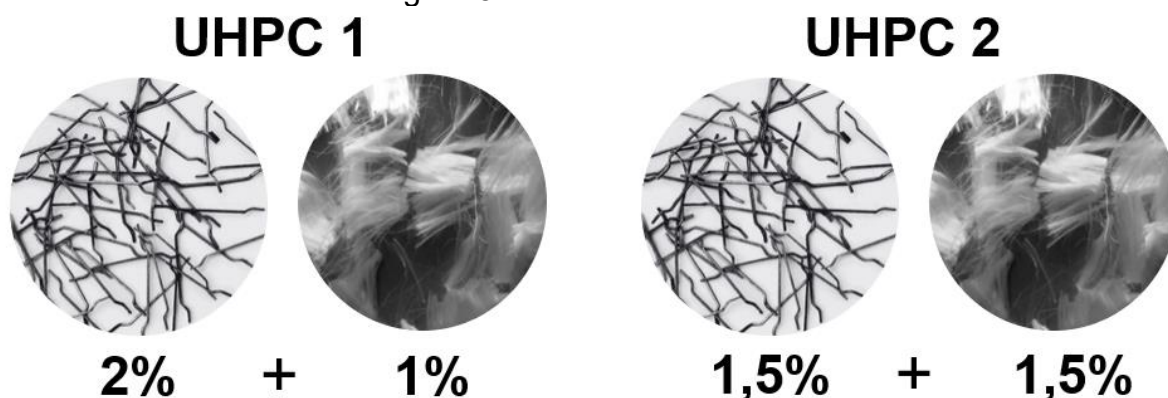
Fonte: elaboração própria (2026).

## 5 METODOLOGIA

A metodologia compreende ao todo 6 fases: (I) revisão da literatura, com o objetivo de reunir informações acerca das propriedades mecânicas do UHPC reforçado com fibras de aço e fibras de polipropileno avaliadas individualmente, permitindo posteriormente a comparação com os resultados obtidos experimentalmente; (II) preparação das microfibras de aço nacionais, visando à redução do peso individual das fibras para minimizar sua segregação durante a mistura e, conseqüentemente, evitar heterogeneidades no UHPC; (III) produção das misturas e moldagem dos corpos de prova; (IV) execução dos processos de envelhecimento acelerado; (V) realização dos ensaios de caracterização mecânica, destinados à obtenção das propriedades de cada traço; e, por fim, (VI) tratamento e análise dos resultados obtidos.

Para isso, foram confeccionadas duas misturas de UHPC, diferindo-se pela proporção do volume de microfibra de aço e de polipropileno: (UHPC 1) 2% de microfibra de aço e 1% de microfibra de polipropileno; (UHPC 2) 1,5% de microfibra de aço e 1,5% de microfibra de polipropileno, como ilustrado na Figura 5. Além disso foi confeccionado um traço sem adição de fibras para comparação dos resultados do UHPC 1, UHPC 2, UHPC A (valor identificado na revisão da literatura do UHPC somente com 1,5% de fibras de aço) e UHPC B (valor identificado na revisão da literatura do UHPC somente com 1,5% de fibras de polipropileno) aos 28 dias.

Figura 5 – Misturas analisadas

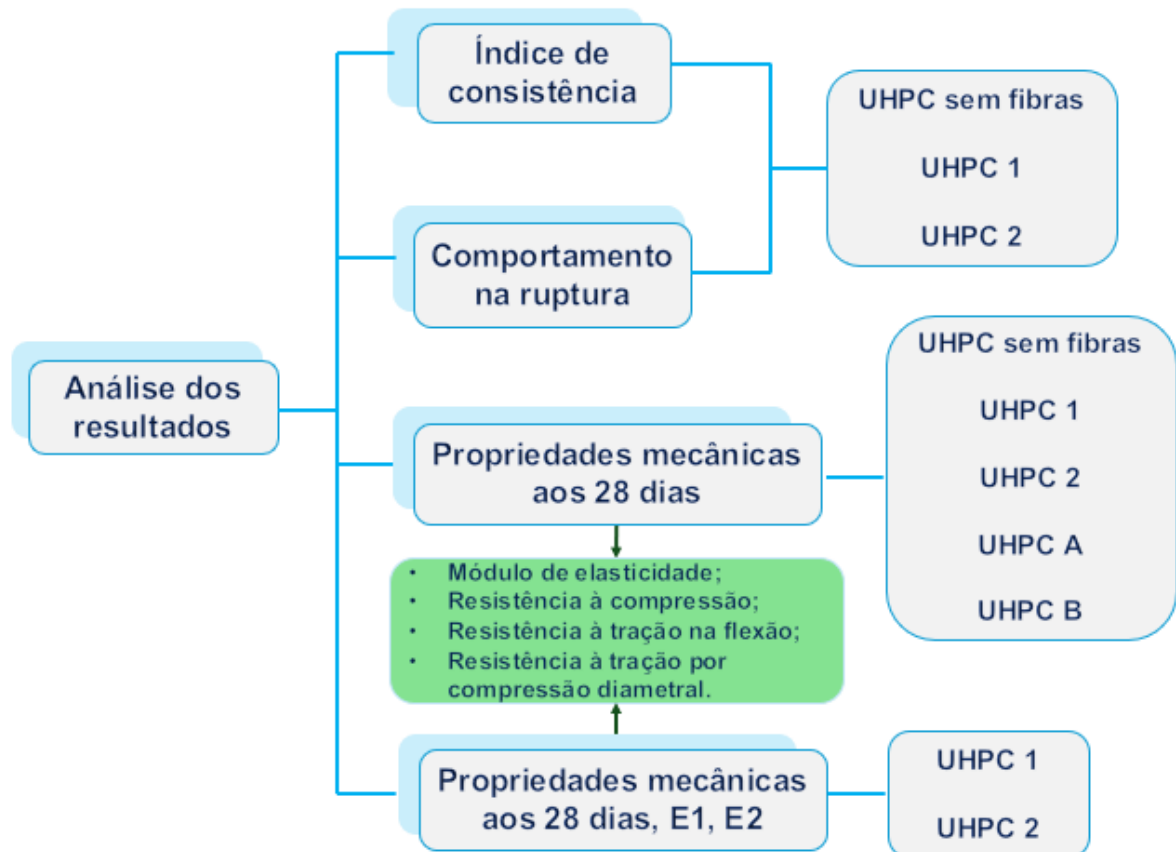


Fonte: elaboração própria (2026).

Para melhor compreensão da etapa VI da metodologia, a Figura 6 apresenta o fluxograma adotado para a comparação e análise dos resultados obtidos

experimentalmente. O esquema ilustra de forma resumida a sequência utilizada na avaliação das propriedades mecânicas dos diferentes traços estudados, bem como a relação entre as condições de referência e de envelhecimento acelerado analisadas ao longo da pesquisa.

Figura 6 – Fluxograma da fase VI



Fonte: elaboração própria (2026).

## 5.1 COLETA DE DADOS TEÓRICOS

Nesta etapa, realizou-se uma pesquisa a fim de determinar o teor de fibra adicionado ao UHPC que conferisse ao material melhor desempenho e uma análise crítica dos teores de fibras de aço e fibras de polipropileno mais recorrentes na literatura científica sobre UHPC com reforço fibroso. Os estudos foram selecionados a partir de periódicos de alto impacto, predominantemente classificados como Q1 no Journal Citation Reports, com fatores de impacto superiores a 5, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Dados dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica – SF

| Título do artigo                                                                                                                   | Ano de publicação | Autores                | Teor de fibra na mistura            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Utilization of steel slag in UHPC with enhanced eco-friendliness                                                                   | 2019              | ZHANG <i>et al.</i>    | 0%<br>2%                            |
| Influence of steel fiber content on the rate-dependent flexural performance of UHPC with coarse aggregates                         | 2022              | LI <i>et al.</i>       | 1%<br>1,50%<br>2%                   |
| Effects of Steel Fiber and Specimen Geometric Dimensions on the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete           | 2022              | FANG <i>et al.</i>     | 0%<br>1%<br>2%<br>3%                |
| Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-highperformance concrete: Influence of steel fiber content and shape | 2019              | WU <i>et al.</i>       | 0%<br>1%<br>2%<br>3%                |
| Changes in rheology and mechanical properties of UHPC with silica fume content                                                     | 2019              | WU <i>et al.</i>       | 2%                                  |
| Mechanical and fracture properties of ultra-high performance concrete: Effects of steel fiber and silica fume geopolymer           | 2020              | LIU <i>et al.</i>      | 0%<br>1%<br>2%<br>3%                |
| Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): Influence of steel fiber on mechanical properties               | 2020              | LIU <i>et al.</i>      | 0%<br>1%<br>2%<br>3%                |
| Cyclic behavior of UHPFRC under compression                                                                                        | 2019              | KRAHL <i>et al.</i>    | 0%<br>1%<br>2%<br>0%                |
| Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)                                  | 2014              | YU <i>et al.</i>       | 0,50%<br>1%<br>1,50%<br>2%<br>2,50% |
| Mechanical damage evolution in UHPFRC: Experimental and numerical investigation                                                    | 2018              | KRAHL <i>et al.</i>    | 0%<br>1%<br>2%                      |
| Stress-strain models for UHPC and UHPFRC under triaxial compression                                                                | 2023              | ZHANG <i>et al.</i>    | 0%<br>2%                            |
| Bond behaviour of reinforcing bars in UHPFRC                                                                                       | 2015              | MARCHAND <i>et al.</i> | 2,50%                               |
| Compressive behavior of FRP-confined ultra-high performance concrete and UHPFRC                                                    | 2023              | WANG <i>et al.</i>     | 0%<br>2%                            |

Fonte: XAVIER *et al.* (2024).

Tabela 2 - Dados dos artigos coletados para a pesquisa bibliográfica – PP

| Título do artigo                                                                                                                                       | Ano de publicação | Autores               | Teor de fibra na mistura         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|
|                                                                                                                                                        |                   |                       | 0%                               |
| Effect of Curing Period on Properties of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Ultra-High Performance Concrete                                      | 2017              | SMARZEWSKI, P.        | 0,50%<br>1%<br>1,50%<br>2%       |
| The Mechanical Properties and Damage Evolution of UHPC Reinforced with Glass Fibers and High-Performance Polypropylene Fibers                          | 2021              | HE, <i>et al.</i>     | 1%<br>1,50%<br>3%                |
| Effect of polypropylene fiber on early-age properties and stress relaxation of ultra-high-performance concrete under different degrees of restraint    | 2023              | FENG, <i>et al.</i>   | 0%<br>1%<br>2%<br>3%             |
| Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre | 2021              | YAN, <i>et al.</i>    | 0%<br>0,50%<br>1%<br>1,50%<br>2% |
| Pullout and flexural performance of silane groups and hydrophilic groups grafted polypropylene fibre reinforced UHPC                                   | 2021              | SHI, <i>et al.</i>    | 1%<br>1,50%<br>3%                |
| Coarse synthetic fibers (PP and POM) as a replacement to steel fibers in UHPC: Tensile behavior, environmental and economic assessment                 | 2024              | LIN, <i>et al.</i>    | 0%<br>3%                         |
| Behaviour of hybrid polypropylene and steel fibre reinforced ultra-high performance concrete beams against single and repeated impact loading          | 2023              | WEI, <i>et al.</i>    | 0%<br>0,50%<br>1%<br>1,50%<br>2% |
| Cyclic tensile behavior of UHPC with hybrid steel-polypropylene fiber: Experimental study and analytical model                                         | 2023              | WANG, <i>et al.</i>   | 0%                               |
| Experimental and numerical investigation of minimum required fiber content in bending characteristics of 100 Mpa UHPC-formulated concrete              | 2022              | KAMJOU, <i>et al.</i> | 0%                               |

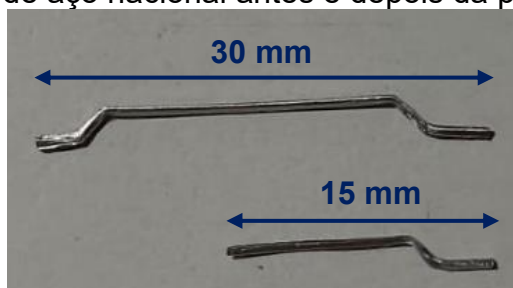
Fonte: XAVIER *et al.* (2024).

A partir dos artigos listados nas Tabelas 1 e 2, foram extraídos dados referentes ao módulo de elasticidade, à resistência à compressão axial e à resistência à tração na flexão, aos 28 dias, com o objetivo de possibilitar a comparação entre valores experimentais e teóricos. Ressalta-se que devido à escassez de resultados referente a resistência a tração por compressão diametral, não foi possível realizar análise comparativa para essa propriedade mecânica.

## 5.2 PREPARAÇÃO DAS FIBRAS DE AÇO NACIONAIS

O estudo em questão foi realizado utilizando materiais nacionais, como a microfibras de polipropileno da Figura 4 (b). Entretanto, as fibras de aço nacionais possuem um fator de forma (54,54) superior ao convencionalmente considerado para uma microfibras, possuindo comprimento igual a 30 mm, como mostra na Figura 4 (a). Dessa forma, as fibras de aço nacionais foram cortadas ao meio manualmente, como ilustra a Figura 7, para obter um fator de forma menor (27,27).

Figura 7 - Fibras de aço nacional antes e depois da preparação



Fonte: elaboração própria (2026).

## 5.3 PRODUÇÃO DA MISTURA E CONCRETAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A Tabela 3 apresenta o traço empregado em ambas as misturas analisadas, proposto por Silva *et al.* (2023). A mistura foi originalmente dosada para atingir resistência à compressão de aproximadamente 129 MPa aos 28 dias, considerando a incorporação de microfibras de aço importadas, com um comprimento de 13 mm, diâmetro de 0,2 mm e resistência máxima de 2900 MPa. Vale ressaltar que, devido às condições térmicas do ambiente de produção, foi necessário um acréscimo de 5% de água, a fim de garantir adequada trabalhabilidade. Ademais, todos procedimentos seguiram o código normativo ABNT NBR 17246: 2025, parte 1, 2, 3 e 4.

Tabela 3 - Traço empregado para ambos UHPC

| Material                                                        | Quantidade(kg/m³) |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
| Cimento CPV Ultra Rápido Holcim                                 | 757,2             |
| Areia fina industrial (Módulo de finura 80/100-Mineração Jundu) | 833               |
| Pó de quartzo (SM 200 Mineração Jundu)                          | 378,6             |
| Sílica ativa não densificada (Elkem)                            | 189,3             |
| Água                                                            | 159               |
| Superplastificante (ADVA 585)                                   | 68,2              |

Fonte: adaptação de Silva *et al.* (2023).

Todos os procedimentos de moldagem seguiram a ABNT NBR 5738: 2016 – Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Ademais, foi necessária a realização da retificação dos corpos de prova antes da execução dos ensaios de caracterização, conforme previsto no item 9.3.1 da referida norma.

Para garantir a representatividade, foram moldados seis corpos de prova para cada idade de ensaio. Posteriormente, realizou-se a análise de variabilidade, desconsiderando valores discrepantes e adotando os 3 resultados mais consistentes para o cálculo da média representativa, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio

| Ensaio de caracterização do concreto       |        | Quantidade de corpos de prova |                                 |                  |
|--------------------------------------------|--------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|
|                                            |        | Compressão axial              | Tração por compressão diametral | Tração na flexão |
| Cura úmida (28 dias)                       | UHPC 1 | 6                             | 6                               | 6                |
|                                            | UHPC 2 | 6                             | 6                               | 6                |
| Envelhecimento acelerado tipo 1 (365 dias) | UHPC 1 | 6                             | 6                               | 6                |
|                                            | UHPC 2 | 6                             | 6                               | 6                |
| Envelhecimento acelerado tipo 2 (365 dias) | UHPC 1 | 6                             | 6                               | 6                |
|                                            | UHPC 2 | 6                             | 6                               | 6                |

Fonte: elaboração própria (2026).

## 5.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

### 5.4.1 Índice de consistência

Os índices de consistência das misturas foram determinados conforme o item 5.2 da ABNT NBR 7215:2025. O procedimento consiste na introdução da mistura recém-preparada no molde em três camadas de alturas aproximadamente iguais, com

a aplicação de golpes em cada camada, de modo a garantir adequada compactação. Em seguida, o molde é removido verticalmente e a mesa de consistência é acionada, aplicando-se 30 golpes por meio da manivela. Após esse processo, são realizadas medições do diâmetro de espalhamento em três direções distintas, sendo os valores registrados para posterior determinação do índice de consistência, conforme estabelecido no item 6.1 da referida norma.

#### **5.4.2 Ensaios de envelhecimento acelerado**

Os ensaios de envelhecimento acelerado para o UHPC foram realizados a partir de uma adaptação dos itens 9.2.3 e 9.2.4 da ABNT NBR 15498:2021 Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas – Requisitos e métodos de ensaio, sendo o envelhecimento acelerado por imersão em água quente (envelhecimento acelerado tipo 1) e o envelhecimento acelerado por ciclos de imersão e secagem (envelhecimento acelerado tipo 2).

##### **5.4.2.1 Envelhecimento acelerado por imersão em água quente**

O ensaio de envelhecimento acelerado tem por objetivo evidenciar uma eventual degradação dos produtos por um período prolongado dentro de água quente (item 9.2.3 da ABNT NBR 15498:2021). Tal procedimento consiste em submergir os corpos de prova em água quente mantida a  $(60 \pm 2) ^\circ\text{C}$  em uma cuba com sistema de regulagem de temperatura durante 50 dias. Após esse período, os corpos de prova foram levados ao equilíbrio térmico em temperatura ambiente e retificados. Por fim, foi feita a inspeção visual para identificar possíveis falhas, como fissuras, delaminações e outros defeitos.

##### **5.4.2.2 Envelhecimento acelerado por ciclos de imersão e secagem**

O envelhecimento tipo 2 consiste em submeter os corpos de prova a 50 ciclos de imersão e secagem, sendo cada ciclo caracterizado pela imersão em água a  $40^\circ\text{C}$  (câmara úmida) por um período de 18 horas e secagem de 6 horas em uma estufa com circulação de ar à temperatura de  $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$  e umidade relativa inferior a 20%. Após os 50 ciclos os corpos de prova foram colocados em um tanque com água em

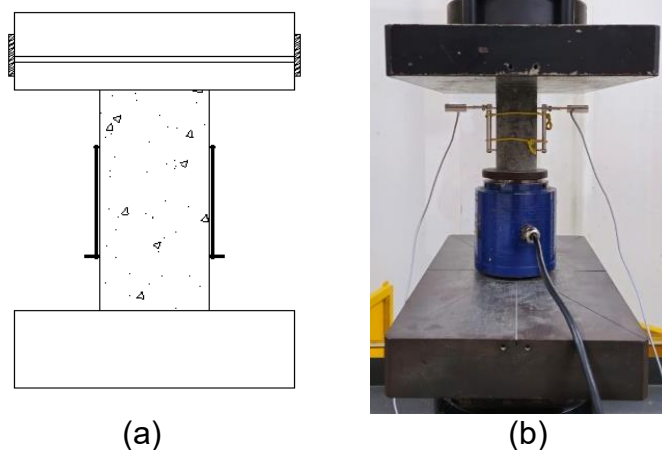
temperatura ambiente por um período de 24 horas, para, posteriormente serem retificados e ensaiados.

Vale ressaltar que, segundo o item 9.2.4.3 da ABNT NBR 15498:2021, o qual define como deve-se executar o ensaio em questão, um intervalo de 72 horas entre os ciclos é admissível quando necessário.

#### 5.4.3 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739: 2018 Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Mais especificamente, a execução do ensaio seguiu o item 5 da referente norma, para a idade de 28 dias e após os procedimentos de envelhecimento acelerado, como ilustrado na Figura 8 (a) o esquema do ensaio de compressão e a Figura 8 (b) o ensaio de compressão no laboratório.

Figura 8 – Ensaio de compressão axial: (a) esquema do ensaio; (b) ensaio no laboratório.



Fonte: adaptação de Prado (2020).

Já o cálculo do valor da resistência à compressão foi obtido a partir do item 6.1 da ABNT NBR 5739: 2018, como mostra a equação (1).

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

Onde:

$f_c$  é a resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

$F$  é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

$D$  é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

#### 5.4.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi calculado de acordo com a ABNT NBR 8522-1: 2021 Concreto — Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão, seguindo a equação 2.

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

Onde:

$\sigma_b$  é a tensão maior, considerada como 30 % da resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

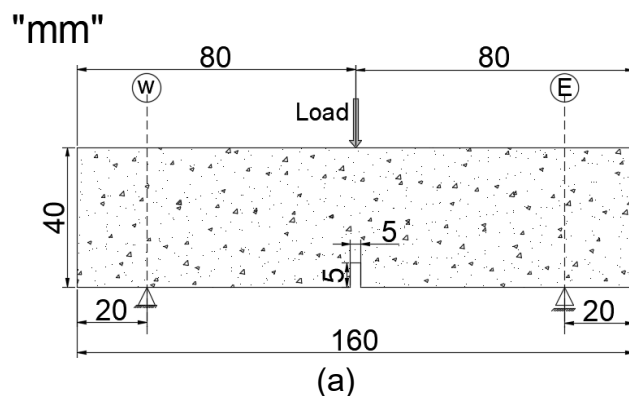
$\sigma_a$  é a tensão básica correspondente à deformação específica  $50 \times 10^{-6}$ , expressa em megapascals (MPa);

$\varepsilon_b$  é a deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior.

#### 5.4.5 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 13279:2005 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, para a idade de 28 dias e após ambos os procedimentos de envelhecimento acelerado. Como ilustra a Figura 9 (a) o esquema do ensaio de tração na flexão de três pontos e a Figura 9 (b) o ensaio de tração na flexão no laboratório.

Figura 9 – Ensaio de resistência à tração na flexão: (a) esquema do ensaio; (b) ensaio no laboratório.



Fonte: adaptação de Prado (2020).

O cálculo da resistência à tração na flexão foi determinado no item 5.5.2.3 da ABNT NBR 13279:2005, como determina a equação (3).

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

Onde:

$R_f$  é a resistência à tração na flexão, em megapascals (MPa);

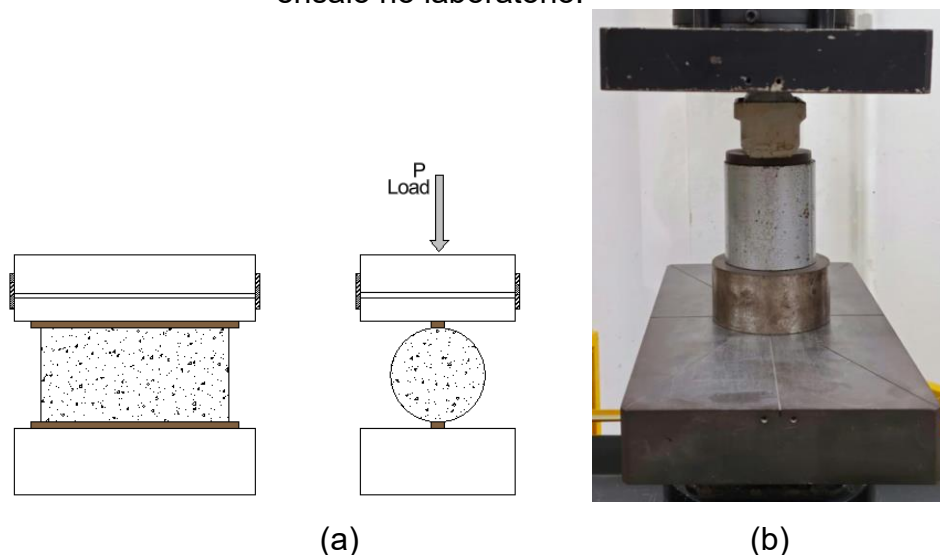
$F_f$  é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons (N);

$L$  é a distância entre os suportes, em milímetros (mm).

#### 5.4.6 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi executado de acordo com ABNT NBR 7222: 2011 Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, para a idade de 28 dias e após ambos os procedimentos de envelhecimento acelerado, como ilustra na Figura 10 (a) o esquema do ensaio de tração por compressão diametral e a Figura 10 (b) o ensaio de tração por compressão diametral no laboratório.

Figura 10 – Ensaio de tração por compressão diametral: (a) esquema do ensaio; (b) ensaio no laboratório.



Fonte: adaptação de Prado (2020).

Para o cálculo da força resistente foi utilizado a equação (4) como determina o item 6.1 da ABNT NBR 7222: 2011.

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

Onde:

$f_{ct,sp}$  é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (MPa);

$F$  é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

$d$  é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

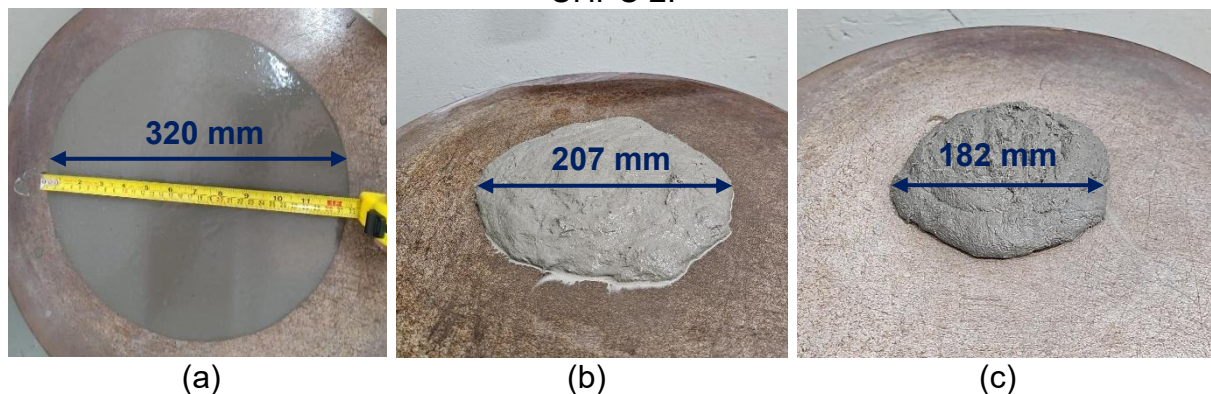
$l$  é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

No que se refere à consistência dos UHPC analisados, obteve-se um índice de consistência de 207 mm para o UHPC 1 e 182 mm para o UHPC 2, sendo ambos classificados como SF1 de acordo com a NBR ABNT 17246-1:2025. Enquanto o UHPC sem fibras apresentou um valor significativamente superior, de 320 mm, se enquadrando na classificação de consistência SF3 da referente norma. Esse resultado, mostrado na Figura 11, evidencia, de forma clara, o impacto da incorporação de fibras na fluidez das misturas, reforçando a hipótese de Feng *et al.* (2022), de que a fluidez das misturas frescas de UHPC diminui à medida que o conteúdo volumétrico de fibras aumenta, uma vez que a ausência de fibras no traço de referência favoreceu a mobilidade da matriz cimentícia, permitindo maior fluidez.

Figura 11 – Misturas na mesa de abatimento: (a) UHPC sem fibras; (b) UHPC 1; (c) UHPC 2.



Fonte: elaboração própria (2026).

A viscosidade da pasta de cimento aumenta com a atribuição de fibras, resultando em um menor abatimento, o que está relacionado com o aumento da área superficial específica associado também ao aumento do teor de fibras (ULLAH *et al.*, 2022). Posto isso, ao comparar os traços com fibras, observa-se que o UHPC 1 apresentou maior fluidez em relação ao UHPC 2, reforçando tal hipótese. Visto que, embora ambos possuam o mesmo teor total de fibras, o UHPC 2 contém maior quantidade relativa de microfibras de PP, que possui elevada área superficial específica, intensificando as interações internas da mistura e, consequentemente, aumentando o atrito entre os constituintes e dificultando o escoamento.

Em contrapartida, as fibras de aço, predominantes no UHPC 1, tendem a exercer menor influência na perda de fluidez quando comparadas às fibras poliméricas, principalmente em função de sua menor área superficial específica. Dessa forma, a diferença observada entre os índices de consistência dos três traços evidencia não apenas o efeito da presença de fibras, mas também a importância da sua natureza e proporção, sendo possível afirmar que o aumento do teor relativo de fibras de PP está associado a uma redução mais acentuada da fluidez da mistura.

## 6.2 COMPARAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO DO UHPC 1 E DO UHPC 2

### 6.2.1 Módulo de elasticidade

A Tabela 5 reúne os resultados do módulo de elasticidade calculados para cada um dos 3 corpos de prova selecionados, para as diversas condições de exposição estudada, apresentando também os valores médios correspondentes, os desvios padrão e os coeficientes de variação.

Tabela 5 – Módulo de elasticidade

|                         | 28 dias |        | E 1    |        | E 2    |        |
|-------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | UHPC 1  | UHPC 2 | UHPC 1 | UHPC 2 | UHPC 1 | UHPC 2 |
| CP1 [GPa]               | 52      | 45     | 44     | 53     | 44     | 45     |
| CP2 [GPa]               | 45      | 40     | 42     | 46     | 51     | 47     |
| CP3 [GPa]               | 45      | 40     | 47     | 51     | 44     | 45     |
| Valor médio [GPa]       | 48      | 42     | 44     | 50     | 47     | 45     |
| Desvio padrão           | 3,97    | 2,78   | 2,64   | 3,41   | 4,02   | 1,09   |
| Coeficiente de variação | 8,32    | 6,71   | 5,96   | 6,79   | 8,61   | 2,39   |

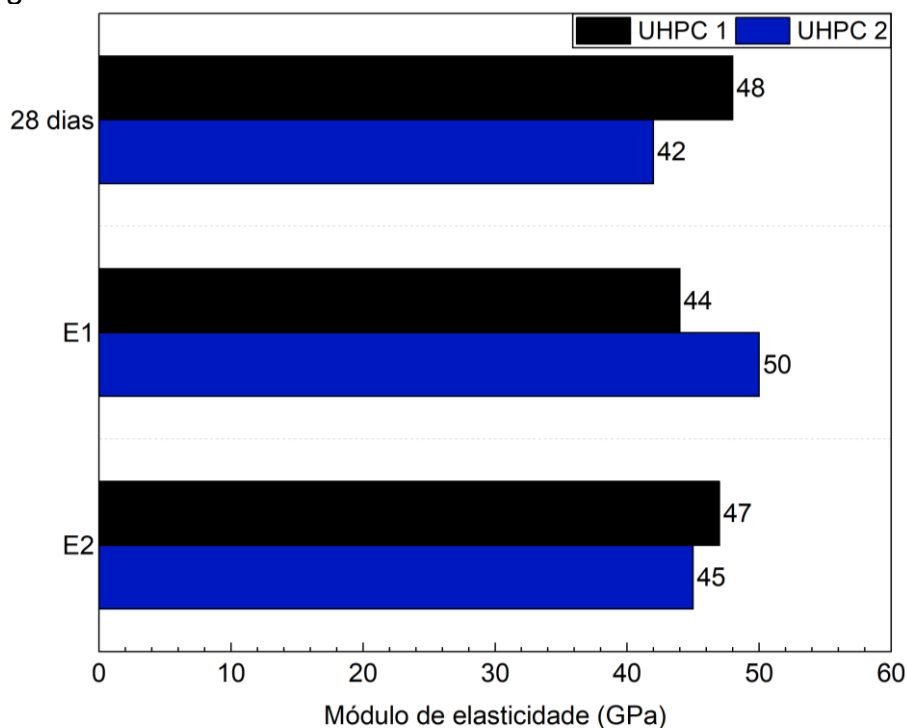
Fonte: elaboração própria (2026).

Os coeficientes de variação do módulo de elasticidade foram inferiores a 9% em todas as condições, indicando boa repetibilidade dos ensaios. O UHPC 2 apresentou, em geral, menor variabilidade, com destaque para o envelhecimento tipo 2 (2,39%), evidenciando maior uniformidade. Já o UHPC1 mostrou maior sensibilidade às condições de envelhecimento, com aumento da dispersão no tipo 2 (8,61%). Esses resultados sugerem que a composição do UHPC 2 contribui para um comportamento mais estável frente às condições de envelhecimento analisadas.

Para um melhor entendimento dos resultados apresenta-se os valores médios do módulo de elasticidade dos compósitos UHPC 1 e UHPC 2 na Figura 12, obtidos para as diferentes condições de exposição analisadas. Esses valores foram determinados conforme a Equação 2, a partir das variações de tensão ( $\sigma_n - \sigma_a$ ) e variações de deformações ( $\varepsilon_n - \varepsilon_a$ ), extraídas do trecho elástico das curvas tensão-deformação provenientes dos ensaios de compressão axial.

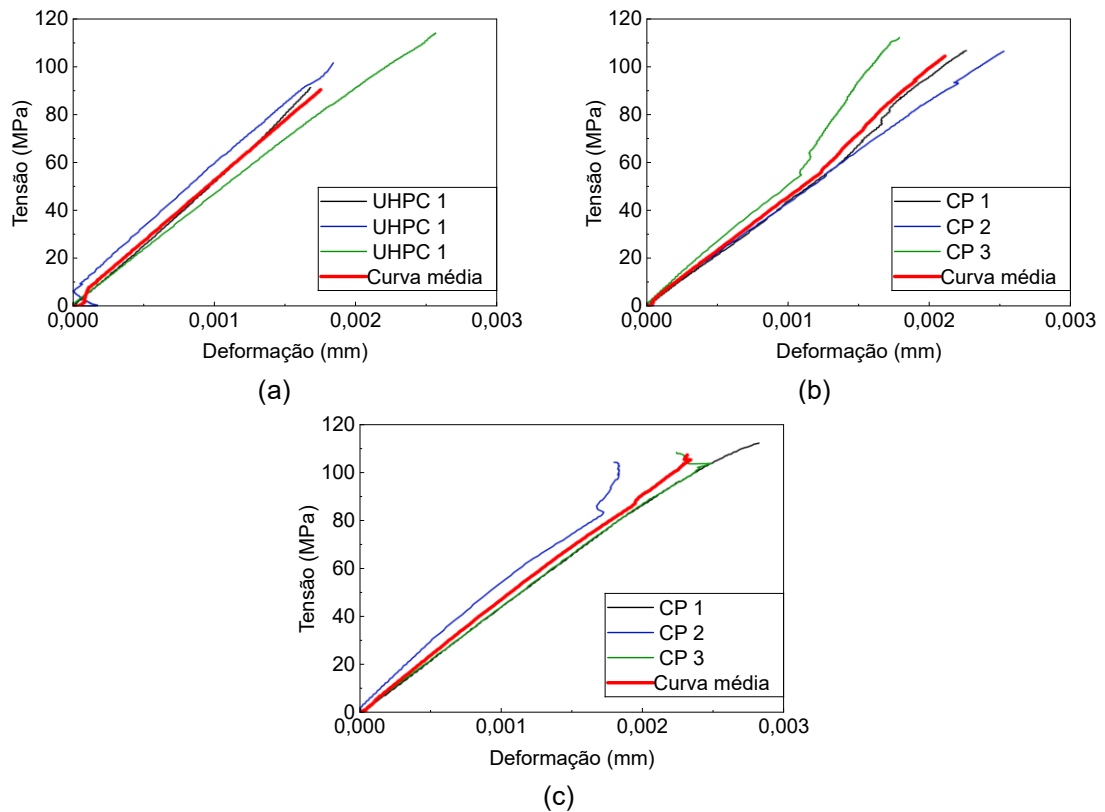
As curvas correspondentes referem-se às idades de 28 dias, ao envelhecimento acelerado tipo 1 (E1) e ao envelhecimento acelerado tipo 2 (E2), conforme ilustrado na Figura 13 (a), (b), (c) para o UHPC 1 e na Figura 14 (a), (b), (c), para o UHPC 2, respectivamente.

Figura 12 – Módulo de elasticidade do UHPC 1 e do UHPC 2



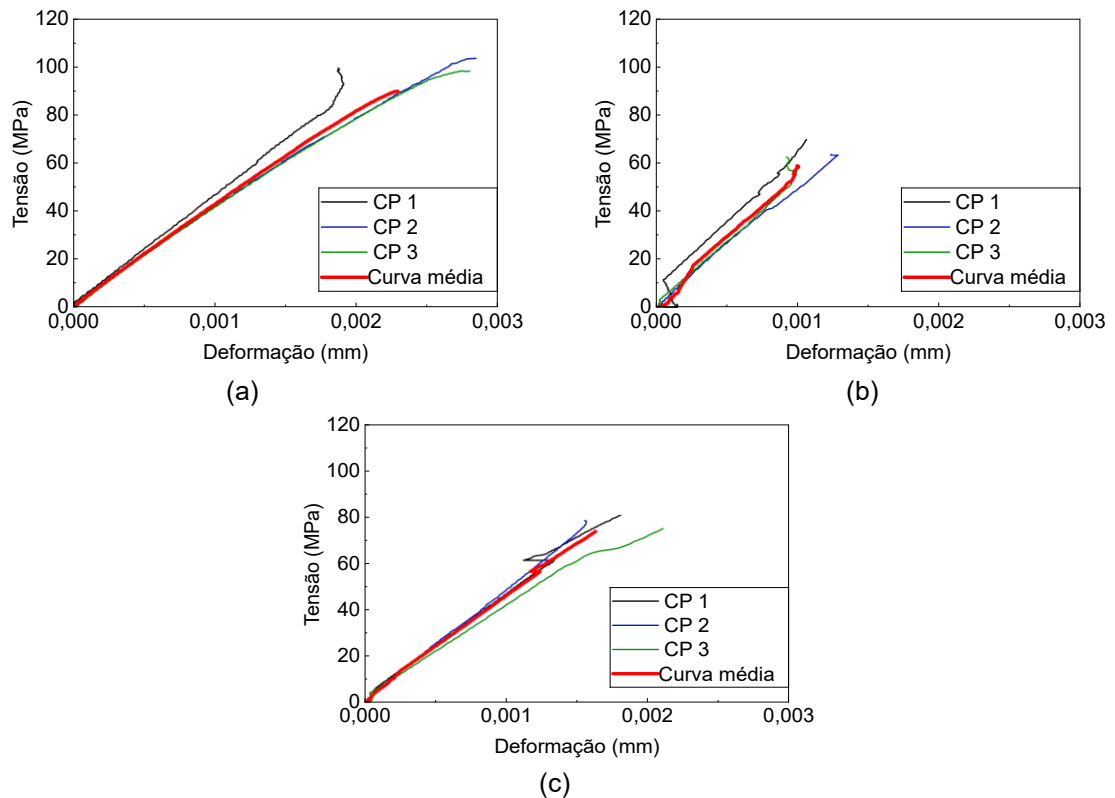
Fonte: elaboração própria (2026).

Figura 13 - Curvas tensão-deformação do ensaio de compressão axial do UHPC 1: (a) 28 dias; (b) Envelhecimento tipo 1; (c) Envelhecimento tipo 2.



Fonte: elaboração própria (2026).

Figura 14 - Curvas tensão-deformação do ensaio de compressão axial do UHPC 2: (a) 28 dias; (b) Envelhecimento tipo 1; (c) Envelhecimento tipo 2.



Fonte: elaboração própria (2026).

O valor usualmente encontrado na literatura para o módulo de elasticidade do UHPC/UHPFRC é na faixa de 37 GPa a 68 GPa, com valor médio de aproximadamente 50 GPa. Além disso, estudos experimentais indicam que a adição de fibras no UHPC, estatisticamente, não representa ganho de rigidez à mistura (ROMPA, GIDRÃO, 2020). Os resultados obtidos na Figura 12 evidenciam essa baixa influência da proporção e do tipo de fibras empregadas nas misturas. Obtendo uma variação de rigidez entre o UHPC 1 e o UHPC 2 de 12,5% aos 28 dias, 4,26% após o envelhecimento tipo1 e 12% após o envelhecimento tipo 2.

Qian *et al.* (2023) descobriram que, apesar da temperatura elevada ter um efeito positivo na continuação de hidratação secundária, as fibras de PP formam poros interconectados nessas altas temperaturas, interferindo diretamente nas propriedades mecânicas do UHPC, como a queda da resistência à compressão. Tal hipótese justifica o aumento do módulo de elasticidade do UHPC 2 após os envelhecimentos acelerados em altas temperaturas, juntamente com a queda de resistência à compressão e menor deformação até a ruptura conforme a Figura 14 ilustra. Ainda assim, é possível justificar que esse efeito foi mais acentuado no envelhecimento tipo 1 do que no envelhecimento tipo 2, visto que a incidência dos corpos de prova em altas temperaturas era maior. Ademais, o ligeiro ajuste de rigidez do UHPC 1 após os envelhecimentos pode ser justificado pela menor quantidade de fibras de polipropileno relativa, o que diminui consideravelmente o efeito citado.

### 6.2.2 Resistência à compressão axial

A Tabela 6 reúne os resultados da resistência à compressão obtidos para cada um dos 3 corpos de prova selecionados, para as diversas condições de exposição estudada, apresentando também os valores médios correspondentes, os desvios padrão e os coeficientes de variação.

Tabela 6 – Resistência à compressão axial

|                         | 28 dias |        | E 1    |        | E 2    |        |
|-------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | UHPC 1  | UHPC 2 | UHPC 1 | UHPC 2 | UHPC 1 | UHPC 2 |
| CP1 [MPa]               | 103,87  | 99,4   | 107,09 | 73,41  | 112,13 | 95,27  |
| CP2 [MPa]               | 98,67   | 103,46 | 109,31 | 74,04  | 104,08 | 95,93  |
| CP3 [MPa]               | 100,28  | 98,21  | 112,9  | 77,18  | 110,85 | 88,31  |
| Valor médio [MPa]       | 101     | 100    | 110    | 74,9   | 109    | 93,2   |
| Desvio padrão           | 2,66    | 2,75   | 2,93   | 2,02   | 4,33   | 4,22   |
| Coeficiente de variação | 2,64    | 2,74   | 2,67   | 2,70   | 3,97   | 4,53   |

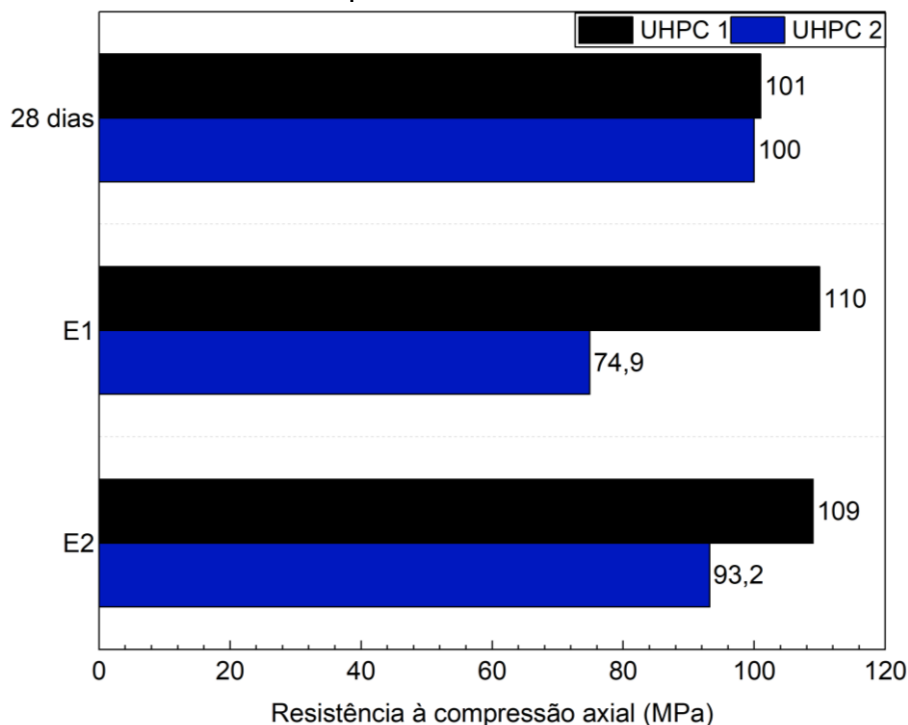
Fonte: elaboração própria (2026).

Considerando os critérios de avaliação da Associação Brasileira de Normas Técnicas estabelecidos na NBR 5739:2018, os coeficientes de variação obtidos indicam, de forma geral, baixa dispersão dos resultados experimentais. Os valores observados para os concretos aos 28 dias e após o envelhecimento acelerado tipo 1 (entre 2,64% e 2,70%) enquadram-se no Nível 1 – Excelente ( $cv \leq 3,0\%$ ), evidenciando baixa dispersão e elevada uniformidade entre os corpos de prova.

Já para o envelhecimento acelerado tipo 2, os coeficientes de variação de 3,97% (UHPC1) e 4,53% (UHPC2) situam-se, respectivamente, nos níveis “Muito bom” ( $3,0 < cv \leq 4,0$ ) e Bom ( $4,0 < cv \leq 5,0$ ). Esses resultados ainda são considerados adequados, porém indicam um aumento na variabilidade dos dados, possivelmente associado aos efeitos mais severos desse tipo de envelhecimento sobre a microestrutura do material.

Ademais, apresentam-se os resultados médios de resistência à compressão axial do UHPC 1 e do UHPC 2 nas três condições analisadas: 28 dias, envelhecimento acelerado tipo 1 e envelhecimento acelerado tipo 2 na Figura 15.

Figura 15 – Resistência à compressão axial do UHPC 1 e do UHPC 2



Fonte: elaboração própria (2026).

A melhoria na resistência à compressão proporcionada pelas fibras não é tão significativa quanto a observada nas propriedades de tração, visto que a resistência à

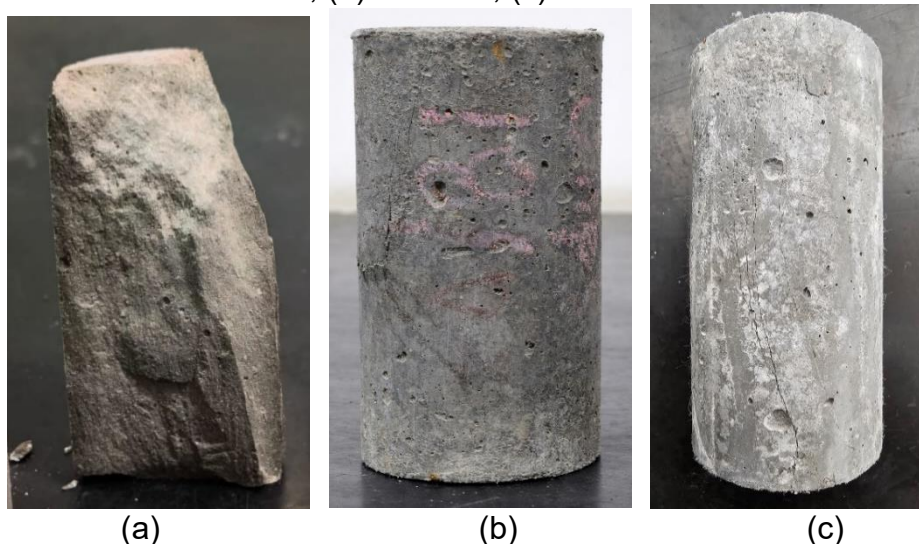
compressão é determinada principalmente pela resistência da matriz. (Gesoglu *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2021). Efeito observado no resultado aos 28 dias, onde a diferença entre as resistências à compressão do UHPC 1 e do UHPC 2 foi menor de 1%.

Após a submissão aos processos de envelhecimento acelerado, observou-se um desempenho consistente do UHPC 1 em ambos os processos, mantendo-se enquadrado na classe UHPC100, conforme a ABNT NBR 17246-1:2025. Entretanto, houve uma queda de 25% e 6,8% da resistência à compressão axial do UHPC 2 após o envelhecimento tipo 1 e tipo 2, respectivamente, sendo desclassificados como concreto de ultra alto desempenho de acordo com a referente norma. Esse comportamento confirma a hipótese de Qian *et al.* (2023), pois a formação de vazios relacionado ao aumento da temperatura ocasiona uma diminuição na resistência à compressão. Efeito com menor influência no UHPC 1 devido à menor quantidade relativa de fibras de polipropileno e mais acentuado no UHPC 2 no envelhecimento tipo 1 pela maior incidência em altas temperaturas.

#### 6.2.2.1 Comportamento na ruptura

Para uma melhor interpretação dos resultados e para evidenciar os distintos comportamentos de ruptura em função da presença das fibras, é apresentado na Figura 16 (a), (b) e (c) os corpos de provas rompidos por compressão axial do UHPC sem fibras, do UHPC 1 e do UHPC 2 aos 28 dias, respectivamente.

Figura 16 – Corpos de prova rompidos por compressão axial aos 28 dias: (a) UHPC sem fibras; (b) UHPC 1; (c) UHPC 2.



Fonte: elaboração própria (2026).

A incorporação de fibras pode restringir o início e a propagação de fissuras verticais no UHPC sob compressão e prevenir o rompimento frágil, melhorando assim o comportamento explosivo na falha (Wang *et al.*, 2016).

É possível confirmar essa teoria analisando os corpos de prova rompidos ilustrados na Figura 16, onde na Figura 16 (a) observa-se uma ruptura tipicamente frágil do corpo de prova de UHPC sem fibras, caracterizada pela formação de planos de cisalhamento bem definidos e destacamento abrupto de fragmentos, com superfície irregular e pouca coesão residual.

Já na Figura 16 (b) e (c) nota-se que o UHPC 1 e o UHPC 2 obtiveram uma ruptura menos abrupta, com presença de fissuras predominantemente verticais e maior integridade global do corpo de prova após o ensaio.

### 6.2.3 Resistência à tração na flexão

A Tabela 7 reúne os resultados da resistência à tração na flexão obtidos para cada um dos 3 corpos de prova selecionados, para as diversas condições de exposição estudada, apresentando também os valores médios correspondentes, os desvios padrão e os coeficientes de variação.

Tabela 7 - Resistência à tração na flexão

|                         | 28 dias |        | E 1    |        | E 2    |        |
|-------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | UHPC 1  | UHPC 2 | UHPC 1 | UHPC 2 | UHPC 1 | UHPC 2 |
| CP1 [MPa]               | 15,11   | 17,76  | 20,19  | 15,61  | 26,11  | 14,99  |
| CP2 [MPa]               | 13,1    | 18,42  | 22,98  | 16,1   | 24,29  | 14,85  |
| CP3 [MPa]               | 14,9    | 19,67  | 22,22  | 15,64  | 21,99  | 15,8   |
| Valor médio [MPa]       | 14,37   | 18,62  | 21,80  | 15,78  | 24,13  | 15,21  |
| Desvio padrão           | 1,10    | 0,97   | 1,44   | 0,27   | 2,06   | 0,51   |
| Coeficiente de variação | 7,69    | 5,21   | 6,62   | 1,74   | 8,56   | 3,37   |

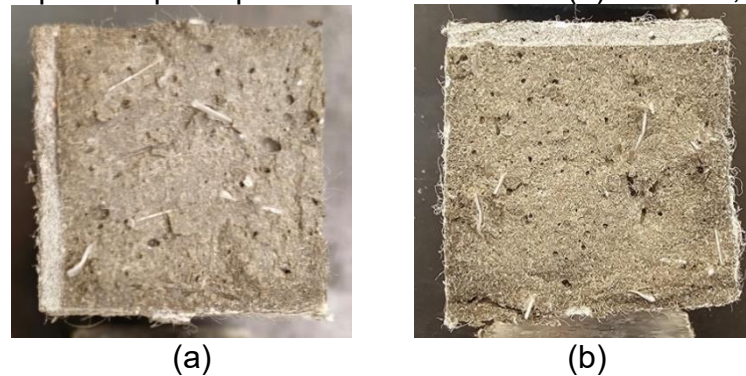
Fonte: elaboração própria (2026).

Os coeficientes de variação da resistência à tração na flexão apresentaram valores menores de 9%, indicando, de modo geral, boa consistência dos resultados experimentais. Observa-se que o traço UHPC 2 apresentou menor dispersão em todas as condições analisadas, em contrapartida, o UHPC 1 apresentou maior variabilidade. Esses resultados sugerem que a composição do UHPC 2 contribui para um comportamento mais homogêneo do material.

Ademais, o comportamento à tração na flexão mostrou-se significativamente dependente das proporções entre os dois tipos de fibras incorporadas no UHPC, nas

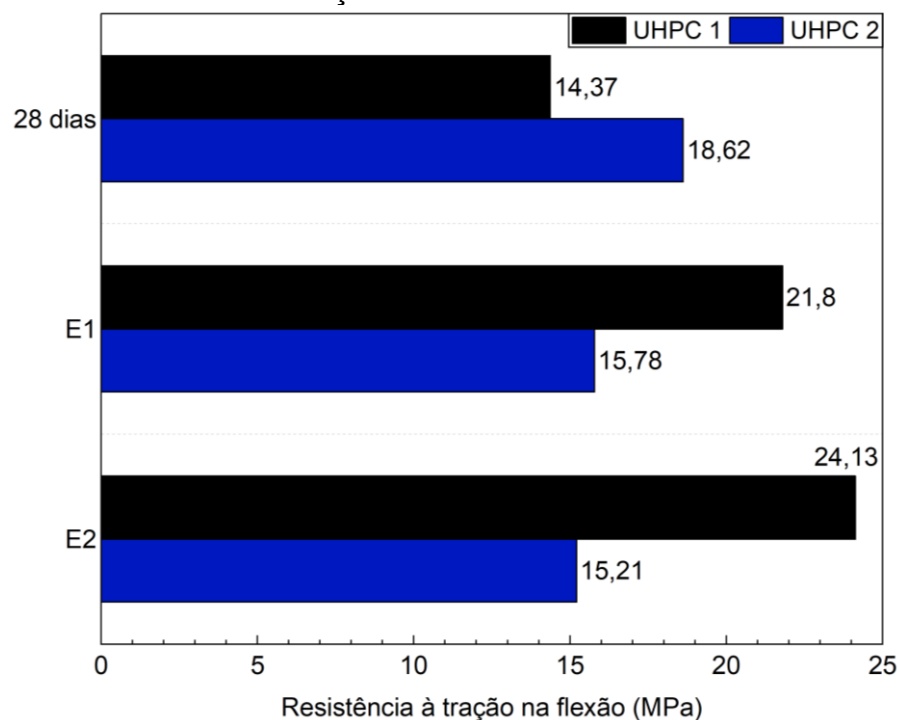
três condições de cura às quais os materiais foram submetidos. Nesse contexto, com o objetivo de compreender os resultados obtidos com a utilização de reforço fibroso no concreto de ultra-alta resistência, procedeu-se à análise visual da uniformidade de distribuição e/ou da eventual ocorrência de segregação das fibras após a realização dos ensaios de flexão com prismas, conforme o item 5.2.1.3 da ABNT NBR 17246-2:2025. A Figura 17 (a) e (b), ilustra os corpos de prova rompidos por flexão do UHPC 1 e UHPC 2, respectivamente. Adicionalmente, os aspectos observados foram correlacionados com os valores médios de resistência à tração na flexão, considerando as diferentes condições analisadas (28 dias, envelhecimento acelerado tipo 1 e tipo 2), conforme apresentados na Figura 18.

Figura 17 - Prisma após a ruptura por flexão aos 28 dias: (a) UHPC 1; (b) UHPC 2.



Fonte: elaboração própria (2026).

Figura 18 - Resistência à tração na flexão do UHPC 1 e do UHPC 2



Fonte: elaboração própria (2026).

Ao analisar a Figura 17 (a) e (b), verifica-se a ausência de segregação das fibras, o que indica uma distribuição homogênea no interior da matriz cimentícia em ambos os traços analisados. Essa uniformidade é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que minimiza a influência de possíveis heterogeneidades na mistura.

Em relação à resistência à tração as fibras possuem atuação significativa por controlarem diretamente a fissuração. Fibras metálicas, por possuírem maior rigidez e diâmetro, atuam principalmente após a fissuração, aumentando a resistência pós-fissuração e a ductilidade ao transferirem tensões entre as faces fissuradas. Já as fibras de polipropileno, mais finas e com menor rigidez, distribuem-se melhor na matriz e são mais eficazes no controle da microfissuração, contribuindo para a resistência à tração ainda nas fases iniciais de carregamento ao dificultar a coalescência de fissuras e contribuir para o incremento da resistência à tração antes da fissuração macroscópica (QUININO, 2015).

Na idade de 28 dias, o UHPC 2 (com maior teor de microfibras de polipropileno) apresentou o melhor desempenho (18,62 MPa) em relação ao UHPC 1 (com maior teor de microfibras de aço), que apresentou um desempenho inferior cerca de 30%. Indicando que, dentro da hipótese de Quinino, o retardamento das macrofissuras a partir do controle das microfissuras pelas fibras de polipropileno foi superior a atuação das fibras de aço na transferência de tensões entre as faces fissuradas, mostrando maior participação das fibras poliméricas no aumento dessa propriedade mecânica aos 28 dias.

Entretanto, com a aplicação dos regimes de envelhecimento acelerado, observa-se uma inversão significativa no comportamento dos traços. O UHPC 1 apresentou aumento expressivo da resistência à tração na flexão após ambos os envelhecimentos, aumentando 51,7% após o primeiro envelhecimento e 68% após o segundo. Em contrapartida o UHPC 2 obteve uma queda de 15% e 18%, nos respectivos envelhecimentos.

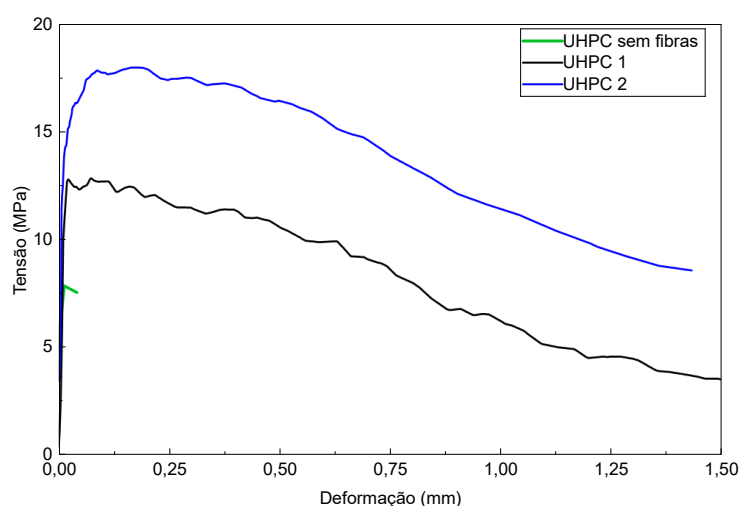
Esse comportamento pode ser justificado pela continuação da hidratação secundária juntamente com a criação de bolhas de ar ocasionadas pelas fibras de polipropileno após a exposição a altas temperaturas, visto que, além desses vazios reduzirem a resistência à compressão do compósito, eles aumentam a porosidade do material (QIAN *et al.*, 2023), tal efeito pode ter sido responsável pela diminuição da

aderência entre as fibras de polipropileno e a matriz cimentícia, levando a um maior arrancamento e queda na sua atuação na resistência à tração na flexão do compósito.

### 6.2.3.1 Comportamento na ruptura

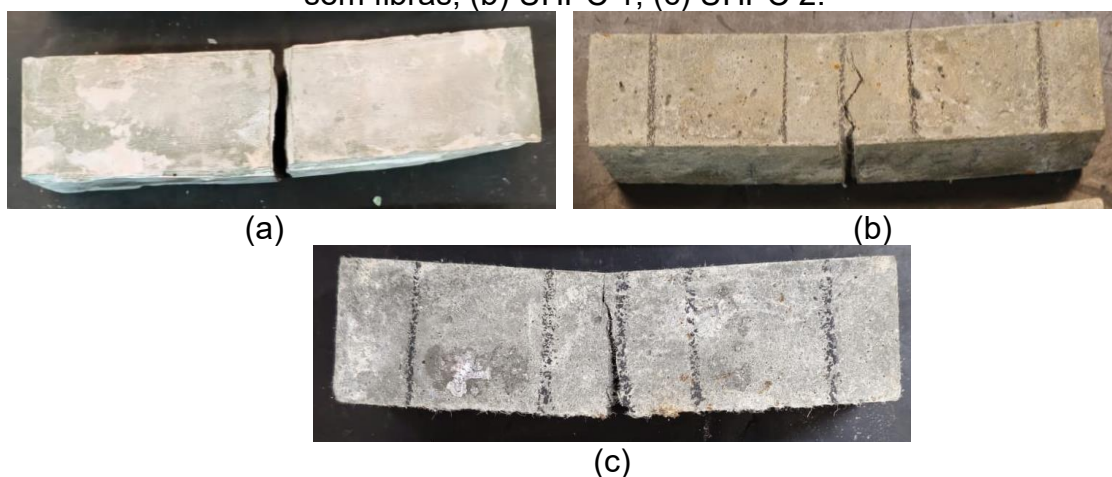
A análise da curva tensão-deformação do ensaio de flexão de 3 pontos juntamente com a avaliação dos corpos de prova rompidos permite averiguar o comportamento pós fissuração do concreto. Posto isso, a Figura 19 demonstra tais curvas e a Figura 20 (a), (b), (c) ilustra os corpos de prova rompidos, para o UHPC sem fibras, o UHPC 1 e o UHPC 2 aos 28 dias.

Figura 19 – Curva tensão-deformação do ensaio de flexão de 3 pontos do UHPC sem fibras, do UHPC 1 e do UHPC 2 aos 28 dias



Fonte: elaboração própria (2026).

Figura 20 - Corpos de prova rompidos por flexão de 3 pontos aos 28 dias: (a) UHPC sem fibras; (b) UHPC 1; (c) UHPC 2.



Fonte: elaboração própria (2026).

Matrizes cimentícias de alta resistência apresentam falha repentina após a primeira fissura. Com isso, as fibras são impostas para retardar a rápida interconexão entre microfissuras iniciais e ativar mecanismos de tenacificação (KRAHL; CARRAZEDO; EL DEBS, 2018). Ambos os comportamentos são verificados na Figura 19, onde é possível observar uma dilatação abrupta do UHPC sem fibras após a primeira fissura e uma queda gradual da resistência simultânea a um aumento de deformação sutil após a fissura principal de ambos UHPC com reforço fibroso. Tal comportamento é confirmado a partir da análise da Figura 20, que ilustra um corpo de prova rompido com descolamento total das partes do prisma (Figura 20 (a)) e corpos de provas que preservaram a integridade após o ensaio (Figura 20 (b) e (c)), evidenciando a influência direta da presença de fibras no comportamento do UHPC na ruptura.

Com o estudo das Figuras 19 e 20 ainda é possível identificar que o teor e tipo das fibras adicionadas no concreto não interferem no modo de ruptura do UHPRFC, confirmando que ambas as fibras ativam mecanismos de tenacificação, como afirmado por KRAHL CARRAZEDO; EL DEBS, 2018. Confirmando que essas características interferem, principalmente, na intensidade desse comportamento e na resistência última de tração na flexão.

#### 6.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 8 reúne os resultados da resistência à tração por compressão diametral obtidos para cada um dos 3 corpos de prova selecionados, para as diversas condições de exposição estudada, apresentando também os valores médios correspondentes, os desvios padrão e os coeficientes de variação.

Tabela 8 - Resistência à tração por compressão diametral

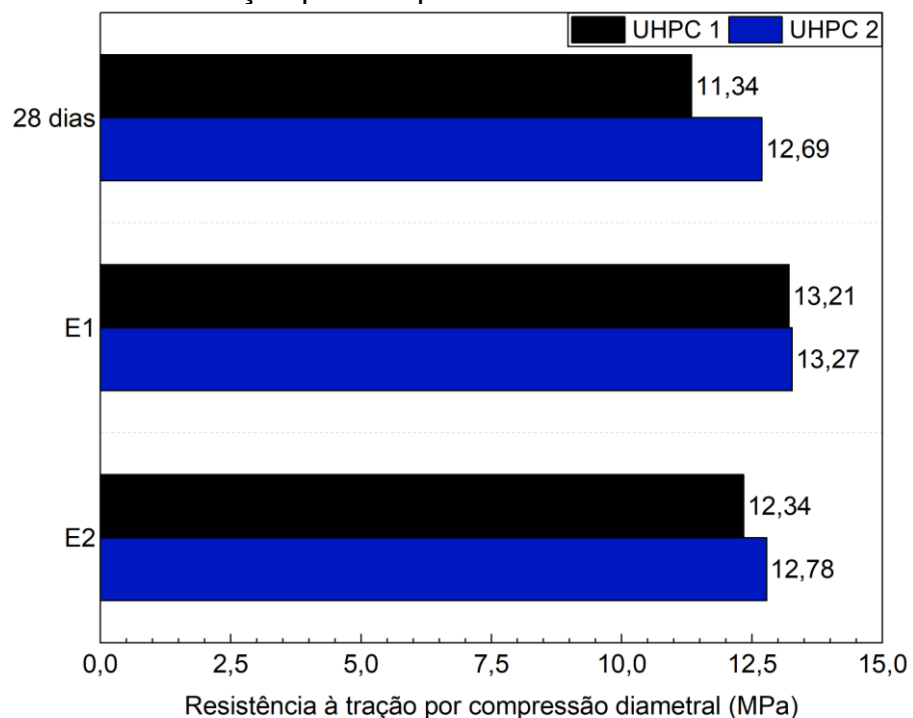
|                         | 28 dias |        | E 1    |        | E 2    |        |
|-------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                         | UHPC 1  | UHPC 2 | UHPC 1 | UHPC 2 | UHPC 1 | UHPC 2 |
| CP1 [MPa]               | 10,99   | 12,56  | 12,91  | 13,2   | 11,78  | 13,36  |
| CP2 [MPa]               | 11,86   | 12,89  | 13,6   | 13,48  | 11,83  | 12,7   |
| CP3 [MPa]               | 11,18   | 12,63  | 13,13  | 13,12  | 13,40  | 12,28  |
| Valor médio [MPa]       | 11,34   | 12,69  | 13,21  | 13,27  | 12,34  | 12,78  |
| Desvio padrão           | 0,46    | 0,17   | 0,35   | 0,19   | 0,92   | 0,54   |
| Coeficiente de variação | 4,03    | 1,37   | 2,67   | 1,42   | 7,47   | 4,26   |

Fonte: elaboração própria (2026).

Os coeficientes de variação da resistência à tração por compressão diametral indicam baixa dispersão dos resultados e boa confiabilidade experimental, uma vez que a maioria dos valores permanecem abaixo de 5, com exceção da variação do UHPC 1 após o envelhecimento tipo 2 (7,47). Em geral, o UHPC 2 apresentou, em todas as condições, menor variabilidade, evidenciando maior uniformidade desse traço. Além disso, os resultados indicam que o envelhecimento acelerado tipo 2 foi o que mais influenciou negativamente a uniformidade dos resultados, para ambos os traços.

A Figura 21 apresenta os resultados médios de resistência à tração obtidos por compressão diametral para ambos os traços de UHPC reforçado com fibras, aos 28 dias e sob ambas as condições de envelhecimento.

Figura 21 - Resistência à tração por compressão diametral do UHPC 1 e UHPC 2



Fonte: elaboração própria (2026).

Estudos indicam que o ensaio de tração por compressão diametral não é o mais adequado para avaliar a resistência à tração do UHPC reforçado com fibras. De acordo com Olesen *et al.*, 2006, na configuração padrão, esse ensaio não pode ser usado para obter a resistência à tração do concreto reforçado com fibras, devido à ductilidade do material. Além disso, Suchorzewsk *et al.*, 2018, afirma que os ensaios de tração por compressão diametral são ensaios para a determinação da resistência

à tração de materiais frágeis, devido à simplicidade do carregamento compressivo e do formato do corpo de prova.

Mesmo assim, sabendo que a indução de um estado de tensões de tração pela aplicação de compressão diametral faz com que o corpo de prova falhe por fendilhamento (ROCCO *et al.*, 2001) e que as fibras aumentam a resistência à tração ao controlar a fissuração (QUININO, 2015). Torna-se possível associar a baixa, porém presente, influência das fibras no resultado desse ensaio.

As fibras metálicas atuam principalmente após a fissura, elevando a ductilidade e a resistência pós-fissuração, enquanto as fibras de polipropileno controlam a microfissuração desde o início, contribuindo para a resistência antes da formação de fissuras visíveis (QUININO, 2015).

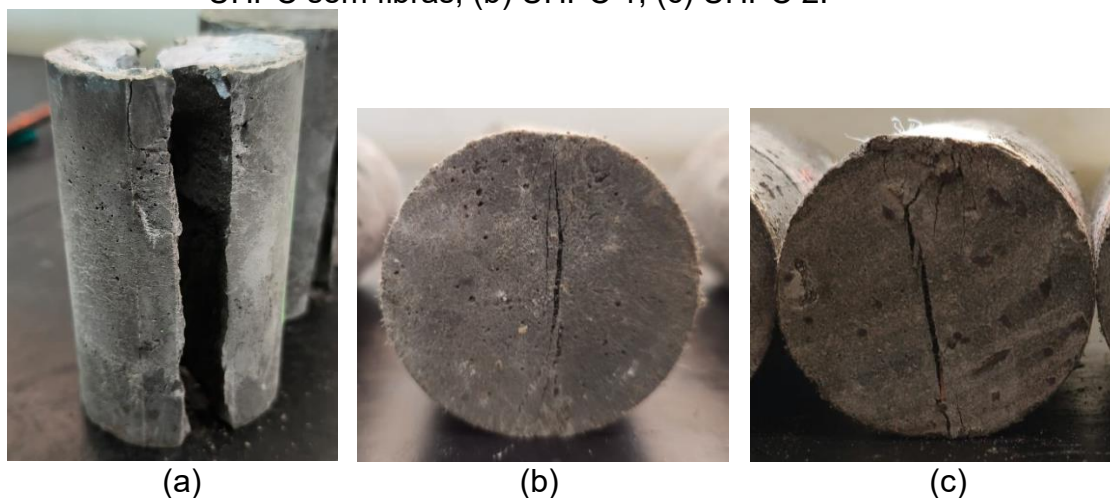
Posto isso, como esse ensaio foi interrompido assim que houve a ruptura do corpo de prova, não foi possível registrar o comportamento pós fissuração, tornando menos pronunciado a atuação das fibras de aço, justificando assim, o ligeiro aumento de resistência do UHPC 2 em todas as condições de exposição, já que possuía maior quantidade relativa de fibras de polipropileno e menor de fibras de aço.

Além disso, a Figura 21 mostra que ambos os envelhecimentos favoreceram ligeiramente para um ganho de resistência em relação aos 28 dias, tanto para o UHPC 1 quanto para o UHPC 2, com destaque na aplicação do envelhecimento tipo 1, possivelmente associado à maior exposição em água em altas temperaturas, que promove a continuação secundária da hidratação do cimento e redução da retração do compósito.

#### 6.2.4.1 Comportamento na ruptura

O comportamento dúctil pós-fissuração do concreto UHPC reforçado com fibras pode ser identificado através do monitoramento da deformação transversal perpendicular à direção da carga durante o ensaio de tração por compressão diametral. A Figura 22 (a), (b), (c) ilustra os corpos de prova após o ensaio de tração por compressão diametral do UHPC sem fibras, do UHPC 1 e UHPC 2 aos 28 dias, respectivamente.

Figura 22 - Corpos de prova rompidos por compressão diametral aos 28 dias: (a) UHPC sem fibras; (b) UHPC 1; (c) UHPC 2.



Fonte: elaboração própria (2026).

De forma análoga ao observado no comportamento na ruptura do ensaio de tração na flexão, o comportamento na ruptura do ensaio de tração por compressão diametral foi frágil e abrupto para o UHPC sem fibras e dúctil para os UHPC com reforço fibroso (UHPC 1 e UHPC 2). Sendo possível identificar na Figura 22 (a) o destacamento completo das partes do corpo de prova no plano de tensões de tração, enquanto na Figura 22 (b) e (c) identifica-se o plano de tensões através de fissuras sustentadas pela interconexão das fibras, ilustrando a integridade do corpo de prova após a realização do referente ensaio.

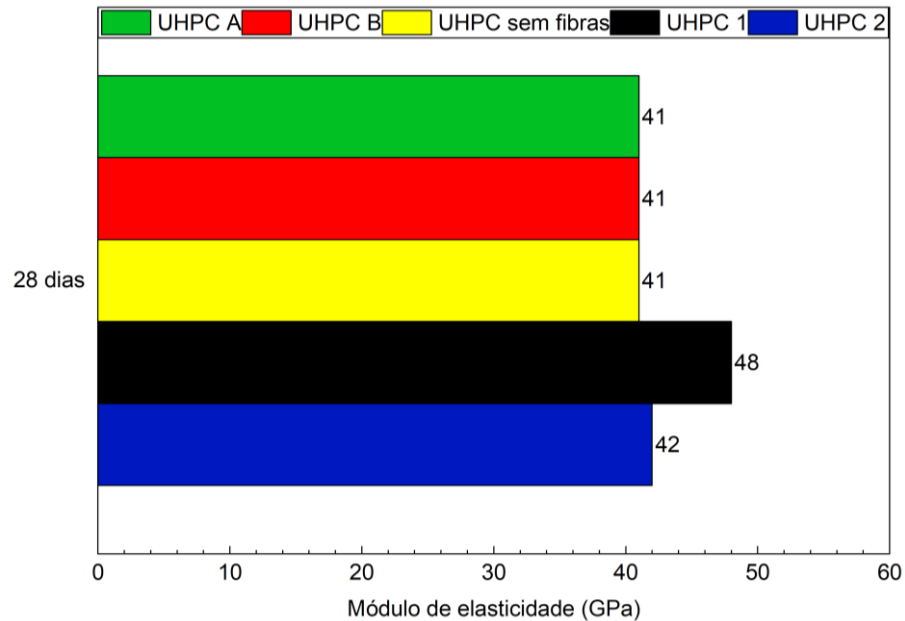
### 6.3 ANÁLISE DE VALORES TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS AOS 28 DIAS

Para uma análise mais abrangente dos resultados obtidos, procedeu-se à comparação entre os valores experimentais das propriedades mecânicas, determinados nos ensaios de caracterização do UHPC 1, UHPC 2 e UHPC sem fibras, e os valores teóricos obtidos na revisão da literatura. Para uma análise mais específica, realizou-se essa comparação com UHPC reforçado apenas com fibras de aço (UHPC A) e com UHPC reforçado apenas com fibras de polipropileno (UHPC B), considerado uma proporção de fibras mais próxima da utilizada experimentalmente, de 1,5%.

### 6.3.1 Módulo de elasticidade

A Figura 23 demonstra os valores de módulo de elasticidade teóricos e experimentais.

Figura 23 - Módulo de elasticidade, valores teóricos e experimentais



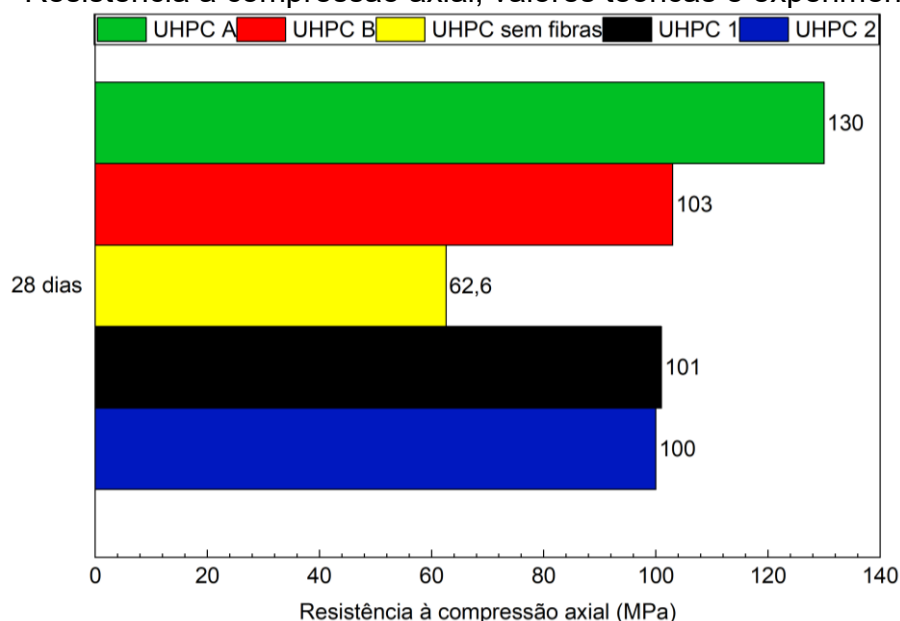
Fonte: elaboração própria (2026).

A análise dos resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias evidencia a baixíssima influência da integração de fibras no UHPC em relação a rigidez do material, visto que o UHPC A, o UHPC B e o UHPC sem fibras obtiveram o mesmo valor de módulo de elasticidade e o UHPC 2 obteve um incremento de apenas 2%. Destacando-se apenas o UHPC 1 que obteve um aumento de 17% em relação aos valores teóricos e 14% em relação ao UHPC 2. Demonstrando que esse traço gerou um compósito mais rígido.

### 6.3.2 Resistência à compressão axial

As resistências à compressão axial teóricas, valores médios retirados dos artigos coletados na Tabela 1 e Tabela 2, e experimentais estão apresentadas na Figura 24.

Figura 24 - Resistência à compressão axial, valores teóricos e experimentais



Fonte: elaboração própria (2026).

A análise dos resultados apresentados na Figura 24 indica que a incorporação de microfibras promove um aumento significativo na resistência à compressão do UHPC, uma vez que todos os traços com reforço fibroso obtiveram ganhos superiores à 60% em relação ao UHPC sem fibras. Entretanto, ressalta-se que o coeficiente de variação desse ensaio foi cerca de 15, valor superior aos outros ensaios experimentais realizados nesse estudo, indicando uma confiabilidade menor desse resultado em relação aos outros.

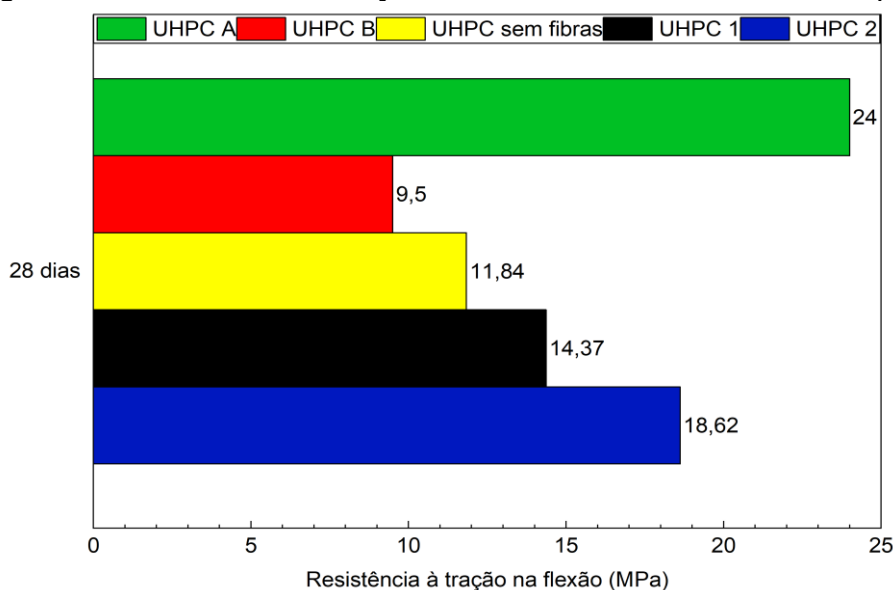
Além disso, ao se considerar os intervalos de resistência à compressão axial reportados na literatura, observa-se que o UHPC 1 e UHPC 2 apresentam valores ligeiramente inferior aos valores médios identificados nos estudos de referência. Ainda assim, ambos os traços se mantêm dentro do comportamento esperado para UHPC com incorporação de microfibras, já que essa queda pode ser justificada pela diminuição do fator de forma das fibras de aço, em relação as fibras utilizadas na literatura.

Essa coerência com a literatura indica que a combinação de fibras de aço, preparadas manualmente, e de polipropileno não compromete o desempenho global do material, mantendo níveis adequados de resistência. Adicionalmente, os resultados obtidos posicionam os traços híbridos em um patamar intermediário.

### 6.3.3 Resistência à tração na flexão

A Figura 25 mostra os resultados de resistência à tração na flexão de três pontos, incluindo os valores teóricos retirados das Tabelas 1 e 2 e os experimentais.

Figura 25 - Resistência à tração na flexão, valores teóricos e experimentais



Fonte: elaboração própria (2026).

Os resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias evidenciam a influência da incorporação de fibras no comportamento mecânico do UHPC, bem como o efeito do tipo e da proporção das fibras utilizadas. Observa-se que o UHPC B apresentou o menor desempenho (9,5 MPa), inclusive inferior ao UHPC sem reforço fibroso (11,84 MPa), indicando que a adição exclusiva de fibras de polipropileno, nessa configuração, não foi suficiente para promover ganhos mecânicos significativos.

Por outro lado, os traços contendo fibras de aço, tanto isoladamente quanto em combinação com fibras de polipropileno, apresentaram desempenho superior, evidenciando ganhos relevantes na resistência à flexão. Esse comportamento está associado ao efeito de ponte de fissuras proporcionado pelas fibras, que atuam na transferência de tensões após a fissuração da matriz cimentícia, retardando a propagação das fissuras, incluindo a fissura principal de flexão, e aumentando a capacidade de absorção de energia do material.

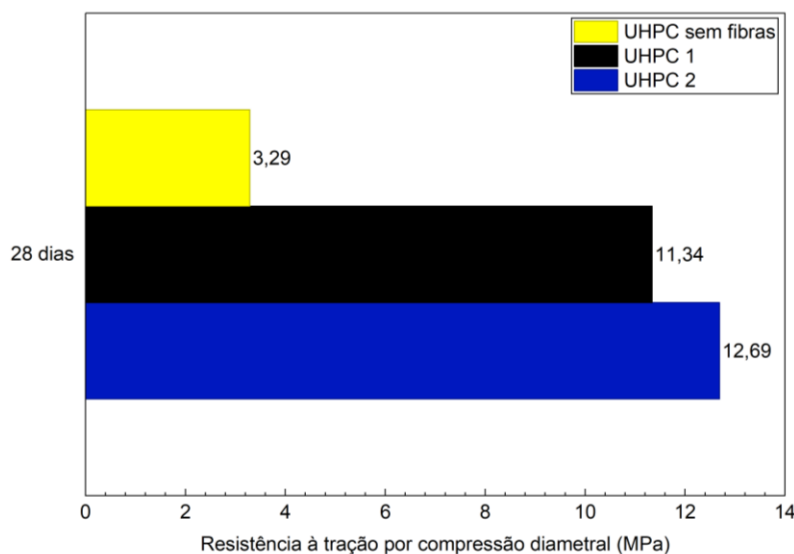
Ao comparar o resultado do UHPC 1 e UHPC 2 com o UHPC A e o UHPC B, verifica-se que os valores obtidos são superiores aos do UHPC reforçado exclusivamente com fibras de polipropileno, porém inferiores aos alcançados por

composições com fibras exclusivamente de aço, o que pode ser explicado pelo fato dos resultados apresentados na literatura serem feitos com microfibras de aço com um fator de forma de aproximadamente de 65, enquanto as microfibras de aço usadas na mistura foram uma adaptação nacional, cujo fator de forma foi de 27,27. Como o fator de forma das microfibras foi inferior, gerou uma redução da resistência em comparação aos estudos da literatura. Dessa forma, os resultados observados mantêm-se coerentes com o comportamento reportado na literatura, indicando que o desempenho dos compósitos híbridos se posiciona de forma intermediária.

#### 6.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 26 mostra os resultados de resistência à tração por compressão diametral experimentais aos 28 dias.

Figura 26 - Resistências à tração por compressão diametral, valores experimentais



Fonte: elaboração própria (2026).

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral evidenciam ganhos significativos com a adição de fibras no UHPC. O UHPC 1 apresentou resistência de 11,34 MPa, enquanto o UHPC 2 atingiu 12,69 MPa, em contraste com o concreto sem fibras, que apresentou apenas 3,29 MPa. Esses valores correspondem a incrementos superiores a 240%, evidenciando a elevada eficiência do reforço fibroso em solicitações trativas, devido, principalmente, ao seu papel de redistribuição de tensões e retardação da propagação de microfissuras.

## 7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos confirmaram a melhora das propriedades mecânicas do UHPC com a implementação de fibras, evidenciando aumento na rigidez, na resistência à compressão axial, na resistência à tração na flexão e na resistência à tração por compressão diametral. Adicionalmente, os resultados demonstraram que a proporção entre microfibras de aço e de polipropileno influencia diretamente o desempenho mecânico do UHPC, tanto aos 28 dias quanto após o envelhecimento acelerado. De modo geral, verificou-se que o traço com maior teor de microfibras de aço (UHPC 1) apresentou maior estabilidade mecânica e melhor desempenho global frente às condições de envelhecimento, enquanto o traço com proporções equilibradas de fibras (UHPC 2) apresentou melhor performance aos 28 dias, porém evidenciou reduções significativas ao longo do tempo, especialmente na resistência à compressão e à tração na flexão. Portanto, no que se refere ao comportamento em longo prazo, avaliado por meio dos ensaios de envelhecimento acelerado, verificou-se que o desempenho do UHPC está diretamente condicionado ao tipo e à proporção de fibras empregadas.

Além disso, a coerência entre os resultados experimentais e teóricos, aliada à baixa variabilidade observada, reforça a confiabilidade da metodologia adotada, destacando assim, que a adaptação do procedimento de envelhecimento acelerado, baseada na ABNT NBR 15498:2021, mostrou-se adequada para a avaliação do UHPC, permitindo simular de forma consistente diferentes condições de exposição e evidenciar seus efeitos nas propriedades mecânicas. Ademais, os resultados obtidos indicam a viabilidade do uso de fibras nacionais na produção de UHPC, uma vez que as misturas analisadas apresentaram desempenho mecânico satisfatório e comportamento compatível com o da norma ABNT NBR 17246:2025.

## REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2018. Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215:2025. Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222:2011. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-1:2021. Concreto — Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279:2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15498:2021. Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15530:2019. Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17246-1:2025. Concreto de ultra alto desempenho — Parte 1: Classificação, requisitos e controle. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17246-2:2025. Concreto de ultra alto desempenho — Parte 2: Preparo, controle e recebimento do concreto no estado fresco. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17246-3:2025. Concreto de ultra alto desempenho — Parte 3: Propriedades do concreto endurecido. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17246-4:2025. Concreto de ultra alto desempenho — Parte 4: Execução e controle de estruturas. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. Concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras: recomendações. Paris: AFGC, 2002.

AREL, H. S. Effects of curing type, silica fume fineness, and fibre length on the mechanical properties and impact resistance of UHPFRC. *Results in Physics*, v. 6, p. 664–674, 2016.

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

FENG, Y.; ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, J.; LIU, Z. 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, p. 106035, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106035>

FANG, H.; GU, M.; ZHANG, S.; JIANG, H.; FANG, Z.; HU, J. Effects of steel fiber and specimen geometric dimensions on the mechanical properties of ultra-high-performance concrete. *Materials*, v. 15, n. 9, p. 3027, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15093027>

GRAYBEAL, B. A. Material property characterization of ultra-high performance concrete. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2006.

HE, J.; LI, P.; WANG, Y.; ZHANG, L.; LIU, X. The mechanical properties and damage evolution of UHPC reinforced with glass fibers and high-performance polypropylene fibers. *Materials*, v. 14, p. 2455, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14092455>

KAMJOU, M.; KHALOO, A.; HASSANPOUR, M. Experimental and numerical investigation of minimum required fiber content in bending characteristics of 100 MPa UHPC-formulated concrete. *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, p. e01066, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01066>

KRAHL, P. A.; CARRAZEDO, R.; EL DEBS, A. L. H. C. Cyclic behavior of UHPFRC under compression. *Cement and Concrete Composites*, v. 104, p. 103363, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103363>

KRAHL, P. A.; CARRAZEDO, R.; EL DEBS, A. L. H. C. Mechanical damage evolution in UHPFRC: experimental and numerical investigation. *Engineering Structures*, v. 170, p. 63–77, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.064>

LI, S.; JENSEN, O. M.; YU, Q. Influence of steel fiber content on the rate-dependent flexural performance of ultra-high performance concrete with coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 318, p. 125935, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125935>

LIN, Y.; ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, J.; LIU, Z. Coarse synthetic fibers (PP and POM) as a replacement to steel fibers in UHPC: tensile behavior, environmental and economic assessment. *Construction and Building Materials*, v. 412, p. 134654, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134654>

LIU, J.; LIU, J.; WANG, Z.; LI, Z. Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): influence of steel fiber on mechanical properties. *Cement and Concrete Composites*, v. 112, p. 103670, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103670>

LIU, J.; LIU, J.; WANG, Z.; LI, Z. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: effects of steel fiber and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, v. 112, 2020.

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

MARCHAND, P.; AÏTCIN, P.-C.; LAFORGE, F.; RICHARD, P. Bond behaviour of reinforcing bars in UHPFRC. *Materials and Structures*, v. 49, n. 5, p. 1979–1995, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0628-0>

OLESEN, J. F.; ØSTERGAARD, L.; STANG, H. Nonlinear fracture mechanics and plasticity of the split cylinder test. *Materials and Structures*, v. 39, p. 421–432, 2006.

PEI, Y.; ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, J.; LIU, Z. 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, p. 122489, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122489>

PERRY, V. H.; CORVEZ, M. An innovative technology for accelerated bridge construction – the owner designer dilemma. *Proceedings of the First International Interactive Symposium on UHPC*, 2016, p. 1–8.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. Investigação experimental das propriedades mecânicas de compostos de concreto com adições híbridas de fibras. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ROCCO, C.; GUINEA, G. V.; PLANAS, J.; ELICES, M. Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 74–82, 2001.

RUSSELL, H. G.; GRAYBEAL, B. A. Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report for the bridge community. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2013.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z. Pullout and flexural performance of silane groups and hydrophilic groups grafted polypropylene fibre reinforced UHPC. *Construction and Building Materials*, v. 277, p. 122335, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122335>

SILVA, Mariana Lage da; PRADO, Lisiane Pereira; FÉLIX, Emerson Felipe; SOUSA, Alex Micael Dantas de; AQUINO, Davi Peretta. The influence of materials on the mechanical properties of ultra-high-performance concrete (UHPC): a literature

review. 2024. Artigo científico – São Paulo State University (UNESP), Guaratinguetá, 2024.

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, p. 032059, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/3/032059>

SOLIMAN, Amr Ashraf; HEARD, William F.; WILLIAMS, Brett A.; RANADE, Ravi. Effects of the tensile properties of UHPC on the bond behavior. Construction and Building Materials, v. 392, p. 131990, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131990>

SUCHORZEWSKI, J. *et al.* Meso-scale analyses of size effect in brittle materials using DEM. Materials and Structures, v. 51, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1617/s10035-018-0862-6>

WANG, Y.; LI, X.; ZHANG, Y.; CHEN, J.; LIU, Y. Compressive behavior of FRP-confined ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). Composite Structures, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116879>

WANG, Y.; ZHANG, Y.; LI, X.; LIU, Z.; CHEN, J. Cyclic tensile behavior of ultra-high performance concrete with hybrid steel–polypropylene fiber: experimental study and analytical model. Composite Structures, v. 321, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117255>

WEI, Y.; ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, J.; LIU, Z. Behaviour of hybrid polypropylene and steel fibre reinforced ultra-high performance concrete beams against single and repeated impact loading. Structures, v. 55, p. 324–337, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.036>

WU, Z.; SHI, C.; HE, W.; WU, L. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. Construction and Building Materials, v. 103, p. 8–14, 2016.

WU, Z.; KHAYAT, K. H.; SHI, C. Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content. Cement and Concrete Research, v. 123, p. 105786, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105786>

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K. H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: influence of steel fiber content and shape. Composites Part B: Engineering, v. 174, p. 107021, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107021>

YOO, D. Y.; BAN, J. Y.; KIM, S. W.; YANG, J. M. Pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. Cement and Concrete Composites, v. 49, p. 1–10, 2014.

YOO, D. Y.; SHIN, H. O.; YANG, J. M.; YOON, Y. S. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. *Composites Part B: Engineering*, v. 58, p. 122–133, 2014.

YOO, D. Y.; YANG, J. M. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*, v. 200, p. 375–388, 2018.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*, v. 56, p. 29–39, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>

ZHANG, Y.; LI, H.; WANG, J.; ZHOU, X.; CHEN, Z. Stress-strain models for ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) under triaxial compression. *Construction and Building Materials*, v. 370, p. 130658, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130658>

ZHANG, X.; ZHAO, S.; LIU, Z.; WANG, F. Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness. *Construction and Building Materials*, v. 214, p. 28–36, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.106>