

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

**Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho - Campus de Ilha Solteira -
SP**

VICTOR HUGO COUTO XAVIER

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO
DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS COM SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS
POR CINZA DE CASCA DE ARROZ E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

Ilha Solteira

2026



VICTOR HUGO COUTO XAVIER

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO
DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS COM SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS
POR CINZA DE CASCA DE ARROZ E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de Ilha Solteira - SP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Materiais de
Construção Civil

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

Ilha Solteira

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- X3c Xavier, Victor Hugo Couto.
Caracterização mecânica de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (UHPC) com substituições parciais por cinza de casca de arroz e resíduos de construção e demolição (RCD) / Victor Hugo Couto Xavier. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
160 f. il.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia Civil - Materiais de Construção Civil, 2026
- Orientador: Lisiane Pereira Prado
- Inclui bibliografia
1. Concreto de ultra-alto desempenho (UHPC). 2. Fibras de vidro. 3. Fibras de aço. 4. Cinzas de casca de arroz. 5. Resíduos de construção e demolição. 6. Materiais alternativos de construção.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto potencial desta pesquisa está diretamente relacionado ao avanço científico e tecnológico na área de materiais de construção de alto desempenho, com ênfase no desenvolvimento de concretos ultra-alto desempenho (UHPC) incorporando materiais alternativos, como resíduos da construção e demolição (RCD). Do ponto de vista científico, o estudo contribui para a ampliação do conhecimento sobre o comportamento mecânico e a durabilidade destes compósitos, especialmente no que se refere à atuação de fibras na mitigação da propagação de fissuras e na incorporação de materiais alternativos de construção, como no caso das adições minerais de cinzas de casca de arroz e resíduos de construção e demolição. Sob a perspectiva técnica e inovadora, a pesquisa propõe soluções que podem viabilizar a produção de materiais com elevado desempenho estrutural aliados à redução do consumo de recursos naturais, promovendo maior eficiência no setor da construção civil. No âmbito ambiental e sustentável, destaca-se o potencial de reaproveitamento de resíduos, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis. Adicionalmente, os resultados obtidos podem favorecer a aplicação prática desses materiais em escala local, regional e nacional, impulsionando a inovação no setor e incentivando a economia circular, como o desenvolvimento de um material mais sustentável. A pesquisa também apresenta relevância educacional e acadêmica, ao formar recursos humanos qualificados e fomentar o desenvolvimento contínuo da engenharia de materiais e da construção civil.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The potential impact of this research is directly associated with scientific and technological advancements in the field of high-performance construction materials, with emphasis on the development of ultra-high-performance concrete (UHPC) incorporating alternative materials, such as construction and demolition waste (CDW). From a scientific perspective, this study contributes to the expansion of knowledge regarding the mechanical behavior and durability of these composites, particularly concerning the role of fibers in mitigating crack propagation and the incorporation of alternative construction materials, such as rice husk ash mineral additions

and construction and demolition waste. From a technical and innovative standpoint, the research proposes solutions that may enable the production of materials with high structural performance while simultaneously reducing the consumption of natural resources, thereby promoting greater efficiency within the construction sector. In terms of environmental sustainability, the study highlights the potential for waste reutilization, contributing to the reduction of environmental impacts and fostering the development of more sustainable practices. Additionally, the obtained results may support the practical application of these materials at local, regional, and national scales, promoting innovation within the sector and encouraging the circular economy through the development of more sustainable materials. The research also presents educational and academic relevance by contributing to the training of highly qualified professionals and fostering the continuous advancement of materials engineering and civil construction engineering.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Caracterização mecânica de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras com substituições parciais por cinza de casca de arroz e resíduos de construção e demolição**

AUTOR: VICTOR HUGO COUTO XAVIER

ORIENTADORA: LISIANE PEREIRA PRADO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. LISIANE PEREIRA PRADO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Civil / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Prof. Dr. RICARDO LAGUARDIA JUSTEN DE ALMEIDA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Prof. Dr. EMERSON FELIPE FELIX (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / UNESP / Câmpus de Guaratinguetá - FEG

Ilha Solteira, 22 de abril de 2026.

Dedico este presente trabalho a todos os pesquisadores que pavimentaram o caminho antes de mim, tornando possível a sua realização. Dedico também aos cientistas brasileiros que, diariamente, contribuem para o desenvolvimento do nosso país.

“Se vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.” — Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à minha mãe, Ivanir dos Reis Couto, pelo incentivo à minha educação e pelo apoio ao meu interesse pela área acadêmica, aos meus amigos e colegas cientistas Paulo Roberto da Silva, Bruna Latorre da Silva e Nicole Arnoni Cavalcante, pelo incentivo e pela força nos momentos em que mais precisei e duvidei de mim mesmo.

À minha orientadora, professora doutora Lisiane Pereira Prado, e ao professor doutor Alex Micael Dantas de Sousa, pelas valiosas orientações ao longo do desenvolvimento deste presente trabalho. Agradeço imensamente à minha equipe de laboratório de UHPC da Unesp, a qual contribuiu para o andamento da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio da concessão de bolsa de pesquisa (Processo 131527/2024-0).

“As universidades serão o que são suas bibliotecas”

(Gelfand, 1968, p. 19, tradução nossa).

RESUMO

O concreto de ultra-alto desempenho com fibras (UHPC) destaca-se por uma excepcional propriedade mecânica e alta ductilidade. A adição de fibras auxilia na resistência à tração, o que permite o uso no projeto de elementos estruturais sujeitos à flexão. O uso de cinza de casca de arroz (CCA) e pó de resíduo de construção e demolição (RCD) como adições minerais na mistura de UHPC oferece vantagens significativas em termos de impacto ambiental e propriedades mecânicas. Este presente trabalho investiga experimentalmente o efeito da CCA e do RCD como substituição parcial das adições minerais existentes na mistura de UHPC reforçado com fibras, tal como estudar a influência da macrofibra e microfibra de aço e microfibra de vidro em relação à fração fina, ou seja, resistência à tração na flexão de três pontos, compressão axial, tração por compressão diametral e retração. Os resultados das resistências à tração indireta, módulo de elasticidade, tração na flexão e retração mostraram-se compatíveis com os existentes na literatura, enquanto a resistência de compressão axial mostrou-se inferior, devido a redução da densidade da matriz em consequência da incorporação de CCA e RCD e da distribuição não homogênea das tensões, fibras de aço mostraram melhores performances mediante aos esforços em substituição a microsilica e a substituição do pó de quartzo pela fração fina do RCD foram os que obtiveram os melhores desempenho mecânico. O teor de 20% de CCA com microfibra de aço foi a mistura que obteve menor redução da retração no UHPC, ou seja, 50% menor que a mistura de referência com fibra de aço sem substituição de adições minerais. A concentração de 50 % de RCD mostra-se a melhor concentração de adições minerais que aprimoram a caracterização mecânica do UHPC.

Palavras-chave: concreto de ultra-alto desempenho; UHPC; fibras; fibras de vidro; fibras de aço; cinzas de casca de arroz; CCA; resíduos de construção e demolição; materiais alternativos de construção; estruturas.

ABSTRACT

Fiber-reinforced ultra-high-performance concrete (UHPC) is distinguished by its exceptional mechanical properties and high ductility. The incorporation of fibers enhances tensile strength, thereby enabling its application in the design of structural elements subjected to flexural loading. The use of rice husk ash (RHA) and construction and demolition waste powder (CDW) as mineral additions in UHPC mixtures offers significant advantages in terms of environmental impact and mechanical performance. The present study experimentally investigates the effect of RHA and CDW as partial replacements for conventional mineral additions in fiber-reinforced UHPC mixtures, as well as the influence of steel macrofibers, steel microfibers, and glass microfibers on the fine fraction properties, namely three-point flexural tensile strength, axial compressive strength, splitting tensile strength, and shrinkage. The results for indirect tensile strength, modulus of elasticity, flexural tensile strength, and shrinkage were consistent with those reported in the literature, whereas the axial compressive strength was lower due to the reduction in matrix density caused by the incorporation of RHA and CDW, as well as the non-uniform stress distribution. Steel fibers exhibited superior performance under loading conditions, while the replacement of silica fume and the substitution of quartz powder with the fine fraction of CDW resulted in the best mechanical performance. The mixture containing 20% RHA and steel microfibers exhibited the greatest reduction in UHPC shrinkage, corresponding to a value 50% lower than that of the reference mixture reinforced with steel fibers without mineral addition replacement. A CDW content of 50% proved to be the optimal concentration of mineral additions for enhancing the mechanical characterization of UHPC.

Keywords: ultra-high-performance concrete; UHPC; fibers; glass fibers; steel fibers; rice husk ash; RHA; construction and demolition waste; CDW; alternative construction materials; structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esforço normal em corpo de prova cilíndrico: esquema	28
Figura 2 - Resposta de diferentes concretos quando solicitados à tensão de tração uniaxial...	30
Figura 3 - Fibras de aço contribuindo para a ductilidade do UHPC	33
Figura 4 - Imagem microscópica das primeiras horas de formação do C-S-H na Alita	38
Figura 5 - Imagens microscópicas do C-S-H com cristais de Portlandita	39
Figura 6 - Mapa bibliométrico sobre UHPC com fibras de aço e vidro	46
Figura 7 - Características mecânicas médias do UHPC com fibras de aço e vidro, em relação aos teores estudados	50
Figura 8 - Tipos de fibras no UHPC	53
Figura 9 - Amostras dos materiais constituintes do UHPC	54
Figura 10 - Fluxograma das etapas de análise da pesquisa	55
Figura 11 - Modelo do ensaio de compressão axial com o <i>clipgage</i> acoplado	56
Figura 12 - Esquema de carregamento e entalhe em um prisma para ensaio de flexão por 3 pontos	58
Figura 13 - Ensaio de flexão de 3 pontos com o sensor aplicado.....	59
Figura 14 - Amostras de UHPC e equipamento para ensaio de retração.....	60
Figura 15 - Ensaio de espalhamento do UHPC	65

Figura 16 - Amostras cilíndricas de concreto de ultra-alto desempenho.....	66
Figura 17 - Resultados da análise cristalográfica por difração de raios X (DRX) dos materiais cimentantes: (a) Cinza de casca de arroz; (b) Microsilica; (c) Cimento; (d) Pó de quartzo. ..	71
Figura 18 - Resultados da análise cristalográfica por difração de raios X (DRX) dos materiais cimentantes	74
Figura 19 - Amostras cilíndricas de UHPC com microfibras de aço aos 28 dias de idade.....	77
Figura 20 - Corpos de prova de UHPC com microfibras de vidro aos 28 dias.....	78
Figura 21 - Resistência à compressão média e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC com diferentes tipos de fibras	80
Figura 22 - Resistência média à compressão axial e módulo de elasticidade do UHPC reforçado com fibras de aço e CCA aos 28 dias	84
Figura 23 - Resistência média à compressão axial e módulo de elasticidade do UHPC reforçado com fibras de aço e RCD aos 28 dias	88
Figura 24 - Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade do UHPC reforçado com fibras de vidro e CCA.....	92
Figura 25 - Resistência à compressão axial do UHPC reforçado com fibras de vidro e RCD.	95
Figura 26 - Curvas tensão vs deformação do UHPC	98
Figura 27 - Amostras de UHPC com microfibras de aço aos 28 dias submetidas à compressão diametral	101
Figura 28 - Amostras de UHPC com microfibras de vidro aos 28 dias submetidas à compressão diametral	102
Figura 29 - Resistência à tração indireta do UHPC com 2% de fibra aos 28 dias	103

Figura 30 - Resistência à tração indireta do UHPC com 2% de fibras de aço ou vidro aos 28 dias – Traços com CCA	106
Figura 31 - Resistência à compressão diametral do UHPC com 2% de fibras de aço ou vidro aos 28 dias – Traços com RCD.....	110
Figura 32 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos na idade de 28 dias – traço referência	114
Figura 33 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos na idade de 28 dias – 2% de teor de fibras	115
Figura 34 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos do UHPC com fibras de aço e vidro na idade de 28 dias – adição de cinzas de casca de arroz.....	118
Figura 35 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos do UHPC com fibras de aço e vidro na idade de 28 dias – adição de resíduos de construção e demolição	122
Figura 36 - Diagrama de força <i>versus</i> deslocamento do UHPC com adições minerais de CCA e RCD	125
Figura 37 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de fibras	131
Figura 38 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibras de aço e cinza de casca de arroz (CCA)	133
Figura 39 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibras de aço e resíduos de construção e demolição (RCD).....	136
Figura 40 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibras de vidro e cinza de casca de arroz (CCA).....	138
Figura 41 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibras de vidro e resíduo de construção e demolição (RCD).....	141

Figura 42 - Resistência à compressão axial aos 28 dias para o UHPC com 2% de fibras de aço e 2% de fibras de vidro 145

Figura 43 - Módulo de elasticidade aos 28 dias para o UHPC com 2% de fibras de aço e 2% de fibras de vidro..... 146

Figura 44 - Tração na flexão aos 28 dias para o UHPC com 2% de fibras de aço e 2% de fibras de vidro 147

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características mecânicas do concreto convencional (CC) e do concreto de ultra-alto desempenho (UHPC).....	35
Quadro 2 - Tipos de retração do concreto e algumas características principais.....	36
Quadro 3 - Tipo e classificação das adições minerais usadas no concreto.....	41
Quadro 4 - Artigos coletados para revisão bibliográfica - Fibras de aço	47
Quadro 5 - Artigos coletados para revisão bibliográfica - Fibras de vidro.....	48
Quadro 6 - Traço da mistura do UHPC – traço de referência.....	62
Quadro 7 - Traços de UHPC com 10%, 20% e 30% de substituição de CCA por microsilica ativa	63
Quadro 8 - Traço de UHPC com substituição de pó de quartzo por RCD	64
Quadro 9 - Espalhamento dos traços de UHPC.....	65
Quadro 10 - Dimensões das amostras de acordo com os ensaios determinados	67
Quadro 11 - Análise de caracterização dos materiais utilizados.....	69
Quadro 12 - Densidade e superfície específica dos materiais	75
Quadro 13 - Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade do UHPC reforçado com 2% de fibras	79
Quadro 14 - Resistência à compressão axial média e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC reforçado com microfibras de aço	83

Quadro 15 - Resistência à compressão axial média e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC reforçado com microfibras de aço e pó de RCD.....	87
Quadro 16 - Resistência média à compressão axial e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC reforçado com fibras de vidro e CCA	90
Quadro 17 - Resistência média à compressão axial e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC reforçado com fibras de vidro e RCD	93
Quadro 18 - Resistência à tração indireta do UHPC aos 28 dias	103
Quadro 19 - Resistência à tração indireta do UHPC com 2% de fibras de aço ou 2% de vidro aos 28 dias – Traços com CCA.....	105
Quadro 20 - Resistência à tração indireta do UHPC com 2% de fibras de aço aos 28 dias – Traços com RCD	109
Quadro 21 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos na idade de 28 dias – 2% de teor de fibras	115
Quadro 22 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos do UHPC com fibras de aço e vidro na idade de 28 dias – adição de cinzas de casca de arroz.....	117
Quadro 23 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos do UHPC com fibras de aço e vidro na idade de 28 dias – adição de resíduos de construção e demolição	121
Quadro 24 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de fibras	131
Quadro 25 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de aço e cinzas de casca de arroz (CCA).....	133
Quadro 26 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de aço e resíduos de construção e demolição (RCD).....	135

Quadro 27 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de vidro e cinzas de casca de arroz (CCA).....	138
Quadro 28 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de vidro e resíduos de construção e demolição (RCD).....	140
Quadro 29 - Propriedades mecânicas encontradas na literatura para UHPC com 2% de fibras	143
Quadro 30 - Propriedades mecânicas do UHPC com fibras de aço e vidro – Resultados da literatura e resultados experimentais	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAA	Classe de agressividade ambiental
CP	Cimento Portland
CC	Concreto convencional
CCA	Cinza de casca de arroz
CP	Corpo de prova
EAFM	Escória de alto forno moída
GA	Grau de amorfismo
PQ	Pó de Quartzo
NBR	Norma Brasileira
RCD	Resíduos de construção e demolição
SA	Sílica ativa
UHPC	Concreto de ultra-alto desempenho
ZTI	Zona de transição interfacial

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão (MPa)
ε	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$ ou adimensional)
f_c	Resistência à compressão (MPa)
f_t	Resistência à tração (MPa)
E	Módulo de elasticidade (GPa)
E_t	Módulo de elasticidade tangencial (GPa)
E_c	Módulo de elasticidade secante (GPa)
d	Diâmetro (mm)
l	Comprimento (mm)
a/c	Relação água/cimento (adimensional)
a/g	Relação água/aglomerante (adimensional)
P	Força aplicada (kN)
CG	Centro de gravidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
2 OBJETIVOS	24
2.1 METODOLOGIA APLICADA	25
3 EMBASAMENTO TEÓRICO	25
3.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO (UHPC).....	25
3.1.1 Resistência à compressão	27
3.1.2 Resistência à tração	29
3.1.3 Módulo de elasticidade.....	34
3.1.4 Retração.....	36
3.2 ADIÇÕES MINERAIS.....	37
3.3 UHPC E TEOR DE FIBRAS DE AÇO E VIDRO – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	45
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	51
4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES E MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE - ABNT NBR 5739:2018 e ABNT NBR 8522:2021	55

4.3 TRAÇÃO INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - ABNT NBR 7222:2011	57
4.4 TRAÇÃO NA FLEXÃO POR TRÊS PONTOS - ABNT NBR 13279:2005	57
4.5 DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL ATRAVÉS DA RETRAÇÃO – ABNT NBR 16834:2020	60
4.6 DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA	61
5 RESULTADOS E ANÁLISES	67
5.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DO UHPC.....	67
5.1.1 Análise granulométrica dos materiais utilizados na produção do CAR e UHPC	72
5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	76
5.2.1 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial.....	76
5.2.1.1 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial – Análise do UHPC com fibras de vidro e aço	78
5.2.1.2 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial – Análise do UHPC com CCA e RCD com microfibras de aço ou vidro.....	83
5.2.1.3 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial – Análise do diagrama de tensão vs deformação	97
5.2.2 Resistência à tração indireta por compressão diametral	100
5.2.2.1 Resistência à tração indireta por compressão diametral – Análise do UHPC com fibras de vidro e aço.....	102

5.2.2.2 Resistência à tração indireta por compressão diametral – Análise do UHPC com adições minerais de CCA e RCD.....	104
5.2.3 Tração na flexão por 3 pontos.....	113
5.2.3.1 Tração na flexão por 3 pontos – Análise do UHPC com fibras de vidro e aço	114
5.2.3.2 Tração na flexão por 3 pontos – Análise do UHPC com CCA e RCD	116
5.2.3.3 Tração na flexão por 3 pontos – Análise do diagrama força vs deslocamento	124
5.2.4 Retração autógena do UHPC	129
5.2.4.1 Retração autógena – Análise do UHPC com fibras de aço e vidro	130
5.2.4.2 Retração autógena – Análise do UHPC com adições minerais de CCA e RCD	132
5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO UHPC: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS LABORATORIAIS E DADOS DA LITERATURA.....	142
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
REFERÊNCIAS	153

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensificação das atividades antrópicas associadas ao desenvolvimento econômico tem gerado crescente impacto sobre os ecossistemas naturais. A expansão da construção civil e do agronegócio, por exemplo, tem sido amplamente vinculada ao desmatamento de biomas como a Amazônia e o Cerrado, contribuindo para a perda de biodiversidade e o comprometimento de serviços ecossistêmicos essenciais.

As práticas agrícolas intensivas contribuem para a contaminação de recursos hídricos e atmosféricos, aumentando significativamente as emissões de gases de efeito estufa. A expansão de monoculturas e a necessidade de crescimento acelerado de áreas urbanas de forma não planejada são fundamentais para o comprometimento ambiental.

A construção civil configura-se como um dos setores de maior impacto ambiental no contexto urbano. Estima-se que esse setor consuma entre 20% e 50% dos recursos naturais disponíveis globalmente, sendo responsável por até 40% dos resíduos sólidos urbanos (Merino *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2022).

A urbanização desordenada, somada à expansão de infraestrutura, acarreta fragmentação de *habitats*, impermeabilização do solo e redução de áreas verdes, agravando o desequilíbrio ecológico. A necessidade de revisão dos modelos produtivos torna-se evidente. A literatura recente destaca a urgência da transição para estratégias mais sustentáveis, pautadas na conservação da biodiversidade, no uso racional dos recursos naturais e na minimização dos efeitos socioambientais.

O mercado da construção civil apresenta grande destaque nos impactos ambientais, devido ao elevado consumo de matérias-primas como areia, brita, cimento e água. A produção de cimento, por exemplo, é responsável pela emissão de cerca de 8% de CO₂ na atmosfera (Purton, 2024; Factos on Climate, 2025).

O descarte incorreto de resíduos de construção e demolição (RCD) é agente contribuinte para o impacto ambiental de forma negativa, devido à negligência da administração pública, no incorreto manejo dos resíduos sólidos.

Diante deste cenário, torna-se imprescindível a adoção de medidas regenerativas, tecnologias limpas e políticas que integrem o desenvolvimento urbano e agrícola, com responsabilidade ambiental e social.

O ramo da construção demonstrou avanços em discussões, estudos e inovações tecnológicas, voltados à otimização de materiais, à eficiência energética e ao melhor custo-benefício do mercado. Várias alternativas são apontadas com o objetivo de aumentar as propriedades e a durabilidade dos materiais, minimizar os impactos ambientais e socioeconômicos e facilitar o acesso, transporte e manejo destes insumos.

Medidas como crédito de carbono, que utiliza a preservação de emissão de CO₂, através de construções de energia limpa e renovável, como moeda de troca para países poluentes; avaliação do custo de vida, que quantifica através de logística as taxas de emissão de carbono e materiais não renováveis e a alternativa mais sustentável de determinado constituinte ou construção; e materiais alternativos de construção, são discutidos no mercado civil e ganham notoriedade mundial.

Alguns materiais que seriam descartados em aterros sanitários ou afluentes são estudados como alternativas de reaproveitamento. Resíduos de construção e demolição (RCD), por exemplo, são resíduos possivelmente compostos por cerâmicas, concretos, madeiras, vidros e areias, resultantes de elementos construtivos assolados, moídos, tornando-se alternativas de reaproveitamento em alvenarias, peças de mobília ou objetos decorativos.

Na agricultura, algumas monoculturas, em processo de tratamento, geram sedimentos facilmente descartáveis, tornando-se agentes contaminantes do solo ou de cursos d'água. Segundo Tashima *et al.* (2012) e Gursel *et al.* (2016), a cinza da casca de arroz (CCA), utilizada como um destes exemplos de material, quando submetida a elevadas temperaturas e a processos de moagem, apresenta altas concentrações de sílica (SiO₂) na composição química, apresentando propriedades pozolânicas, capazes de aprimorar as características mecânicas do cimento, ajudando na produção do produto de hidratação e, conseqüentemente, na resistência.

O controle do padrão da combustão da CCA mostra-se de fundamental importância, visto que se torna possível uma concentração de até 90% de SiO₂, que, ao ser incorporado ao concreto, faz com que ocorra a formação de cálcio hidratado (Tashima *et al.*, 2012).

O concreto de ultra-alto desempenho, do inglês *ultra-high performance concrete* (UHPC), é um material cimentício que alcança propriedades mecânicas superiores a outros tipos de concreto existentes, o que lhe permite a construção de seções transversais menores e grandes vãos. Este composto cimentício é comumente denominado argamassa por não possuir agregados graúdos na mistura. A composição de fibras de aço em algumas misturas contribui para que este compósito se torne tenaz e dúctil, ocasionando a caracterização de um concreto. Em sua mistura leva alta taxa de cimento Portland, pó de quartzo e sílica ativa, o que o torna

caro e mais poluente em relação aos outros concretos encontrados na literatura. Tal problema justifica a realização deste presente estudo.

2 OBJETIVOS

Este trabalho objetiva a análise do comportamento mecânico do UHPC, em função da influência dos teores de fibra de aço e vidro, substituir parcialmente adições minerais como microsilica e pó de quartzo por materiais alternativos tais como a cinza de casca de arroz (CCA) e pó de resíduos de construção e demolição (RCD), correlacionando-os com fibras de aço e vidro a fim de verificar ganhos ou perdas das características mecânicas.

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterização química e física dos materiais constituintes do UHPC e das adições minerais usadas na mistura;
- b) Avaliar e caracterizar as propriedades mecânicas do UHPC através dos ensaios de compressão axial, tração indireta por compressão diametral, flexão de três pontos e retração autógena das diferentes misturas estudadas;
- c) Observar o comportamento mecânico do UHPC com tamanhos distintos de fibras de aço (macrofibra e microfibra) e analisar os resultados com UHPC com fibras de vidro, onde se observam possíveis influências destas fibras nas características do compósito;
- d) Observar o comportamento mecânico do UHPC com substituição da microsilica por teores de 10%, 20% e 30% de CCA, e substituição do pó de quartzo por 50% e 100% de RCD, comparando com os resultados do UHPC com microfibras de aço e microfibras de vidro.

2.1 METODOLOGIA APLICADA

A metodologia aplicada neste presente trabalho deu-se nas seguintes etapas:

- 1 – Definição de um traço que atenda às necessidades desta pesquisa;
- 2 – Estudo de teores de CCA e RCD satisfatórios, através de ensaios laboratoriais das principais propriedades mecânicas, para validar o traço analisado. Foram aplicados sensores eletrônicos nas amostras após 28 dias de idade, para aferir as forças de compressão axial e flexão por três pontos, com o objetivo de mensurar o deslocamento e obter o módulo de elasticidade;
- 3 – Análise dos resultados do UHPC entre fibras cortadas de aço, macrofibras de aço e microfibras de vidro em ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade, tração indireta, tração na flexão e retração autógena;
- 4 – Análise dos resultados do UHPC com as adições minerais de cinza de casca de arroz e pó de resíduo de construção e demolição.

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO (UHPC)

O concreto de ultra-alto desempenho, do inglês *ultra-high performance concrete* (UHPC), tem atraído o campo da engenharia civil desde a década de 90 por satisfazer as necessidades de materiais mais duráveis e de alto desempenho, emergindo como uma solução promissora, mostrando-se superior à de um concreto comum (Yi *et al.*, 2012; Zbed, 2013).

O UHPC geralmente tem como composição cimento, sílica ativa, pó de quartzo, agregado fino, superplastificantes e fibras. De acordo com Silva (2024), o concreto de ultra-alto desempenho se distingue do concreto convencional devido à inclusão de componentes granulares ultrafinos com diâmetro máximo inferior a 2 mm.

Ha *et al.* (2022) apontam a importância do estudo da contribuição destes compósitos para as características mecânicas através de ensaios de granulometria, termogravimetria e

composição mineral. O uso de agregados finos, como a areia fina ou areia de quartzo, reduz falhas na zona de transição interfacial (ZTI) em conjunto com os materiais cimentícios, oferecendo uma distribuição uniforme de tensões. A microssílica ativa apresenta partículas granulométricas finas, com geometria esférica, a fim de contribuir no preenchimento dos vazios entre as partículas de maior granulometria (Shi *et al.*, 2015).

Para Silva (2024), materiais como pó de quartzo e sílica ativa, que não eram extensivamente utilizados em concreto convencional, aprimoram as propriedades mecânicas e a durabilidade do UHPC. O pó de quartzo e a microssílica ativa destacam-se entre as adições minerais utilizadas na mistura de concreto de ultra-alto desempenho como componentes fundamentais para o ganho de resistência e fluidez.

O pó de quartzo otimiza o tamanho das partículas do concreto UHPC, o que proporciona uma distribuição uniforme entre os grãos de areia fina e cimento (Oliveira, 2020). A incorporação de microssílica ativa configura a formação de uma matriz cimentícia densa e de baixa porosidade, que melhora a compactação das partículas e aumenta o efeito plastificante, preenchendo os espaços vazios entre o cimento e o pó de quartzo que seriam ocupados por partículas de água, o que configura a redistribuição por toda a estrutura de concreto e melhora a fluidez (LIN *et al.*, 2019). Como todo material, o UHPC apresenta vantagens e desvantagens.

Vantagens:

- a) Resistências superiores ao concreto convencional;
- b) Uma boa ductilidade devida à adição de fibras na mistura;
- c) Uma baixa relação água-cimento a/c.

Desvantagens:

- a) Materiais caros, como o pó de quartzo, areia, e algumas fibras, como a de aço, por exemplo;
- b) Alto teor de cimento na mistura, o que eleva o custo de vida e o calor de hidratação, ocasionando algumas fissuras estruturais;
- c) Problemas na fluidez devido à baixa relação a/c;
- d) Vulnerabilidade das fibras de aço, submetidas à corrosão.

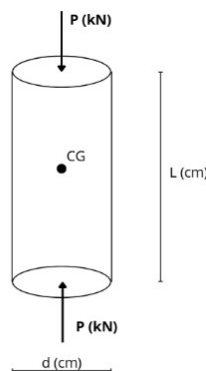
3.1.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão do UHPC é um dos atrativos da utilização do material na construção civil, onde se apresenta como uma alternativa para peças pré-moldadas com grandes vãos livres, edificações altas e estruturas resistentes em ambientes agressivos (Sohail *et al.*, 2021).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6118:2026, um ambiente com classe de agressividade ambiental (CAA) influencia a durabilidade e o cuidado com estruturas de concreto, em que, por exemplo, um ambiente de classe IV exige um alto valor de cobrimento de armaduras, dependendo do elemento construtivo projetado e calculado. O UHPC surge como material de alta tecnologia devido à adição de materiais finos, com baixa porosidade e relação água/cimento, e apresenta alta resistência mecânica, durabilidade e ductilidade, decorrentes da microestrutura e da pequena porosidade, que reduzem a permeabilidade, e da entrada de agentes nocivos, como água, sulfatos e cloretos, que conferem alta resistência a mecanismos de deterioração e a ambientes agressivos (Zhang *et al.*, 2023).

A resistência à compressão é caracterizada como um esforço normal, em que uma força é aplicada em relação ao centro de gravidade (CG) do eixo da seção transversal, em direção paralela à peça longitudinal. O vetor desta força (P) ocorre em direção ao CG da seção longitudinal e realiza esforços compressores na peça, até que ela atinja o efeito de flambagem, em que a seção longitudinal altera a forma inicial do CG e cria-se uma excentricidade (Figura 1).

Figura 1 - Esforço normal em corpo de prova cilíndrico: esquema



Fonte: Autor

Um concreto de resistência convencional (CC) atinge valores característicos mecânicos à compressão de 20 MPa a 50 MPa, enquanto um UHPC resiste às forças normais comprimidas entre 120 MPa e 150 MPa (Zhang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2022; Prado *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024). Para ACI 239R.18 (2018), um concreto para ser considerado de ultra-alto desempenho deve atingir resistências à compressão entre 120 MPa e 250 MPa, com uma curva tensão-deformação mais linear que a do CC. A presença de agregados finos no UHPC auxilia na ZTI e reduz o índice de vazios, o que contribui para a alta resistência mecânica. De acordo com a ABNT NBR 17246, a resistência característica mínima à compressão e à tração é de 100 MPa e 6 MPa, respectivamente, para ser considerado como UHPC.

Prado (2020) aponta que a maior eficiência nas propriedades mecânicas do UHPC se dá devido ao aumento da quantidade de finos e adições de minerais, os quais incluem, em sua maioria: cimento Portland, sílica ativa, areia fina e pó de quartzo, superplastificantes e uma baixa relação água/cimento.

O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), embora apresente elevadas resistências mecânicas, tende a exibir comportamento frágil e baixa capacidade de deformação, características desfavoráveis ao desempenho e à durabilidade estrutural. Em razão de sua elevada rigidez e capacidade resistente, a ruptura ocorre de forma abrupta e violenta. Neste contexto, a incorporação de fibras ao UHPC torna-se fundamental para minimizar esses efeitos, promovendo maior ductilidade, controle da fissuração e melhoria do comportamento pós-fissuração (Zhang *et al.*, 2023)

3.1.2 Resistência à tração

Resistência à tração é uma característica que diferencia o concreto convencional do UHPC. Diferentemente do concreto convencional, que possui uma baixa resistência à tração, o diferencial do UHPC é a maior capacidade de resistência à tração, devido à presença de fibras.

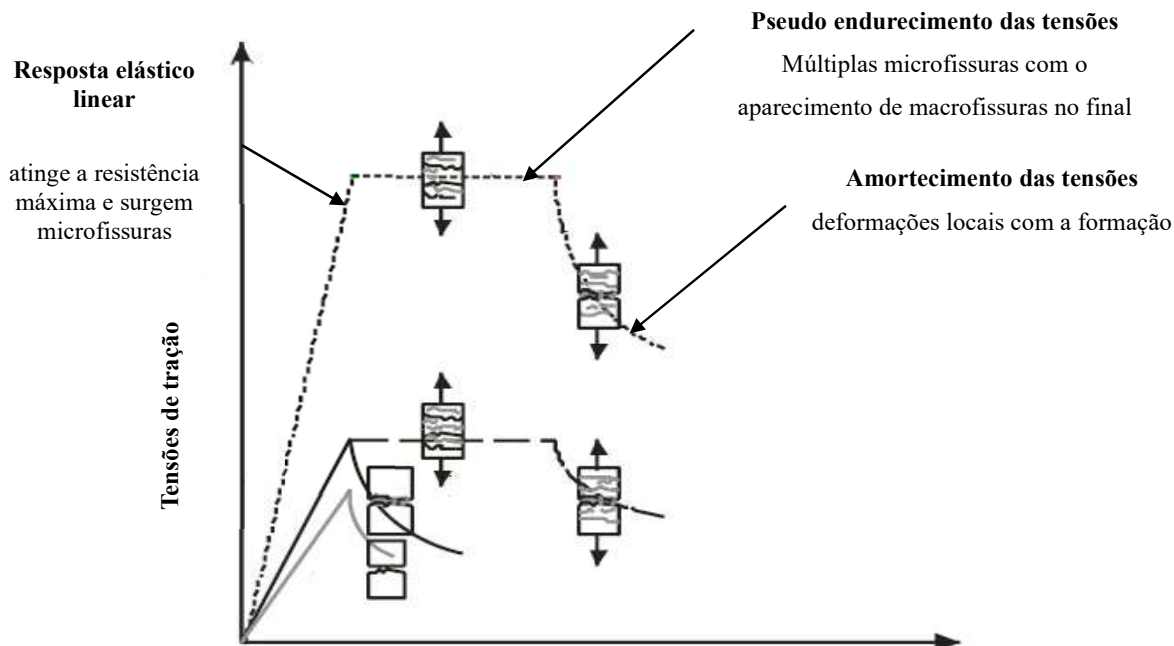
Nezhentseva *et al.* (2013) relatam que a adição de fibras à matriz do UHPC resultará em um comportamento na tração que pode ser dividido em três fases, conforme apresentado na Figura 2.

1 – Resposta elástico-linear: corresponde ao ponto em que o nível de tensão na matriz UHPC atinge a resistência à tração e aparece uma primeira microfissura na matriz de concreto.

2 – Pseudoendurecimento das tensões (*pseudo strain hardening*): neste estágio não acontecem mudanças microestruturais plásticas, portanto, também pode ser chamado de “pseudo-plástico”. As deformações continuam a aumentar intensamente como resultado da formação de numerosas microfissuras (cerca de 1 μm) na matriz, enquanto a tensão de tração uniaxial não sofre alterações significativas em relação ao estágio linear. A formação de microfissuras múltiplas com aberturas uniformemente distribuídas, ligadas entre si pelas fibras de aço, é similar a tensão de endurecimento ou ao comportamento plástico. O estágio prossegue até alcançar a máxima deformação (geralmente de 0,2 – 0,3%, dependendo da quantidade e propriedade das fibras). Macrofissuras começam a se desenvolver nesta fase.

3 – Amortecimento das tensões (*strain softening*): esta fase inicia-se quando a matriz de concreto se torna enfraquecida e não consegue transferir as tensões médias com a mesma intensidade, subentende-se que a capacidade de endurecimento da matriz do UHPC é alcançada. Durante este processo as deformações locais na seção mais fraca começam a aumentar, onde ocorre formação de macrofissuras, o que reduz a capacidade do concreto de absorver as tensões. As macrofissuras irão se formar de acordo com a orientação das fibras.

Figura 2 - Resposta de diferentes concretos quando solicitados à tensão de tração uniaxial.



Fonte: Nezhentseva *et al.* (2013)

Na literatura, encontram-se estudos de variadas fibras — dentre estas, aço, polipropileno, vidro e carbono —, sendo mais utilizadas as fibras de aço, devido à capacidade de aumentar a resistência mecânica à tração e à compressão do UHPC (Zhang, 2023).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os compósitos reforçados com fibras podem ser classificados em: baixa fração volumétrica (1%), na qual as fibras têm a função de reduzir a fissuração por retração; moderada (1% - 2%) e alta fração volumétrica (maior que 2%), em que a presença das fibras nessas frações aumenta o módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto dos elementos, gerando maior capacidade de absorção de energia.

Um alto volume de fibras de aço pode prejudicar a trabalhabilidade do material, levando a problemas de aglomeração e dispersão desigual do material, afetando negativamente as propriedades mecânicas. Yoo *et al.* (2018) observaram que, quando se aplica um teor de 3%

de fibras de aço, aprimoram-se as propriedades mecânicas do UHPC, quando se trata da resistência à compressão, do módulo de elasticidade e da aderência fibra-matriz.

A incorporação de fibras de vidro em matrizes cimentícias de alto desempenho, como o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), tem sido amplamente investigada como uma estratégia eficaz para melhorar o comportamento mecânico e a durabilidade destes materiais (Tian *et al.*, 2019). Estas apresentam características vantajosas, como elevada resistência à tração, baixa densidade, boa estabilidade química e custo relativamente reduzido quando comparadas a outros tipos de fibras de reforço.

Quando distribuídas na matriz cimentícia, estas fibras atuam como elementos de ponte (*crack-bridging*), com capacidade de restringir a abertura e a propagação de microfissuras, o que contribui para o controle da fissuração e para o aumento da resistência à flexão e da capacidade de absorção de energia do compósito (Zheng *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2022).

A presença das fibras de vidro pode promover uma redistribuição mais uniforme das tensões internas, o que, conseqüentemente, retarda a coalescência de fissuras e aumenta a tenacidade do material. Estudos recentes indicam que a adição de fibras de vidro pode resultar em melhorias significativas nas propriedades mecânicas do concreto, incluindo aumentos na resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade, dependendo da fração volumétrica e da dispersão das fibras na matriz (Zhang *et al.*, 2024; Tahir *et al.*, 2023).

Em sistemas de UHPC, caracterizados por microestrutura altamente densificada e baixa relação água/aglomerante, a interação fibra-matriz tende a ser ainda mais eficiente, favorecendo mecanismos de transferência de tensões e aumentando a resistência ao impacto e ao dano progressivo.

O uso de fibras de vidro, especialmente do tipo resistente a álcalis (*AR-glass*), contribui para melhorar o desempenho em ambientes agressivos, uma vez que tais fibras apresentam maior resistência ao ataque alcalino presente na solução de poros do cimento (Blazy *et al.*, 2022).

Além das melhorias globais nas propriedades mecânicas, o desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras está diretamente relacionado aos mecanismos micromecânicos de interação entre a fibra e a matriz. O UHPC reforçado com fibras de vidro tem como característica a elevada densificação da matriz cimentícia e a presença reduzida de poros capilares, que favorecem uma zona de transição interfacial (ZTI) mais compacta, em que

ocorre melhor transferência de tensões entre a matriz e as fibras. Tal mecanismo promove maior ductilidade e capacidade de absorção de energia após o início da fissuração.

Durante o carregamento, as fibras podem sofrer mecanismos de arrancamento (pull-out) ou ruptura, sendo o primeiro frequentemente associado a uma maior dissipação de energia e, conseqüentemente, ao aumento da tenacidade do compósito (Yoo & Banthia, 2016; Kang *et al.*, 2020).

Em concretos de ultra-alto desempenho, a elevada resistência da matriz tende a intensificar os mecanismos de ancoragem mecânica das fibras, capazes até de melhorar o comportamento pós-fissuração e a distribuição das microfissuras ao longo do material.

Estudos recentes também indicam que a eficiência do reforço depende de fatores como o comprimento da fibra, fator de forma (*aspect ratio*), fração volumétrica e qualidade da dispersão na matriz, os quais influenciam diretamente o desempenho mecânico e a durabilidade do compósito (Wille *et al.*, 2014; Kang *et al.*, 2020).

A incorporação de fibras de vidro em sistemas de UHPC representa uma estratégia promissora para otimizar o comportamento estrutural do material, especialmente em aplicações que demandam elevada resistência mecânica, controle de fissuração e maior resistência ao dano progressivo.

A adição de fibras de aço proporciona melhores propriedades mecânicas e maior controle de fissuras no UHPC. Para efeitos de comparação, fibras de aço, possuem baixa resistência à corrosão e maior peso específico, afetando a trabalhabilidade e vida útil do UHPC, e um alto valor em relação às fibras de vidro, elevando o custo da produção do concreto.

Dentro desse cenário, torna-se relevante mencionar que ambas as fibras melhoram a resistência à tração, a durabilidade, a tenacidade e o controle de fissuras do UHPC. Sendo assim, este concreto possui amplas aplicações em estruturas submetidas a elevadas solicitações mecânicas.

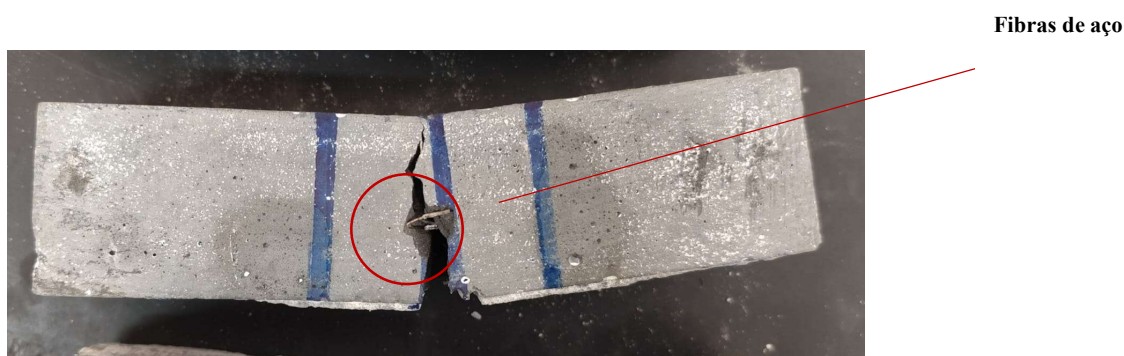
O UHPC, comparado ao concreto convencional (CC), apresenta maiores características mecânicas no esforço normal à tração. Enquanto um concreto convencional atinge resistência à tração entre 3 MPa e 5 MPa, o UHPC alcança marcas de 7 MPa a 12 MPa (Smarsewski, 2017).

Estudos de Smarsewski (2017) e Zhang *et al.* (2023) enfatizam que a presença das fibras, contribui significativamente para a propriedade resistente do concreto de ultra-alto desempenho. A Figura 3-a e Figura 3-b ilustram a presença de macrofibras e microfibras de aço

em um prisma rompido de UHPC, onde estas fibras criam uma ponte de transferência de tensões entre as fissuras e auxiliam diretamente no aumento da resistência e da ductilidade do concreto.

Segundo Vahid Afroughsabet (2015), a introdução de fibras no UHPC resulta, dependendo do tipo de fibra, numa diminuição da absorção de água e redução da resistividade de energia elétrica do concreto, além de maior resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade e ductilidade.

Figura 3 - Fibras de aço contribuindo para a ductilidade do UHPC



a) Primas 4x4x16 cm após ensaios de flexão com macrofibras de aço à mostra



b) Primas 4x4x16 cm após ensaios de flexão com as microfibras de aço à mostra

Fonte: Autor

Wang *et al.* (2024) apontam ainda que a adesão das fibras e a excelente matriz ZTI do UHPC são capazes de auxiliar na distribuição de tensões. As fibras com gancho ou torcida apresentam alta capacidade de ancoragem, o que aumenta a energia de fratura. Mészöly e Randl

(2024) chegam à conclusão de que fibras híbridas no UHPC com aço e PP ou aço e PVC caracterizam-se por produzir sinergia, o que melhora a resistência, absorção de energia e o controle de fissuras múltiplas.

3.1.3 Módulo de elasticidade

Módulo de elasticidade (E), ou módulo de Young, é uma característica mecânica capaz de definir a rigidez de um determinado material através da razão entre a tensão e a deformação — ou seja, capacidade de resistência de um material submetido à deformação elástica ao sofrer algum esforço solicitante (Equação 1). — Formalmente, é definido como inclinação da curva tensão-deformação na região elástica linear.

$$E_t = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Em que:

E_t - Módulo de elasticidade tangencial, expresso em (GPa);

σ – tensão, expressa em (MPa);

ε – deformação, expressa em (mm).

A caracterização do módulo de elasticidade permite avaliar o comportamento mecânico estrutural de um material, com a propriedade de indicar o quanto o material se deforma quando submetido à esforços. Um material com um alto módulo de elasticidade sofre pouca deformação elástica, o que o torna vantajoso para estruturas onde a rigidez é essencial, como lajes protendidas, pontes, viadutos ou edificações altas (ABNT NBR 6118:2026, 2026). Com o módulo, é possível dimensionar estruturas, identificar danos e servir de insumo para modelagens computacionais.

O módulo de Young pode ser classificado em: módulo tangencial (E_t) e módulo secante (E_s), onde as distinções se dão na forma como são determinados a partir da curva tensão-deformação. O módulo secante é a razão da tensão por deformação, e se dá pela inclinação da reta que liga a origem ao ponto específico da curva, com uma característica média. O módulo tangencial é a derivada da tensão-deformação, com característica instantânea, que se dá pela inclinação da reta tangente à curva em um ponto específico (ABNT NBR 8522:2021, 2021).

A propriedade do módulo de elasticidade secante é estipulada pela ABNT NBR 6118:2026, com aplicação em projetos usuais e lineares através de ensaio padrão, não variando com o nível de carga solicitante. Já o módulo tangencial tem aplicação em análises não lineares e simulações numéricas através de softwares de métodos de elementos finitos como o Abaqus®, para simular o comportamento real do concreto sob carregamentos, e exige a análise da curva completa (Neville, 2011).

O módulo de elasticidade do UHPC apresenta-se com valores superiores ao CC, devido à otimização da mistura e à ausência de agregados graúdos, o que torna a microestrutura deste concreto compacta, minimizando a porosidade e configurando maior rigidez e, assim, aprimora as propriedades elásticas (Gu *et al.*, 2015).

Gu *et al.*, (2015) apontam que o UHPC possui variação de módulo de elasticidade de 40 GPa a 70 GPa, com possível variação, que depende de fatores como distribuição e teor de fibras na mistura. O Quadro 1 denota uma análise comparativa entre as características mecânicas do CC e do UHPC de acordo com as normas brasileiras da ABNT.

Quadro 1 - Características mecânicas do concreto convencional (CC) e do concreto de ultra-alto desempenho (UHPC)

Características do material	CC (ABNT NBR 6118:2026)	UHPC (ABNT NBR 17246:2025)
Resistência à compressão (MPa)	20 a 50	100
Resistência à tração direta (MPa)	1 a 3	maior que 6
Módulo de elasticidade (ASTM C469/C469M (GPa)	25 a 30	40 a 70

Fonte: Autor adaptado de Awassa et al. (2025)

3.1.4 Retração

A retração do concreto é avaliada através da redução do volume da peça ao longo da vida útil, independentemente de esforços externos. A retração se dá pela perda de umidade e reações físico-químicas internas, como a taxa de hidratação do cimento Portland. Analisar a retração de uma peça de concreto mostra-se de suma importância para preservar a durabilidade e integridade estrutural (NEVILLE, 2011).

O Quadro 2 aponta os tipos e características de retração do concreto, e mostra o momento em que elas ocorrem na vida útil.

Quadro 2 - Tipos de retração do concreto e algumas características principais

Tipo de retração do concreto	Características
Plástica	Ocorre nas primeiras horas após o lançamento, relacionada à evaporação rápida da água superficial
Autógena	Redução de volume sem a perda de umidade para o ambiente, causada pela hidratação do cimento
Hidroscópica ou por secagem	Evaporação da água livre dos poros após a pega do concreto, ocorre em ambientes secos
Térmica	Resultante da variação de temperatura no interior do concreto, o que ocorre tensões internas e retração diferencial

Fonte: Adaptado de Neville (2011)

Estudar a retração de um concreto torna-se essencial em projetos de peças pré-moldadas e em projetos estruturais para controle das fissuras, capaz de melhorar a impermeabilidade, proteção das armaduras e vida útil da estrutura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Gu *et al.* (2015) apontam que o UHPC pode sofrer três tipos de retração, sendo eles químicos, por secagem e autógenos. Por possuir na composição alta taxa de superplastificante, o concreto de ultra-alto desempenho sofre de forma proeminente a retração autógena, devido ao processo de auto secagem que ocorre com a etapa de hidratação na matriz do UHPC.

O uso de aditivos redutores de retração mostra-se eficaz na mitigação da retração autógena do concreto, embora seja reduzida em comparação ao CC devido à alta densidade do UHPC e presença das fibras, que ajudam no controle da propagação de fissuras e oferecem restrição interna contra a retração.

Gu *et al.* (2015) demonstram que se o UHPC for submetido a tratamento térmico durante o processo de cura, a retração torna-se irrelevante, visto que o calor acelera a taxa de hidratação do cimento e estabiliza a matriz de zona de transição interfacial (ZTI), o que torna o UHPC altamente resistente à retração o que aumenta a durabilidade e vida útil do sistema estrutural.

3.2 ADIÇÕES MINERAIS

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), adições minerais são materiais fragmentados em pequenas partículas com dimensões iguais ou menores que o cimento, adicionadas à mistura de concreto juntamente com o cimento ou como substituição parcial a este, para conferir melhor desempenho.

Comumente originária de subprodutos industriais, a utilização das adições minerais no concreto tem um caráter sustentável, o que reduz o consumo de cimento, quando usado como substituição parcial. Usinas de energia elétrica que utilizam carvão como combustível, e altos-fornos metalúrgicos são as principais fontes de subprodutos. Reaproveitar estes subprodutos como agregados no concreto ou em construções de bases em estradas e rodovias é uma alternativa, visto que é de baixo custo, porém não explora toda a propriedade pozolânica destes materiais minerais. Estudos são realizados para utilizá-los como adições minerais no concreto para aprimorar as características mecânicas e evitar o descarte excessivo no meio ambiente, no qual se sabe que a produção do cimento é um processo altamente poluente em virtude da grande emissão de CO₂ (Mehta e Monteiro 2008).

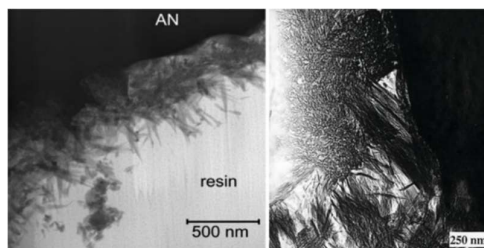
O cimento Portland é composto por clínquer, — composto cimentício formado a partir da calcinação da mistura de carbonato de cálcio, argila e minérios de ferro, — e gesso (CaSO₄). É um material de característica aglomerante, ou seja, um elemento pastoso que promove união entre grãos de agregados. Este aglomerante é quimicamente ativo de forma hidráulica. Subentende-se como material quimicamente ativo de forma hidráulica todo insumo

que, com a presença de partículas de água (H_2O), inicia uma reação química e a formação de outros produtos (Hewlett e Liska 2019).

Como elementos constituintes do clínquer, encontram-se silicato tricálcico, chamado de Alita (C_3S), silicato dicálcico, conhecido como Belita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), com a possibilidade de outros elementos químicos, mas com proporções irrelevantes na hidratação do cimento. O C_3A (Alita) e C_2A (Belita) apresentam em sua maioria até 80% da composição do clínquer. Estes silicatos em contato com água liberam calor e reagem formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (Portlandita) (Hewlett e Liska 2019).

O C-S-H apresenta-se em forma de gel em volta dos grãos de Alita e Belita com alguns cristais de Portlandita. Ele inicia-se formando pequenas agulhas em torno dos grãos, até criar uma camada de gel, que age como material ligante nos agregados, formando uma camada que libera calor e, conseqüentemente, endurece o concreto (Figura 4).

Figura 4 - Imagem microscópica das primeiras horas de formação do C-S-H na Alita



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2018)

O hidróxido de cálcio, conhecido como Portlandita, é responsável por manter o pH do concreto altamente alcalino e apresenta uma morfologia cristalina (Figura 5) em volta do C-S-H, o que auxilia na passivação das armaduras metálicas e, conseqüentemente, protege-as contra a corrosão. A quantidade de portlandita formada ao longo da hidratação do concreto indica o avanço desta taxa de hidratação, e o excesso deste elemento em um concreto pode torná-lo suscetível a ataques por sulfatos ou carbonatação (Hewlett e Liska 2019).

Materiais com função de empacotamento ou *filler* agem predominantemente no efeito físico de preenchimento (*filler effect*) e no efeito de nucleação, sem interferir significativamente na reação principal de hidratação do clínquer, exceto pela formação secundária de fases carboaluminadas em alguns casos. As principais características deste tipo de material são:

- a) Elevada finura e área superficial específica: partículas com diâmetro médio (D_{50}) inferior a 20 μm ocupam de forma eficiente os vazios intersticiais, onde diminui a porosidade e permite a redução da razão água/cimento (a/c) sem perda de trabalhabilidade;
- b) Distribuição granulométrica otimizada: a combinação de frações grosseiras e ultrafinas, conforme preconizado em modelos de empacotamento (por exemplo, o modelo modificado de Andreasen–Andersen), maximiza a densidade de empacotamento, melhora a coesão da matriz e propicia melhor fluxo (Li; Cao, 2024);
- c) Efeito de nucleação de C–S–H: superfícies das partículas ultrafinas servem de sítio preferencial para a precipitação de gel de silicato de cálcio hidratado, na qual acelera a cinética inicial da hidratação e promove microestrutura mais densa (Ali *et al.*, 2023);
- d) Diluição e reatividade secundária: partículas maiores ($D_{50} > 20 \mu\text{m}$) podem exercer efeito diluente, o que retarda ligeiramente o início da hidratação, enquanto as ultrafinas ($< 1 \mu\text{m}$) — além do efeito físico — participam na formação de mono- e hemicarboaluminatos, e assim reduz a porosidade de longo prazo (American Concrete Institute, 2024);
- e) Compatibilidade com sistemas de UHPC e ECC: a otimização de blends com materiais pozolânicos e inertes permite atingir densidades de empacotamento acima de 0,90, redução de até 88 % no volume de poros e incrementos de até 35 % na resistência mecânica.

Alguns materiais de característica de preenchimento: pó de quartzo, calcário, ou mármore *metacaulim*, sílica ativa e nano-sílica. O Quadro 3 apresenta os tipos de adições minerais de acordo com as classificações e a origem. Algumas adições minerais são pozolânicas, algumas cimentantes, enquanto outras são tanto cimentantes quanto pozolânicas.

Quadro 3 - Tipo e classificação das adições minerais usadas no concreto

Adição mineral	Origem	Classificação
Cinza volante	Proveniente da queima de carvão pulverizado em usinas termelétricas	Com alto teor de cálcio - cimentantes e pozolânicos Com baixo teor de cálcio - Pozolana comum
Sílica ativa	Resultante do processo de obtenção do ferro sílicio e sílico metálico	<i>Filler</i> e pozolânico
Cinza de casca de arroz	Resultante da combustão controlada ou não da casca de arroz	Com combustão controlada - Pozolana muito reativa Sem combustão controlada - Pozolana pouco reativa
Escória de alto forno	Resíduo não metálico proveniente da produção do ferro gusa	Quando resfriada lentamente - Pozolana pouco reativa Quando resfriada rapidamente - Material cimentante
<i>Metacaulim</i>	Obtida da calcinação de alguns tipos de argilas superpozolanas	Pozolana muito reativa
<i>Filler</i>	Pode ser originado de lodo de estação de tratamento de esgoto calcinado, cinza da combustão de eucalipto e resíduo de corte de granito, calcáreo e basalto	Efeito de empacotamento

Fonte: Dal Molin, (2011).

O uso do UHPC mostra-se inviável para obras comuns, pela alta quantidade de cimento Portland, atingindo 1100 kg/m³, o que resulta em impactos ambientais e altas emissões de CO₂ na atmosfera, e um alto custo de produção. A adição de fibra na composição do UHPC representa um material de alto custo na composição do composto cimentício, aumentando o gasto em até 35% (Liu *et al.*, 2020).

A baixa relação água-cimento e a taxa limitada de hidratação do cimento apresentam uma necessidade de uso significativo de superplastificante, que, segundo Kang *et al.* (2019), leva a um custo elevado na fabricação do UHPC, com um aumento de valor de até

40%. Com o objetivo de reduzir o custo de produção do UHPC, estudos de adições minerais como materiais alternativos são realizados na literatura.

Dentre as adições minerais mais utilizadas como alternativa na produção do UHPC, pode-se citar a cinza de casca de arroz (CCA) e o pó de resíduo de construção e demolição (RCD). A CCA é produzida através da queima direta dos resíduos da casca de arroz descartados em indústrias agrícolas, o que proporciona uma cinza com concentração de até 90% de sílica (Tashima *et al.* 2012). O experimento de Shi *et al.* (2015) aponta que a substituição parcial de 15% de CCA e 15% de escória de alto-forno configura um UHPC com resistência à compressão de 143,5 MPa, enquanto o composto de referência atinge resistência à compressão de 159,3 MPa, pouca diferença entre as características mecânicas e uma redução de cimento Portland na mistura.

De acordo com Piotr Smarzewski (2023), a resistência à compressão aumenta na faixa de 6,5 a 14%, enquanto a resistência à tração por compressão diametral aumenta na faixa de 7 a 26% em corpos de prova de concreto produzidos com sílica ativa e submetidos à cura úmida com temperatura de 20°C aos 28 dias em comparação com os corpos de prova de referência sem a aplicação de sílica ativa condensada.

O uso de cinzas de casca de arroz para produzir UHPC foi investigado por alguns autores, mas ainda existem muitas lacunas que precisam ser preenchidas em relação ao estudo do UHPC com CCA. Tais resultados indicam que a resistência à compressão do UHPC usando CCA excede 150 MPa em condições normais de cura (VAN *et al.* 2014).

Amostras com 10% de CCA incorporada como substituição para cimento e sílica apresentam melhor resistência à compressão do que a mistura controle. O efeito na resistência à compressão ao substituir 30% de cimento Portland por 15% de escória de alto-forno moída (EAFM) e 15% de cinza de casca de arroz (CCA) é analisado (Ha *et al.* 2022). A mistura com adições minerais apresenta uma resistência à compressão de 143,5 MPa, enquanto a resistência à compressão da mistura de referência (sem adições minerais) é de 159,3 MPa. As misturas com adições minerais apresentam um índice de emissão de CO₂ incorporado menor em comparação com a mistura de referência.

Huang *et al.* (2017) apontam o efeito da substituição da sílica por cinza de casca de arroz (CCA) na resistência à compressão, resistência à flexão e permeabilidade do concreto de ultra-alto desempenho em diferentes idades de cura. Os resultados obtidos pelos autores indicam que a adição de CCA em substituição à sílica no UHPC reduz a fluidez da mistura de CPU fresca, o que resulta no aprisionamento de mais bolhas de ar.

A substituição de 2/3 da sílica por cinza de casca de arroz aumenta a resistência à compressão de 119,3 para 136,6 MPa em comparação com o UHPC sem adição, um ganho de 14%. Com a adição de CCA, a resistência à flexão aos 3 dias foi melhorada, enquanto aos 28 e 120 dias, não houve alterações significativas, variando de 20 a 23 MPa.

Experimentos de Vigneshwari *et al.* (2018) demonstram um aumento de 15% para 46% na resistência à tração e uma evolução de 12% para 44% na resistência à tração na flexão, com o uso de CCA na mistura do UHPC em condições normais de cura.

A incorporação de cinza da casca de arroz (CCA) em matrizes cimentícias avançadas, como o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), pode influenciar significativamente propriedades físicas e mecânicas do material, especialmente densidade, porosidade e resistência à compressão. A CCA apresenta massa específica inferior à do cimento Portland e elevada área superficial, que são características que podem levar a uma redução da densidade aparente da matriz cimentícia quando utilizada como substituição parcial do cimento, principalmente em teores elevados de incorporação (Ambrose *et al.*, 2026; Zaid *et al.*, 2021). Tal fenômeno está diretamente relacionado à estrutura porosa do material, uma vez que a densidade do concreto endurecido é fortemente dependente do volume e da distribuição de poros na matriz cimentícia. Aumentos na porosidade tendem a reduzir a densidade e, consequentemente, afetam negativamente a resistência mecânica do concreto.

Quando a CCA é adequadamente processada com alto teor de sílica amorfa e elevada finura granulométrica, ocorre uma reação pozolânica entre a sílica reativa da cinza e o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, resultando na formação adicional de gel C-S-H. Tal processo contribui para o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia, reduzindo poros capilares e promovendo maior compacidade do material (Guo, 2025).

A redução da porosidade pode compensar parcialmente a menor massa específica da CCA, levando à formação de uma matriz mais densa e homogênea e o que favorece o desenvolvimento da resistência mecânica em níveis moderados de substituição.

Estudos experimentais indicam que teores de substituição da ordem de 10 % a 20 % de CCA podem resultar em melhorias ou manutenção da resistência à compressão do concreto devido à combinação do efeito pozolânico e do efeito *filler*, enquanto teores mais elevados podem provocar aumento da porosidade e redução da resistência mecânica (Zaid *et al.*, 2021; Guo, 2025).

Resíduos de construção e demolição (RCD) é um termo usado para designar materiais gerados em reformas, escavação de edificações, demolição e atividades de construção. Estes resíduos são compostos por concreto, argamassa, cerâmica, madeira, metais, vidros, gesso, solo e outros tipos de materiais (Silva *et al.* 2014).

A utilização do RCD na construção civil varia desde a criação de agregados reciclados, bases de pavimentos, fabricação de blocos de vedação e até mesmo a substituição de adições minerais em concretos de alto desempenho. O pó de resíduo de construção e demolição é um tipo de resíduo que pode ser reutilizado na produção do concreto, e mitiga os impactos ambientais gerados por esse setor.

Gong *et al.* (2024) avaliam as atividades pozolânicas do RCD através de análise granulométrica, composição química e mineralógica deste material, ao adicioná-lo à mistura do UHPC, avaliam, através de ensaios de microscopia e difração de raios X, a hidratação do concreto. Conclui-se que o RCD pode atuar como adição secundária pozolânica, o que promove a hidratação adicional e uma matriz densa, que auxilia nas características mecânicas.

De acordo com He *et al.* (2022), a substituição parcial da sílica ativa por RCD compromete as propriedades mecânicas do UHPC e aos 28 dias, a resistência à compressão do UHPC permanece acima de 100 MPa. Quando 30 % da sílica ativa é trocada por RCD, observa-se, em relação ao UHPC de referência aos 28 dias, uma redução de 3,9 % na resistência à compressão e 4,2 % na resistência à flexão.

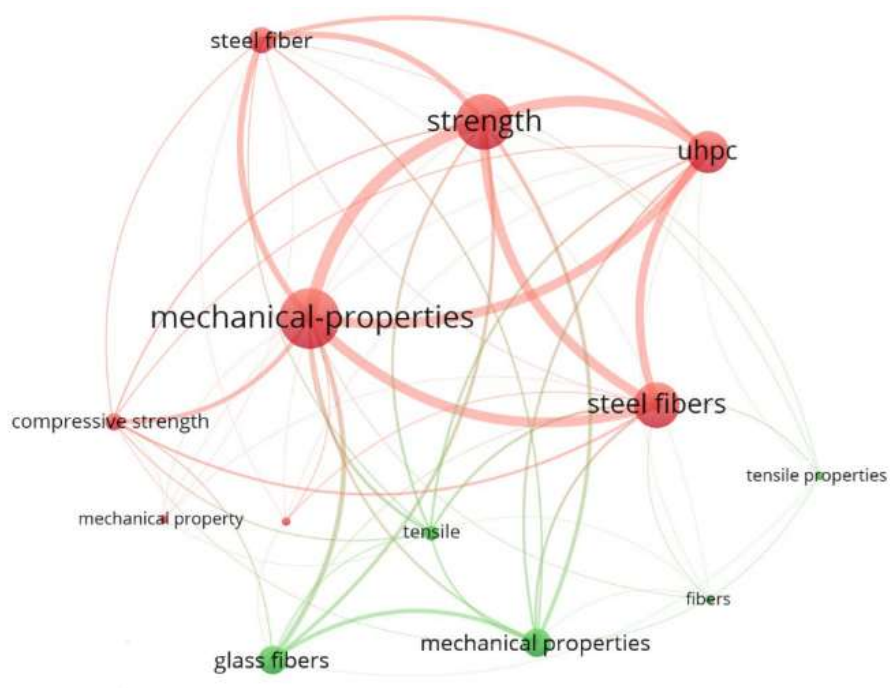
O trabalho de Wu *et al.* (2024) avalia o uso do pó de RCD como substituto parcial da sílica ativa no concreto de ultra-alto desempenho. Em seu trabalho, o UHPC com 30% de substituição da sílica ativa por RCD apresenta resistência à compressão de aproximadamente 145 MPa, e conclui-se que o RCD pode substituir parcialmente a sílica ativa em até 30% sem comprometer de forma significativa o desempenho mecânico do UHPC. O RCD pode atuar como *microfiller* e oferecer suporte à reação de hidratação do cimento.

3.3 UHPC E TEOR DE FIBRAS DE AÇO E VIDRO – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A etapa inicial da presente revisão deu-se em uma revisão sistemática da literatura sobre o UHPC com fibras de aço e vidro de diferentes tamanhos, teores e formatos. Artigos relevantes para a revisão bibliográfica são coletados por meio de buscas em bases de dados dos principais repositórios de publicações científicas, como o *Scopus*, *ScienceDirect* e *Web of Science*. A Figura 6 apresenta um mapa bibliométrico e análise de coocorrência de palavras-chave, onde foram utilizadas *strings* de busca compostas por operadores booleanos, relacionando os termos “UHPC” “and”, “*steel fibers*”, “*glass fibers*”, “*mechanical properties*” e “*strength*”, nas bases de dados científicas. a análise das palavras-chave utilizadas nas buscas. Com esta revisão, a quantidade máxima de teores de fibra estudada foi de 2% na mistura de UHPC com fibras de aço e 2,5% para UHPC com fibras de vidro. Os anos de publicação destes artigos têm como variação de 2014 a 2024, com a maioria entre 2020 e 2023.

Como critérios de inclusão para a coleta de dados, foram considerados artigos contendo pesquisas experimentais que apresentassem resultados de propriedades mecânicas à compressão e módulo de elasticidade, utilizando fibras com comprimento entre 13 e 20 mm, reforçadas com fibras de aço ou vidro, e com ensaios de ruptura realizados aos 28 dias. Os dados coletados para a revisão bibliográfica estão apresentados nos Quadros 4 e 5, contendo informações referentes aos artigos selecionados, aos autores, ao ano de publicação e aos teores de fibras utilizados. A partir desses estudos, torna-se possível analisar os valores médios das propriedades mecânicas em função dos diferentes teores de fibras incorporados ao UHPC.

Figura 6 - Mapa bibliométrico sobre UHPC com fibras de aço e vidro



Fonte: Autor

Entre as propriedades avaliadas, destacam-se a resistência à compressão, a tração direta, a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade, utilizadas como parâmetros para análise comparativa. Nesta etapa da revisão, foram considerados apenas estudos envolvendo UHPC sem adições minerais, com o objetivo de investigar a influência do teor de fibras no comportamento mecânico do material.

Quadro 4 - Artigos coletados para revisão bibliográfica - Fibras de aço

Título do artigo	Ano de publicação	Autores	Tipo de fibra	Teor de fibra na mistura
Utilization of steel slag in ultra-high-performance concrete with enhanced eco-friendliness	2019	ZHANG <i>et al.</i>	Aço	0% 2%
Influence of steel fiber content on the rate-dependent flexural performance of ultra-high performance concrete with coarse aggregates	2022	LI <i>et al.</i>	Aço	1% 1,5% 2%
Effects of Steel Fiber and Specimen Geometric Dimensions on the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete	2022	FANG <i>et al.</i>	Aço	0% 1% 2% 3%
Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape	2019	WU <i>et al.</i>	Aço	0% 1% 2% 3%
Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high-performance concrete with silica fume content	2019	WU <i>et al.</i>	Aço	2%
Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume	2020	LIU <i>et al.</i>	Aço	0% 1% 2% 3%
Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): Influence of steel fiber on mechanical properties	2020	LIU <i>et al.</i>	Aço	0% 1% 2% 3%
Cyclic behavior of UHPFRC under compression	2019	KRAHL <i>et al.</i>	Aço	0% 1% 2%
Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)	2014	YU <i>et al.</i>	Aço	0% 0,5% 1% 1,5% 2% 2,5%
Mechanical damage evolution in UHPFRC: Experimental and numerical investigation	2018	KRAHL <i>et al.</i>	Aço	0% 1% 2%
Stress-strain models for ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber-reinforced (UHPFRC) under triaxial compression	2023	ZHANG <i>et al.</i>	Aço	0% 2%
Bond behaviour of reinforcing bars in UHPFRC	2015	MARCHAND <i>et al.</i>	Aço	2,5%
Compressive behavior of FRP-confined ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC)	2023	WANG <i>et al.</i>	Aço	0% 2%

Fonte: Autor

Quadro 5 - Artigos coletados para revisão bibliográfica - Fibras de vidro

Título do artigo	Ano de publicação	Autores	Tipo de fibra	Teor de fibra na mistura
Tensile behavior of ultra-high performance concrete reinforced with different hybrid fibers	2021	LI, J.; DENG, Z.	Vidro	1%
The Mechanical Properties and Damage Evolution of UHPC Reinforced with Glass Fibers and High-Performance Polypropylene Fibers	2022	HE <i>et al.</i>	Vidro	1% 1,5% 2%
Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre	2021	YAN <i>et al.</i>	Vidro	1% 1,5% 2% 2,5%
Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high performance fiber reinforced concretes: Effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers	2021	MOHAMMED <i>et al.</i>	Vidro	1% 1,5% 2% 2,5% 3%
Mechanical properties of ultra-high performance concrete reinforced by glass fibers under accelerated aging	2021	MADHKHAN, M.	Vidro	1,5% 2%
Mechanical and fracture characteristics of ultra-high performance concretes reinforced with hybridization of steel and glass fibers	2023	MUHYADDIN, G. F.	Vidro	1%
Ultra-high-performance concrete with Iron ore tailings and non-metallic and hybrid fibers-A comprehensive experimental study	2023	MAGDALENE, P. S. <i>et al.</i>	Vidro	1% 1,5% 2%

Fonte: Autor

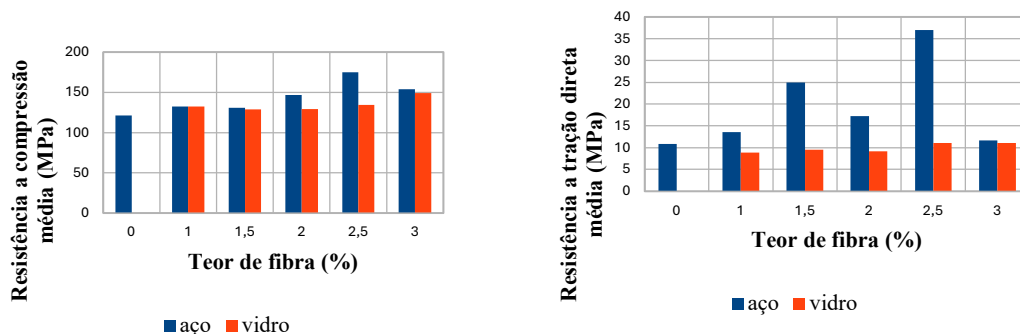
Um estudo prévio das características mecânicas de todos os artigos coletados nos Quadros 4 e 5 é expresso em formato de gráficos (Figura 9). Com estas análises de referências, torna-se possível a conclusão de que o teor de fibra, com mais estudos, é de 2% de fibras de aço e 2,5% de fibras de vidro nas misturas. As propriedades mecânicas encontradas variam de 100 MPa a 150 MPa para compressão, de 5 MPa a 13 MPa para tração direta, de 15 MPa a 30 MPa para tração na flexão e de 40 GPa a 50 GPa para o módulo de elasticidade. Em matrizes de

UHPC, as fibras de aço tendem a proporcionar desempenho mecânico superior em relação às fibras de vidro, particularmente nas propriedades associadas à resistência à tração direta e à tração na flexão.

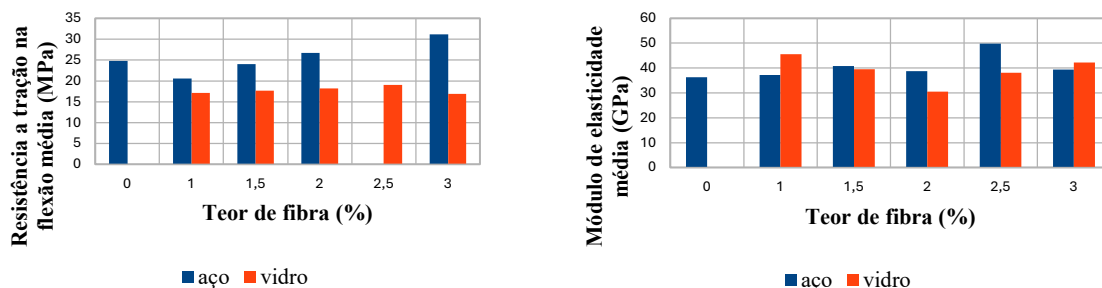
De acordo com os artigos coletados dos Quadros 4 e 5, este comportamento está relacionado à elevada resistência, módulo de elasticidade e capacidade de deformação das fibras de aço, que favorecem mecanismos de ponte entre as faces da fissura proporcionados pelas fibras e transferência de tensões após o início da fissuração da matriz cimentícia. Por outro lado, as fibras de vidro apresentam comportamento mais frágil e menor capacidade de deformação, o que reduz sua eficiência no aumento da ductilidade e na resistência pós-fissuração do compósito cimentício. Em matrizes de UHPC, as fibras de aço tendem a proporcionar desempenho mecânico superior em relação às fibras de vidro, particularmente nas propriedades associadas à resistência à tração direta e à tração na flexão.

A resistência à compressão axial média apresenta variações pouco expressivas entre os compósitos reforçados com fibras de aço e fibras de vidro ao longo dos diferentes teores de incorporação (Figura 7). Tal comportamento indica que o tipo de fibra exerce influência secundária nessa propriedade, uma vez que a resistência à compressão em matrizes cimentícias é predominantemente governada pela microestrutura da pasta e pelo empacotamento das partículas, sendo as fibras mais relevantes para propriedades relacionadas à tenacidade e ao controle da fissuração.

Figura 7 - Características mecânicas médias do UHPC com fibras de aço e vidro, em relação aos teores estudados



a) Compressão axial média das fibras de aço e vidro b) Tração direta média das fibras de aço e vidro



c) Tração na flexão média das fibras de aço e vidro d) Módulo de elasticidade médio das fibras de aço e vidro

Fonte: Autor

A análise do módulo de elasticidade médio dos compósitos, expresso na Figura 7 evidencia que a incorporação de fibras não promove variações significativas na rigidez global da matriz de UHPC para baixos teores de incorporação.

De modo geral, os valores obtidos mantêm-se próximos aos do traço de referência sem fibras, indicando que tal característica mecânica é predominantemente governada pela microestrutura da matriz cimentícia.

O UHPC com fibras de vidro apresenta variações mais pronunciadas e valores ligeiramente inferiores em determinados teores, o que pode estar relacionado à menor capacidade de deformação e à diferente interação mecânica entre a fibra e a matriz cimentícia.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES E MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os materiais utilizados na produção das misturas de UHPC foram obtidos de diferentes fornecedores:

1 - Cimento Portland CP-V ARI Ultrarrápido Holcim;

2 – Agregados:

- a) Areia fina industrial: módulo de finura 80/100, proveniente da mineração Jundu;
- b) Pó de quartzo (filler): SM 200, mineração Jundu.

3 – Adição mineral:

- a) Sílica ativa não densificada em pó, fornecida pela Elken;
- b) Cinza de casca de arroz, fornecida pela Ekosil;
- c) Resíduos de construção e demolição em fração fina, oriunda de materiais cimentícios, fornecidos pelo grupo de pesquisa *Carbon Use and Capture in the Construction Industry (CO₂ Construction)*.

4 – Aditivos: superplastificante (ADVA 585);

5 – Fibras:

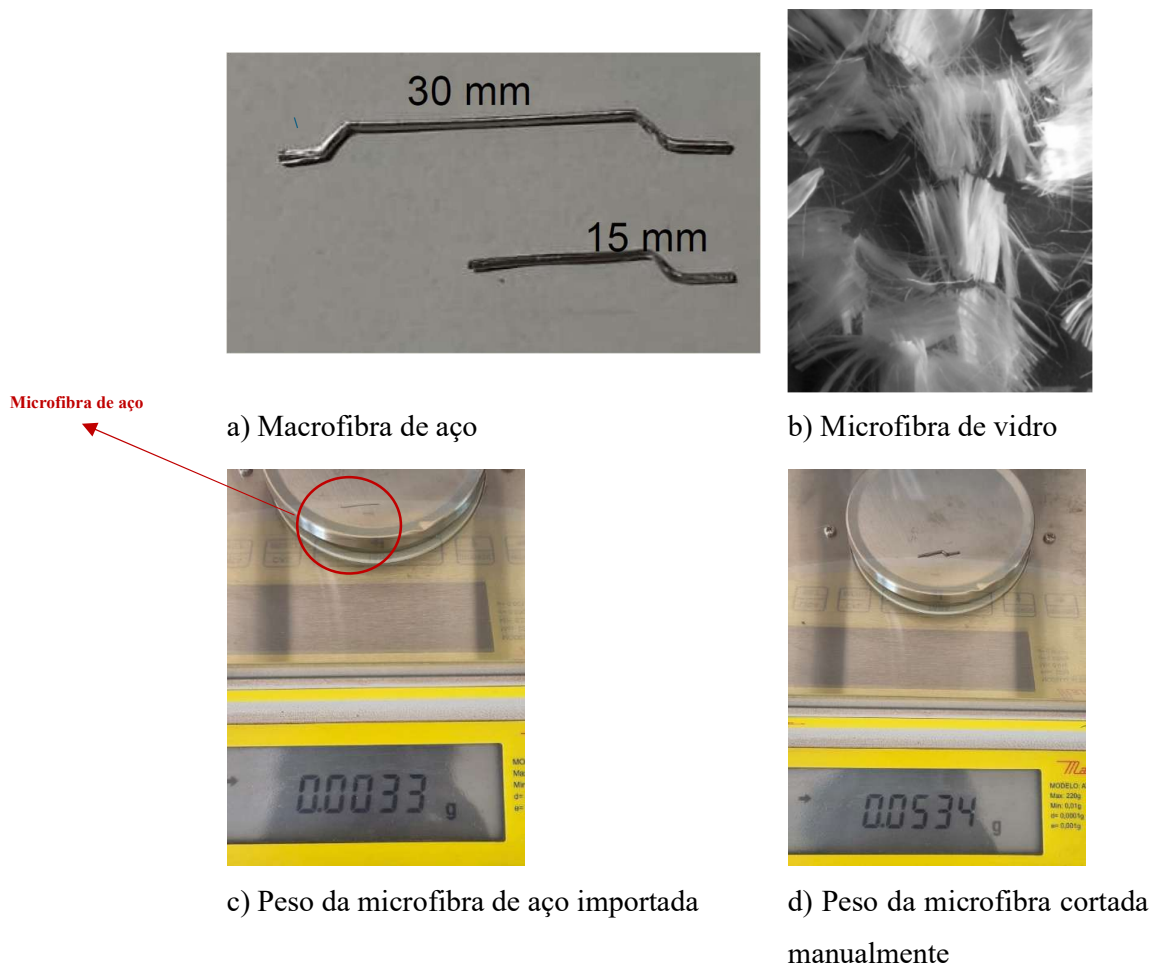
- a) Macrofibras de aço nacional, com 30 mm de comprimento, 0,55mm de diâmetro, densidade de 7,8 g/cm³ (7.800 quilos por metro cúbico) e

resistência à tração de 1.000 MPa com fator de forma de 54,55, cortadas com finalidade de tornarem microfibras de 15 mm com fator de forma de 27,3 (Figura 8 – a). Obteve-se o peso das fibras de aço em uma balança de precisão, onde se observa que a fibra cortada é aproximadamente 16 vezes mais pesada que a comercial (Figura 8 – c e Figura 8 – d);

b) Microfibras de vidro: comprimento de 6 mm, densidade de 0,91 g/cm³ (910 kg/m³) e resistência à tração de 300 MPa (Figura 8 - b).

Todos os materiais utilizados foram armazenados isoladamente em sacos plásticos e tambores vedados, com o objetivo de evitar contaminações por umidade e por agentes externos, incluindo materiais biológicos, preservando-se, assim, suas propriedades físicas e químicas durante o período experimental. As microfibras de aço foram cortadas manualmente com alicate de corte devidamente tratado e esterilizado com a finalidade de evitar contaminações no material com risco de corrosão das fibras metálicas.

Figura 8 - Tipos de fibras no UHPC



Fonte: Autor

A Figura 9 apresenta amostras dos materiais utilizados na produção do UHPC. A Figura 9-a ilustra os insumos em ambiente laboratorial, após o processo de pesagem, etapa essencial para o controle da dosagem e reprodutibilidade das misturas. A Figura 9-b apresenta os materiais de forma ilustrativa, evidenciando suas características físicas e morfológicas.

Figura 9 - Amostras dos materiais constituintes do UHPC



a) Amostras em laboratório

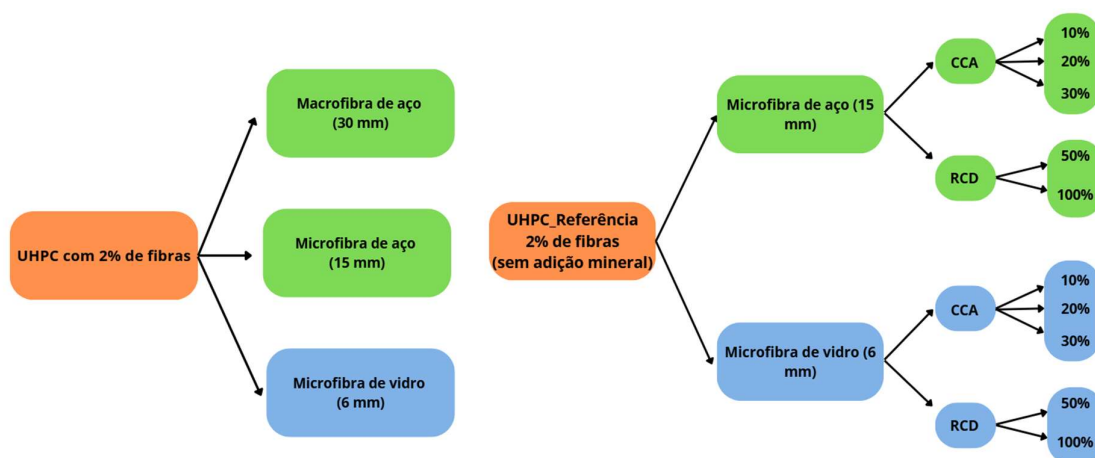
b) Tipos de materiais do UHPC

Fonte: Autor

O método de análise dos resultados foi expresso na Figura 10 através de um fluxograma que se deu nas seguintes etapas:

- a) Estudo do UHPC, onde se comparam os teores de 2% de macrofibra de aço, microfibra de aço e microfibras de vidro (Figura 10-a);
- b) Estudo do UHPC com as adições minerais, em que se comparam os resultados do concreto de ultra-alto desempenho sem adições minerais e com 2% de microfibras de aço e 2% de microfibras de vidro, juntamente com o UHPC com os mesmos teores de fibras, mas com adições minerais de CCA e RCD (Figura 10-b).

Figura 10 - Fluxograma das etapas de análise da pesquisa



- a) Análise entre diferentes tipos e tamanhos de fibras com teores de 2% e b) Análise entre UHPC com 2% de fibras de microfibras de aço cortadas e microfibras de vidro, com as adições minerais de CCA e RCD

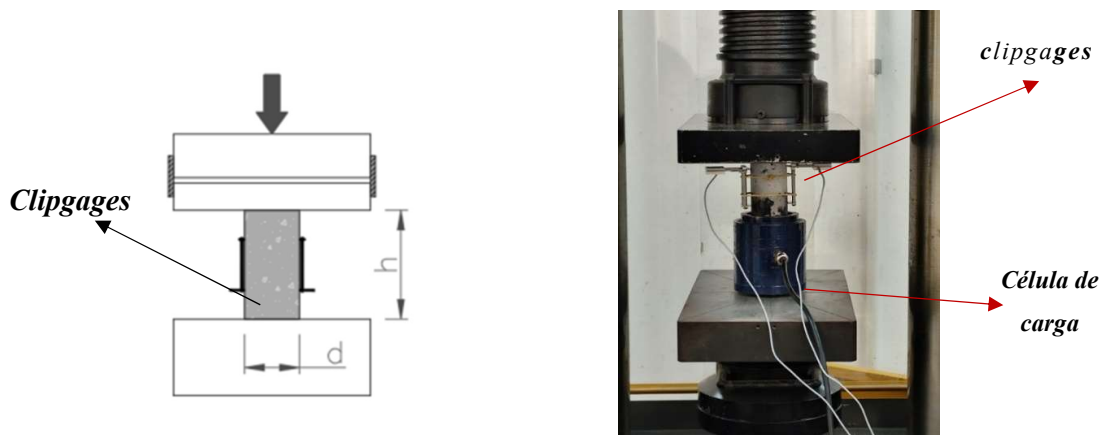
Fonte: Autor

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE - ABNT NBR 5739:2018 e ABNT NBR 8522:2021

A normativa ABNT NBR 5739:2018 determina procedimento de determinação da resistência à compressão axial de corpos de prova cilíndricos estabelecidos na ABNT NBR 5738. Para determinar o módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}), seguiram-se as diretrizes estipuladas na ABNT NBR 8522: 2021, na qual se utilizam somente os dados referentes ao trecho linear da curva tensão versus deformação, ao definir critérios de aparelhagem, acondicionamento e cálculo dos resultados.

A resistência à compressão foi calculada através da expressão proposta na ABNT NBR 5739: 2007 e o módulo de deformação secante (E_{cs}) foi determinado de acordo com os procedimentos estipulados pela ABNT NBR 8522: 2021 (Figura 11).

Figura 11 - Modelo do ensaio de compressão axial com o *clipgagem* acoplado



a) Esquema de um ensaio à compressão

b) Ensaio à compressão em
laboratório

Fonte: Adaptado de Prado (2020)

Para os cálculos do módulo de elasticidade, utilizam-se os sensores *clipgages* e a célula de carga, que monitoram, em tempo real, o deslocamento longitudinal do corpo de prova quando submetido à tensão de compressão axial, valores que são expressos no software e em planilhas.

4.3 TRAÇÃO INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - ABNT NBR 7222:2011

A norma ABNT NBR 7222:2011 descreve o ensaio de tração indireta, *brazilian test*, o corpo de prova cilíndrico é submetido a carregamentos na direção diametral, até a ruptura. A Equação 2 apresenta o cálculo da resistência à tração por compressão diametral.

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

Em que:

MPa – resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em MPa;

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

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

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

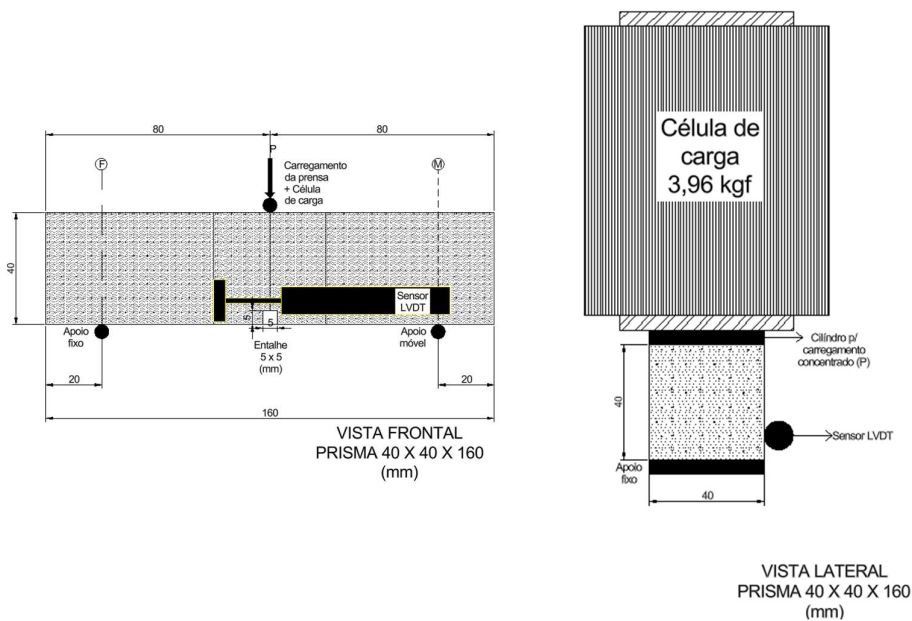
4.4 TRAÇÃO NA FLEXÃO POR TRÊS PONTOS - ABNT NBR 13279:2005

Ensaio de flexão de três pontos de vigas prismáticas de concreto, determina a resistência à tração na flexão pelo princípio da viga biapoiada com carga concentrada no centro do vão. O ensaio de flexão em 3 pontos para argamassa é normatizado pela NBR 13279:2005, que determina a resistência à tração na flexão e à compressão de argamassas de assentamento e revestimento. O método utiliza corpos de prova prismáticos (cm), aplicados em uma máquina de ensaio até a ruptura. O ensaio realizado determina a contribuição das fibras como reforço da seção após os processos de fissuração, classes de comportamento à tração.

A Figura 12 ilustra dimensões da amostra prismática, bem como as condições de apoio e o carregamento aplicado. Foi instalado um transdutor de deslocamento na face inferior para determinar o deslocamento na abertura do entalhe na região tracionada e plotar a curva de tensão *versus* deslocamento. Um entalhe central foi instalado no vão central do prisma (Figura 13), com 5 mm de espessura e 5 mm de altura, com a finalidade de induzir a ruptura na região central. Este entalhe foi realizado de forma manual com auxílio de uma serra de disco

diamantado. Foi colocada uma célula de carga sobre a amostra prismática a fim de registrar a força de ruptura.

Figura 12 - Esquema de carregamento e entalhe em um prisma para ensaio de flexão por 3 pontos



- a) Esquema do prisma de UHPC com sensor e célula de carga (Vista frontal)
- b) Esquema do prisma de UHPC com sensor e célula de carga (Vista lateral)

Fonte: Autor através do software AutoCAD

Figura 13 - Ensaio de flexão de 3 pontos com o sensor aplicado



Fonte: Autor

A Equação (3) ilustra o cálculo para determinar a tração na flexão em três pontos:

$$f_{ct,f} = \frac{1,5 * F_{m\acute{a}x} * L}{b * d^2} \quad (3)$$

Em que:

$f_{ct,f}$ – tração na flexão, em MegaPascal (MPa);

$F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima do ensaio, em Newton (N);

L – Comprimento do corpo de prova (120 mm);

b – largura do corpo de prova (40 mm);

d – comprimento da interface (35 mm).

4.5 DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL ATRAVÉS DA RETRAÇÃO – ABNT NBR 16834:2020

A norma ABNT NBR 16834:2020 aponta critérios necessários para a realização em laboratório de ensaios de retração ou expansão linear do concreto. As dimensões dos corpos de prova são apresentadas na Figura 14.

Figura 14 - Amostras de UHPC e equipamento para ensaio de retração



a) Amostras para ensaio de retração b) Dispositivo de ensaio

Fonte: O autor

Procedimento experimental descrito na ABNT NBR 16834:2020

1 – Assim que se desforma, identificar os corpos de prova, assinalando os moldes utilizados e fazer uma marcação orientativa nos corpos de prova que permita colocá-los sempre na mesma posição no aparelho comparador. As idades das leituras são contadas a partir da adição de água ao cimento durante a mistura do concreto;

2 – Antes de cada série de leitura, a barra padrão deve ser colocada no aparelho comparador e ter a leitura zerada;

3 – O corpo de prova deve ser colocado sempre na mesma posição, com um dos lados para cima, conforme identificação, e girado lentamente 360°.

Conforme o último parágrafo, caso ocorra alteração na leitura em função da rotação, os valores das leituras subsequentes das barras de concreto devem ser corrigidos pela medida da barra padrão.

4 – O valor de leitura adotado varia de acordo com o respectivo sinal no relógio comparador. Para o sinal positivo, deve-se ler o valor mais baixo apresentado e, para o negativo, deve ser lido o valor mais alto. As leituras devem ser arredondadas com exatidão de 0,001 mm;

5 – Efetuar a leitura inicial (L_0), registrando os valores obtidos e o momento em que essa medida foi tomada. Armazenar os corpos de prova em câmara úmida;

6 – Efetuar as leituras (L_t) de um dia, dois dias e sete dias, e manter os corpos de prova armazenados em câmara úmida até a idade de sete dias;

7 – Após a leitura de sete dias, armazenar os corpos de prova em câmara seca até a idade de 56 dias, conforme 5.1. Efetuar as leituras (L_t) de 14 dias, 28 dias e 56 dias, ou conforme especificado;

8 – Alterações na metodologia de cura devem constar no relatório de ensaio.

4.6 DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

O traço de referência foi definido segundo os estudos de Prado (2020) e Silva (2024) e apontado no Quadro 6. Este traço atendeu melhor às necessidades da pesquisa, na qual estabeleceu uma relação boa na trabalhabilidade do concreto, sem comprometer diretamente as propriedades mecânicas do UHPC.

Para todas as misturas, foram considerados 2% de macrofibra de aço, 2% de microfibra de aço e 2% de microfibras de vidro, conforme Quadro 6. Para estudar UHPC com CCA, será investigada a mistura de UHPC considerando a substituição da microssilica pela CCA nas proporções de 10%, 20% e 30%, conforme apresentado no Quadro 7. Para a mistura

de UHPC considerando o pó de RCD, foram considerados 50% e 100% de substituição no pó de quartzo, conforme apresentado no Quadro 8.

Quadro 6 - Traço da mistura do UHPC – traço de referência

Materiais	kg/m³ de concreto
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	757,2
Areia 80/100 (Mineração Jundu)	950
Pó de quartzo / SM 200 (Mineração Jundu)	50
Sílica ativa (Elkem)	230
Superplastificante (ADVA 585)	50,0
Água	160
Fibra de aço (2% em volume)	157,0
Fibra de vidro (2% em volume)	18,2

Fonte: Autor

Quadro 7 - Traços de UHPC com 10%, 20% e 30% de substituição de CCA por microssílica ativa

UHPC – Teor de 10% de CCA	
Materiais	kg/m ³ de concreto
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	757,2
CCA (10% da sílica ativa)	23
Areia 80/100 (Mineração Jundu)	950
Pó de quartzo / SM 200 (Mineração Jundu)	50
Sílica ativa (Elkem)	207
Superplastificante (ADVA 585)	50,0
Água	160
Fibra de aço (2% em volume)	157,0
Fibra de vidro (2% em volume)	18,2
UHPC – Teor de 20% de CCA	
Materiais	kg/m ³ de concreto
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	757,2
CCA (20% da sílica ativa)	46
Areia 80/100 (Mineração Jundu)	950
Pó de quartzo / SM 200 (Mineração Jundu)	50
Sílica ativa (Elkem)	184
Superplastificante (ADVA 585)	50,0
Água	160
Fibra de aço (2% em volume)	157,0
Fibra de vidro (2% em volume)	18,2
UHPC – Teor de 30% de CCA	
Materiais	kg/m ³ de concreto
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	757,2
CCA (30% da sílica ativa)	69
Areia 80/100 (Mineração Jundu)	950
Pó de quartzo / SM 200 (Mineração Jundu)	50
Sílica ativa (Elkem)	161
Superplastificante (ADVA 585)	50,0
Água	160
Fibra de aço (2% em volume)	157,0
Fibra de vidro (2% em volume)	18,2

Fonte: Autor

Quadro 8 - Traço de UHPC com substituição de pó de quartzo por RCD

UHPC – Teor de 50% de RCD	
Materiais	kg/m ³ de concreto
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	757,2
Pó de RCD	50
Areia 80/100 (Mineração Jundu)	950
Pó de quartzo / SM 200 (Mineração Jundu)	0
Sílica ativa (Elkem)	230
Superplastificante (ADVA 585)	50,0
Água	160
Fibra de aço (2% em volume)	157,0
Fibra de vidro (2% em volume)	18,2
UHPC – Teor de 100% de RCD	
Materiais	kg/m ³ de concreto
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	757,2
Pó de RCD	25
Areia 80/100 (Mineração Jundu)	950
Pó de quartzo / SM 200 (Mineração Jundu)	25
Sílica ativa (Elkem)	230
Superplastificante (ADVA 585)	50,0
Água	160
Fibra de aço (2% em volume)	157,0
Fibra de vidro (2% em volume)	18,2

Fonte: Autor

O preparo do concreto é em uma argamassadeira, com 3 velocidades, e consiste em:

- 1) Adicionar a areia e 10% de água, misturar por um minuto;
- 2) Acrescente o restante dos materiais secos (pó de quartzo, sílica ativa, cimento Portland, CCA ou RCD) e 75% de água, ligar por cinco minutos;
- 3) Incorporar aos poucos o restante da água e superplastificante, aumentar a velocidade e misturar por dez minutos;
- 4) Adicionar as fibras e ligar por mais cinco minutos.

A Figura 15 e o Quadro 9 apresentam os resultados do espalhamento do UHPC no estado fresco após a mistura. O ensaio foi realizado por meio de mesa de espalhamento, na qual a mistura é moldada em um tronco de cone e, em seguida, submetida a 30 quedas da mesa, conforme preconiza a ABNT NBR 15823:2017. Após o procedimento, determina-se o diâmetro médio de espalhamento, utilizado como indicador da consistência da mistura.

Figura 15 - Ensaio de espalhamento do UHPC



a) UHPC com microfibras de aço e 10% CCA



b) UHPC com 2% de microfibras de vidro

Fonte: Autor

Quadro 9 - Espalhamento dos traços de UHPC

Espalhamento (mm)	Tipo de fibra	Tipo de UHPC	Espalhamento (mm)	Tipo de fibra	Tipo de UHPC	
≤ 250	Microfibra de vidro	Referência	≤ 270 < 1	Macrofibra de aço	Referência	
		50% RCD		Microfibra de aço	Referência	
20% CCA		Microfibra de vidro		10% CCA		
250 ≤ l ≤ 260		Microfibra de aço		30% CCA	Microfibra de aço	20% CCA
				100% RCD		50% RCD
	10% CCA			100% RCD		
	30% CCA	-				

Fonte: Autor

O Quadro 9 apresenta os valores de espalhamento dos diferentes traços de UHPC em função do tipo de fibra e da composição da matriz. Observa-se que os traços reforçados com

microfibra de vidro tendem a apresentar menores valores de espalhamento, com resultados iguais ou inferiores a 250 mm e, em alguns casos, situando-se no intervalo entre 250 e 260 mm, indicando uma redução na fluidez da mistura. Os compósitos contendo fibras de aço, tanto micro quanto macro, apresentam maiores valores de espalhamento, que atingem valores de até 270 mm, o que sugere melhor trabalhabilidade. Verifica-se que a incorporação de cinza da casca de arroz (CCA) e de resíduo de construção e demolição (RCD) não compromete significativamente a fluidez quando associada às fibras de aço, enquanto, nos compósitos com fibras de vidro, observa-se uma tendência de maior sensibilidade à redução do espalhamento.

A moldagem foi estabelecida segundo o Quadro 10, ilustrando as dimensões dos corpos de prova, o volume de concreto e a quantidade mínima de amostras para cada ensaio. A ilustra os corpos de prova de UHPC com RCD (Figura 16 - a) e com o RCD (Figura 16 - b). Enquanto o UHPC com o pó de RCD apresenta a coloração mais clara, mais próxima de uma argamassa comum, o UHPC com CCA é mais escuro, devido à cor mais escura da cinza. Os corpos de prova para retração ficaram em câmara úmida, com umidade relativa de $U = 95\%$, em uma temperatura de 30 ± 2 °C as amostras dos outros ensaios ficaram em cura submersa. Todas as amostras ficaram em cura aos 28 dias, para a realização do procedimento de ensaio e, no caso da retração, até 56 dias.

Figura 16 - Amostras cilíndricas de concreto de ultra-alto desempenho



a) Corpos de prova de UHPC com RCD



b) Corpos de prova de UHPC com CCA

Quadro 10 - Dimensões das amostras de acordo com os ensaios determinados

Ensaio	Formato do molde	Dimensão (cm)	CPs mínimos
Compressão axial (28 dias)	Cilíndrico	5x10	6
Tração diametral	Cilíndrico	5x10	6
Retração	Prismático	7,5x7,5x29	3
Flexão de 3 pontos	Prismático	4x4x16	6

Fonte: Autor

Ao todo neste trabalho, foram moldados aproximadamente 331 corpos de prova, sendo 267 utilizados exclusivamente nesta pesquisa. Para a análise dos resultados, utilizaram-se as 3 amostras de cada ensaio de característica mecânica, totalizando 84 corpos de prova, dos quais 3 apresentaram o melhor coeficiente de variação.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DO UHPC

A análise da composição química do pó de quartzo, sílica ativa não densificada, cimento CPV e sílica de casca de arroz foi realizada por meio de fluorescência de raios X no Laboratório de Caracterização Química da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-USP), em equipamento Axios MAX, marca PANalytical, conforme apresentado no Quadro 11.

Os dados apresentados indicam que a sílica de casca de arroz apresenta concentração significativa de SiO_2 . O processo de queima da casca de arroz ocorre em uma caldeira horizontal, utilizada para a geração de energia. A casca de arroz serve como combustível, e a queima é realizada a uma temperatura média de 800 °C. A caldeira opera com

um sistema automatizado que regula a alimentação das grelhas e a entrada de oxigênio. Durante a pesquisa, o grau de amorficidade dos materiais listados na Quadro 13 está sendo analisado.

A caracterização química dos materiais evidencia diferenças relevantes na composição de óxidos, especialmente no teor de dióxido de silício (SiO_2), que auxilia na reatividade pozolânica e no desempenho das matrizes cimentícias. A microsilica apresenta elevado teor de SiO_2 (96,22%) e baixas concentrações dos demais óxidos, como Al_2O_3 (0,12%), Fe_2O_3 (0,16%) e CaO (0,27%), configuração típica deste subproduto industrial proveniente da produção de silício metálico. O elevado teor de sílica amorfa confere ao material alta atividade pozolânica, o que favorece a reação com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland e contribui para a formação adicional de silicatos de cálcio hidratados (C–S–H), responsáveis pelo ganho de resistência e pela densificação da microestrutura da matriz cimentícia.

A sílica da casca de arroz apresenta elevado teor de SiO_2 (87,42%), o que aponta potencial comportamento pozolânico. Observa-se a presença relativamente mais significativa de óxidos alcalinos, especialmente K_2O (0,96%), e uma perda ao fogo (P.F.) de 8,83%, que pode estar associada à presença de carbono residual ou matéria orgânica remanescente do processo de queima da biomassa. Tais fatores podem influenciar tanto a reatividade quanto o comportamento reológico da mistura, embora a elevada concentração de sílica ainda indique potencial contribuição para reações secundárias de formação de C–S–H.

O pó de quartzo apresenta o maior teor de SiO_2 entre os materiais analisados (98,90%), e teores pouco significativos dos demais óxidos. Esta composição indica um material predominantemente cristalino e quimicamente estável, com baixa ou inexistente atividade pozolânica. Desta forma, sua principal contribuição na matriz cimentícia ocorre por meio de efeitos físicos, especialmente como material de preenchimento (*filler*), o que promove melhor empacotamento das partículas e redução da porosidade da matriz, aspecto particularmente relevante em concretos de ultra-alto desempenho (UHPC).

O cimento CPV-ARI apresenta composição química característica de cimentos Portland de alta resistência inicial, com elevado teor de CaO (58,85%), principal responsável pela formação das fases hidratadas durante o processo de hidratação, especialmente os silicatos de cálcio hidratados (C–S–H). Observa-se a presença de SiO_2 (21,73%), Al_2O_3 (5,27%) e Fe_2O_3 (4,20%), que participam da formação das fases minerais do clínquer, como alita, belita, aluminatos e ferritas. O teor de SO_3 (5,95%) está associado à presença de sulfatos adicionados

para controle do tempo de pega, enquanto pequenas quantidades de MgO e outros óxidos são comuns na composição deste tipo de cimento.

O resíduo de construção e demolição (RCD) apresenta uma composição química mais heterogênea, com teores expressivos de SiO₂ (48,20%), CaO (17,50%) e Fe₂O₃ (9,10%), e concentrações relevantes de Al₂O₃ (8,90%) e MgO (4,40%). Tal composição sugere a presença combinada de fases provenientes de materiais cerâmicos, argamassas e concretos previamente hidratados. A perda ao fogo de 6,60% indica ainda a presença de carbonatos e possíveis materiais orgânicos ou hidratados. Do ponto de vista de aplicação em materiais cimentícios, o RCD pode apresentar comportamento parcialmente reativo, especialmente devido à presença de fases amorfas ou parcialmente hidratadas, além de contribuir para o efeito de preenchimento granular. Sua heterogeneidade química pode influenciar o desempenho mecânico e a durabilidade das matrizes cimentícias, o que exige controle adequado de sua granulometria e composição.

Quadro 11 - Análise de caracterização dos materiais utilizados

Microsílica		Cinza de Casca de Arroz (CCA)		Pó de Quartzo		Cimento CPV		Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	
Al ₂ O ₃	0,12%	Al ₂ O ₃	0,07%	Al ₂ O ₃	0,23%	Al ₂ O ₃	5,27%	Al ₂ O ₃	8,90%
Br	0,07%	Br	0,05%	Br	0,05%	Br	0,08%	Na ₂ O	0,20%
CaO	0,27%	CaO	0,55%	CaO	0,06%	CaO	58,85%	CaO	17,50%
Cl	0,53%	Cl	-	Cl	0,18%	Cl	-	MnO	1,20%
Fe ₂ O ₃	0,16%	Fe ₂ O ₃	0,26%	Fe ₂ O ₃	0,18%	Fe ₂ O ₃	4,20%	Fe ₂ O ₃	9,10%
K ₂ O	0,97%	K ₂ O	0,96%	K ₂ O	-	K ₂ O	0,59%	K ₂ O	0,90%
MgO	0,59%	MgO	0,49%	MgO	0,21%	MgO	1,54%	MgO	4,40%
MnO	-	MnO	0,48%	MnO	-	MnO	0,08%	MnO	1,20%
Na ₂ O	0,42%	Na ₂ O	0,18%	Na ₂ O	-	Na ₂ O	0,79%	Na ₂ O	0,20%
P ₂ O ₅	0,28%	P ₂ O ₅	0,55%	P ₂ O ₅	0,06%	P ₂ O ₅	0,29%	P ₂ O ₅	0,70%
SiO ₂	96,22%	SiO ₂	87,42%	SiO ₂	98,90%	SiO ₂	21,73%	SiO ₂	48,20%
SO ₃	0,37%	SO ₃	0,16%	SO ₃	0,13%	SO ₃	5,95%	SO ₃	1,50%
SrO	-	SrO	-	SrO	-	SrO	0,40%	LOI	6,60%
TiO ₂	-	TiO ₂	-	TiO ₂	-	TiO ₂	0,23%	-	-
P.F.	-	P.F.	8,83%	P.F.	-	P.F.	-	-	-

Fonte: Laboratório de Caracterização Química da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-USP)

Os resultados da análise cristalográfica por difração de raios X (XRD) são apresentados na Figura 17. Observa-se que tanto a microsílica quanto a cinza de casca de arroz

(CCA) são constituídas predominantemente por dióxido de silício em fase amorfa. A análise revelou a presença de um amplo halo amorfo na faixa entre 10° e 40° (2θ), identificado tanto para a CCA (Figura 17 - a) quanto para a microssílica (Figura 17 - b). Na microssílica (Figura 17 - b), este halo não apresenta picos cristalinos, o que caracteriza uma estrutura totalmente amorfa.

A CCA exibe um pico difratado na mesma faixa angular, associado à presença de sílica cristalina em sua composição. A partir do cálculo da área sob o halo amorfo para estimativa do grau de amorficidade (GA), conforme Equação 1, obteve-se GA de 100% para a SF, enquanto a CCA apresenta valor de 80%, o que evidencia que a microssílica não é completamente amorfa.

As análises do cimento (Figura 17 - c) e do pó de quartzo (Figura 17 - d) não mostram halos amorfos significativos, o que confirma que a sílica presente nesses materiais ocorre majoritariamente na forma cristalina.

A análise dos difratogramas obtidos por difração de raios X (DRX) permite identificar não apenas as fases mineralógicas presentes, mas também inferir o grau de cristalinidade dos materiais analisados.

No caso da cinza de casca de arroz (Figura 17 - a), observa-se a presença de um halo difuso centrado aproximadamente em $2\theta \approx 22^\circ$, característico da sílica amorfa, o que indica elevada desordem estrutural, típica de materiais pozolânicos altamente reativos, uma vez que a ausência de estrutura cristalina definida favorece a dissolução da sílica e sua posterior reação com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento.

A microssílica (Figura 17 - b) apresenta um pico mais pronunciado associado ao SiO_2 , sugerindo a presença predominante de sílica, com indícios de pequenas fases cristalinas residuais. A estrutura predominantemente amorfa deste material mantém elevado seu potencial de atividade pozolânica.

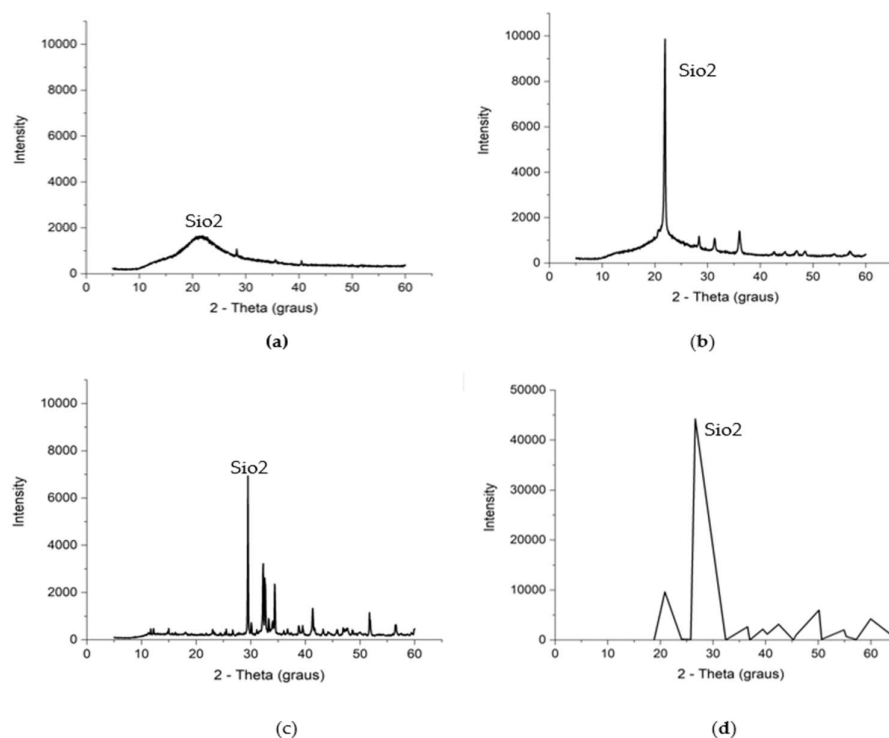
O difratograma do cimento Portland (Figura 17 - c) apresenta múltiplos picos intensos e bem definidos, característicos de materiais cristalinos, associados principalmente às fases do clínquer, como alita (C_3S) e belita (C_2S), responsáveis pelas reações de hidratação e pelo desenvolvimento da resistência mecânica do material.

O pó de quartzo (Figura 17 - d) apresenta picos estreitos e intensos atribuídos ao SiO_2 cristalino, o que aponta elevada cristalinidade e baixa reatividade química. Diferentemente dos materiais pozolânicos, o quartzo atua predominantemente como material inerte na matriz

cimentícia e contribui principalmente para o empacotamento de partículas e para a redução da porosidade da matriz.

A comparação entre os difratogramas evidencia que materiais ricos em sílica podem apresentar comportamentos distintos dependendo de sua estrutura cristalina. A sílica amorfa, observada na cinza de casca de arroz e na microsílica, apresenta elevada reatividade pozolânica e o quartzo cristalino apresenta baixa reatividade, atuando essencialmente como *filler*. Esta diferença estrutural destaca a importância da caracterização cristalográfica para a compreensão do papel de cada material no desempenho das matrizes cimentícias.

Figura 17 - Resultados da análise cristalográfica por difração de raios X (DRX) dos materiais cimentantes: (a) Cinza de casca de arroz; (b) Microsílica; (c) Cimento; (d) Pó de quartzo.



Fonte: Autor

$$GA (\%) = \left(\frac{A_{amorfa}}{A_{amorfa} + A_{cristalina}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que:

A_{amorfa} – área do gráfico em que ocorre a curva de característica amorfa;

$A_{cristalina}$ – área do gráfico, com picos, que indicam propriedades cristalinas de um material.

5.1.1 Análise granulométrica dos materiais utilizados na produção do CAR e UHPC

A Figura 18 mostra a distribuição granulométrica da cinza de casca de arroz (CCA), da areia fina, do pó de quartzo, da microsilica e do cimento CPV ARI obtida por análise a laser, expressa em termos de densidade numérica (%) em função da classe de tamanho das partículas (μm).

Nota-se que as partículas da CCA se concentram predominantemente entre 1 μm e 10 μm (Figura 18 - a), com um pico máximo de frequência próximo de 2–3 μm , na qual o valor máximo de número relativo de partículas atinge cerca de 15-16%, o que indica que existe uma concentração elevada de partículas em torno deste diâmetro. A distribuição relativamente estreita sugere que a maior parte do material apresenta tamanho médio de partículas micrométricas, sem grande heterogeneidade. A distribuição granulométrica da cinza de casca de arroz (CCA) demonstra boa finura para ser usada em compósitos cimentícios como material pozolânico.

Na Figura 18 - b é apresentada a distribuição granulométrica da areia fina, que mostra um pico bem definido em torno de 10 μm , que aponta que a maior parte das partículas do material possui dimensões próximas a este valor, sendo que a concentração máxima atinge aproximadamente 21%, o que mostra uma distribuição relativamente estreita em torno do diâmetro médio. Após o pico, observa-se uma cauda longa que se estende até a faixa de 100–1000 μm , o que demonstra uma presença de partículas maiores ou aglomerados, ainda que em menor quantidade. Tal característica sugere que seu papel em matrizes cimentícias será mais associado ao efeito de empacotamento e *filler* do que à atividade pozolânica intensiva.

A Figura 18 - c mostra que o pico máximo da distribuição granulométrica do pó de quartzo ocorre em torno de 2 μm , com densidade próxima de 18%, o que indica que a maior parte das partículas se concentra na faixa de 1–3 μm . A curva é estreita e concentrada em partículas finas, o que mostra que o material é predominantemente micrométrico, o que demonstra que tal material tende a contribuir pelo efeito *filler*, capaz de promover maior compacidade e resistência mecânica, visto que o resultado da análise cristalográfica por difração de raios X indica que a sílica presente na mistura é cristalina.

As partículas da microssílica (Figura 18 - d) apresentam um pico de distribuição granulométrica em torno de 0,15–0,25 μm , com densidade máxima de aproximadamente 20–21%. Isso indica que a quase totalidade das partículas encontra-se na faixa submicrométrica (<1 μm). A curva é estreita e concentrada, sugerindo elevada homogeneidade no tamanho das partículas, o que reforça o caráter ultrafino do material, pois quase não há partículas acima de 1 μm .

Pode-se notar que a microssílica usada como adição mineral é considerada de altíssima eficiência em compósitos cimentícios, pois atua de forma combinada: quimicamente, como pozolana altamente reativa; fisicamente, como *filler*, otimizando o empacotamento de partículas.

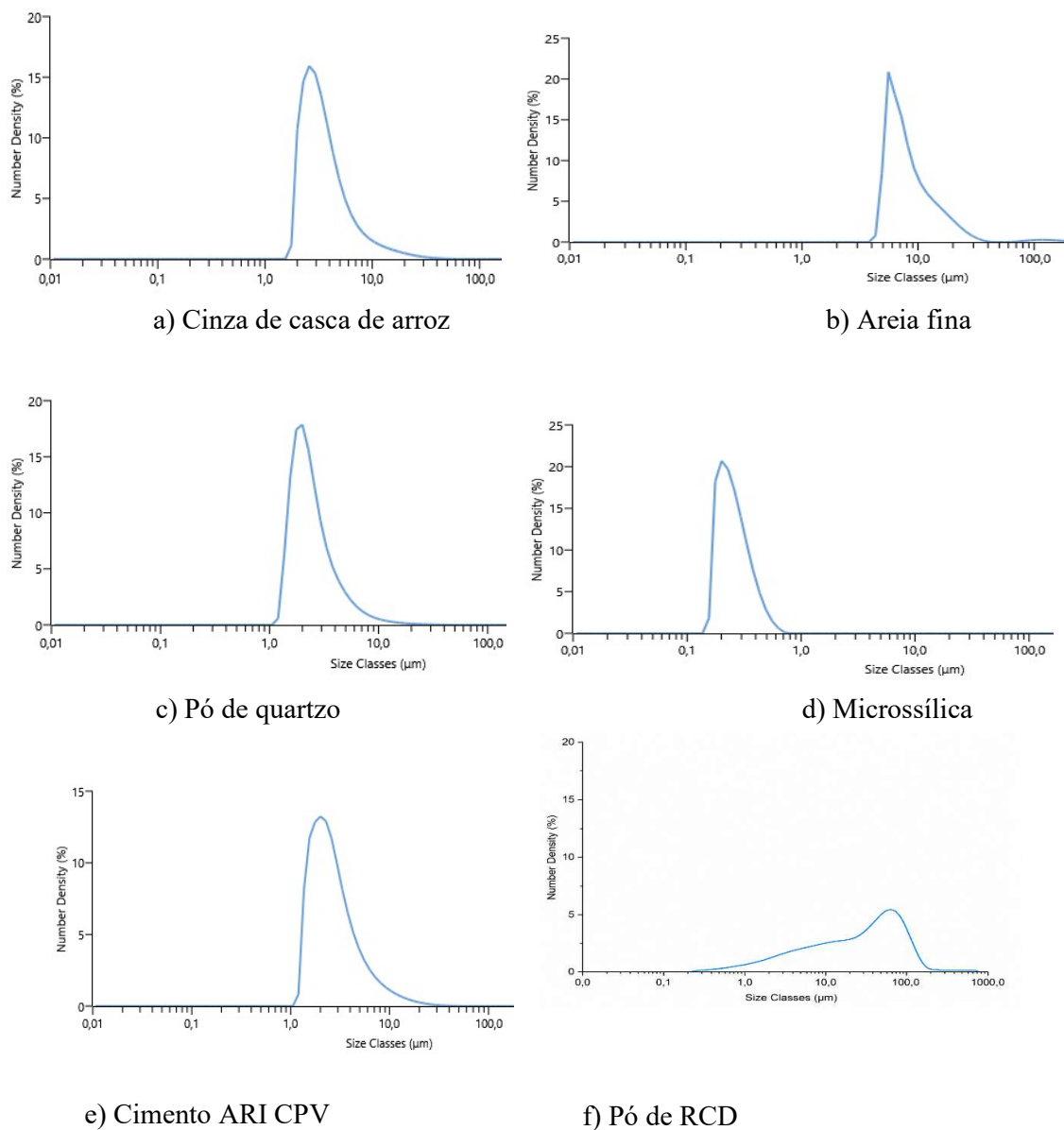
A distribuição granulométrica do cimento é mostrada na Figura 19 - e, na qual o pico máximo ocorre próximo de 2 μm , e atinge uma densidade de aproximadamente 13–14%. A maior parte das partículas está concentrada entre 1 μm e 5 μm . Diante dos resultados, o cimento tende a contribuir mais pelo efeito *filler* e pelo aumento da compacidade do que pela reatividade química intensa, embora possa apresentar comportamento pozolânico relevante dependendo de sua composição química.

A forma sigmoideal da curva indica uma distribuição granulométrica típica de materiais pulverizados, que reflete um processo de moagem que gera partículas com diferentes dimensões e contribui para um arranjo granulométrico relativamente contínuo.

A presença de partículas em diferentes faixas de tamanho pode favorecer o empacotamento granular do material quando incorporado a matrizes cimentícias, uma vez que partículas menores tendem a preencher os vazios entre partículas maiores. A granulometria observada para o pó de RCD sugere potencial para atuar como material de preenchimento na matriz do compósito e pode contribuir para a organização da estrutura granular a fim de influenciar propriedades físicas e microestruturais do material resultante.

Uma areia fina industrial com partículas máximas de 0,42 mm e módulo de finura de 0,8 mm foi usada na mistura. O Quadro 12 aponta as características de superfície específica, densidade da sílica ativa, CCA e pó de quartzo.

Figura 18 - Resultados da análise cristalográfica por difração de raios X (DRX) dos materiais cimentantes



Fonte: Autor

A análise da distribuição granulométrica do pó de RCD (18 – f) indica uma ampla faixa de tamanhos de partículas, característica comum de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição submetidos a processos de britagem e moagem.

Observa-se que a curva apresenta crescimento progressivo do percentual acumulado ao longo da faixa granulométrica analisada, o que indica uma distribuição relativamente contínua de partículas, sem descontinuidades abruptas. A maior concentração de partículas encontra-se predominantemente na faixa intermediária de tamanho, entre 10 μm e 150 μm , intervalo no qual ocorre o aumento mais acentuado da curva granulométrica, comportamento que sugere distribuição granulométrica relativamente ampla, com presença simultânea de partículas finas e médias.

Quadro 12 - Densidade e superfície específica dos materiais

Material	Densidade (kg/m^3)	Superfície específica (m^2/kg)
CCA	2.000	2.260
Microsílica Ativa	2.200	1.790
Pó de quartzo	234	2.700
RCD	2.714,8	3.100

Fonte: Autor

O Quadro 12 apresenta os valores de densidade e superfície específica dos materiais utilizados nas misturas de UHPC, evidenciando diferenças significativas entre os constituintes.

Observa-se que o resíduo de construção e demolição (RCD) apresenta a maior densidade (2714,8 kg/m^3), seguido pela microssílica ativa (2200 kg/m^3) e pela cinza da casca de arroz (CCA) (2000 kg/m^3), enquanto o pó de quartzo apresenta valor significativamente inferior.

Em relação à superfície específica, o RCD também se destaca com o maior valor (3100 m^2/kg), seguido pelo pó de quartzo (2700 m^2/kg), CCA (2260 m^2/kg) e microssílica ativa (1790 m^2/kg). Tais resultados indicam que materiais com maior área específica tendem a apresentar maior interação com a matriz cimentícia, influenciando diretamente a demanda de água e o comportamento reológico das misturas.

A combinação entre densidade e superfície específica exerce função de auxiliar no empacotamento de partículas, com capacidade de contribuir para a compacidade da matriz e,

consequentemente, para o desempenho mecânico do UHPC a adequada seleção e combinação desses materiais tornam-se essenciais para a otimização da microestrutura e das propriedades no estado fresco e endurecido do compósito.

5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos são apresentados e discutidos nos subcapítulos subsequentes, de acordo com o tipo de fibra e a adição mineral correlacionados.

Os corpos de prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, destinados aos ensaios de compressão axial, tiveram suas bases previamente regularizadas em máquina de retífica, a fim de garantir o adequado paralelismo e a aplicação uniforme do carregamento. Para os ensaios de compressão diametral, realizados em corpos de prova cilíndricos de dimensões semelhantes, não houve necessidade de retificação das bases, uma vez que a seção longitudinal da peça é o elemento determinante nesse tipo de ensaio.

Os ensaios de flexão em três pontos foram conduzidos em prismas com seção transversal de 4 cm $\times$ 4 cm e comprimento de 16 cm. As bases de apoio foram posicionadas a 2 cm das extremidades da peça, com entalhe central de 5 mm na face inferior e marcação do centro da face superior, local onde foi aplicada a carga concentrada.

5.2.1 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial

No contexto das propriedades mecânicas avaliadas, este subitem apresenta e discute os resultados dos ensaios de compressão axial e do módulo de elasticidade do UHPC. A análise concentra-se na influência do tipo de fibra e no efeito da incorporação de adições minerais na matriz cimentícia, permitindo avaliar o desempenho mecânico do material aos 28 dias de idade. Inicialmente, comparam-se os resultados obtidos para os diferentes tipos de fibras, estabelecendo-se um comportamento de referência, seguido pela avaliação dos efeitos da cinza de casca de arroz e do resíduo de construção e demolição nos compósitos reforçados.

O ensaio de compressão axial foi realizado em prensa universal do tipo INSTRON, com controle de deslocamento e velocidade de carregamento de 100 mm/s. A ruptura dos corpos de prova ocorreu de forma abrupta, caracterizada por um estalo audível, o que indica comportamento típico de materiais de alta resistência.

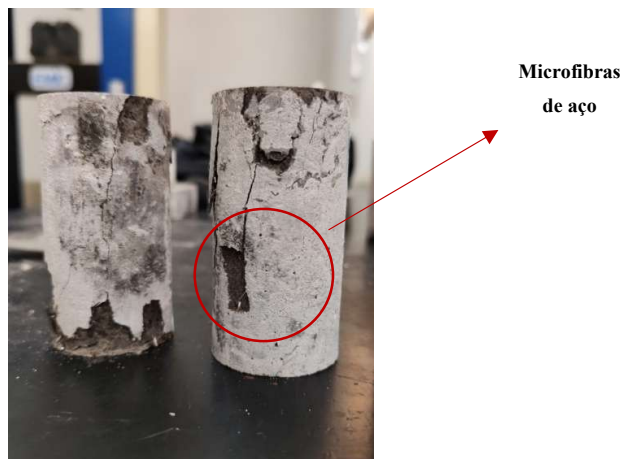
As fissuras observadas desenvolvem-se predominantemente da base ao topo dos corpos de prova, com orientação aproximadamente perpendicular à base, conforme ilustrado na Figura 19. A presença das fibras de aço (macrofibra e microfibra) atua de forma significativa na contenção da fragmentação, impedindo a completa desintegração do UHPC e contribuindo para a manutenção da integridade geométrica dos corpos de prova após a ruptura.

A Figura 19-b apresenta o estado das amostras de UHPC contendo 2% de microfibra de aço após a ruptura. Observa-se que a atuação do reforço fibroso evidencia diretamente o padrão de fissuração no comportamento pós-ruptura, o que indica diferenças associadas à composição da matriz e ao tipo de fibra empregada.

Figura 19 - Amostras cilíndricas de UHPC com microfibra de aço aos 28 dias de idade



a) Antes da ruptura



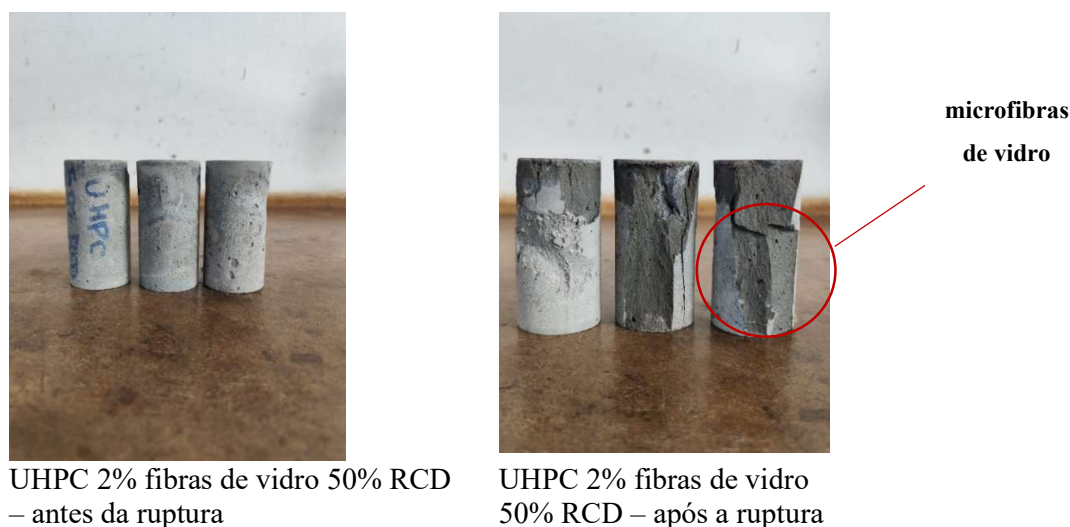
b) UHPC após a ruptura

Fonte: Autor

A Figura 20 apresenta o estado dos corpos de prova de UHPC reforçados com 2% de microfibra de vidro. Observa-se que a ruptura ocorre de forma abrupta, caracterizada por

estalo intenso e acentuada segregação dos constituintes, resultando na separação de fragmentos em relação ao corpo principal. Tal comportamento contrasta com o observado nos compósitos reforçados com macrofibras ou microfibras de aço, nos quais a atuação do reforço fibroso contribui para maior contenção da fragmentação e preservação parcial da integridade pós-ruptura.

Figura 20 - Corpos de prova de UHPC com microfibra de vidro aos 28 dias



Fonte: Autor

5.2.1.1 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial – Análise do UHPC com fibras de vidro e aço

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade tangencial aos 28 dias de idade são apresentados no Quadro 13, onde se estabelece a comparação entre o UHPC reforçado com macrofibra de aço, microfibra de aço e microfibra de vidro, considerando suas propriedades mecânicas de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial (módulo de Young).

Observa-se que as resistências à compressão apresentam diferenças relativamente pouco significativas entre os compósitos analisados, entre as fibras de aço, com desempenho

ligeiramente superior para o UHPC reforçado com microfibras de aço. As fibras de vidro apresentam valores de resistência média à compressão inferiores aos dos compósitos com 2% de macrofibra de aço e microfibra de aço. As Figuras 21-a e 21-b mostram a representação gráfica dos resultados de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial, respectivamente, na qual se permite melhor visualização comparativa do comportamento mecânico dos diferentes tipos de reforço fibroso.

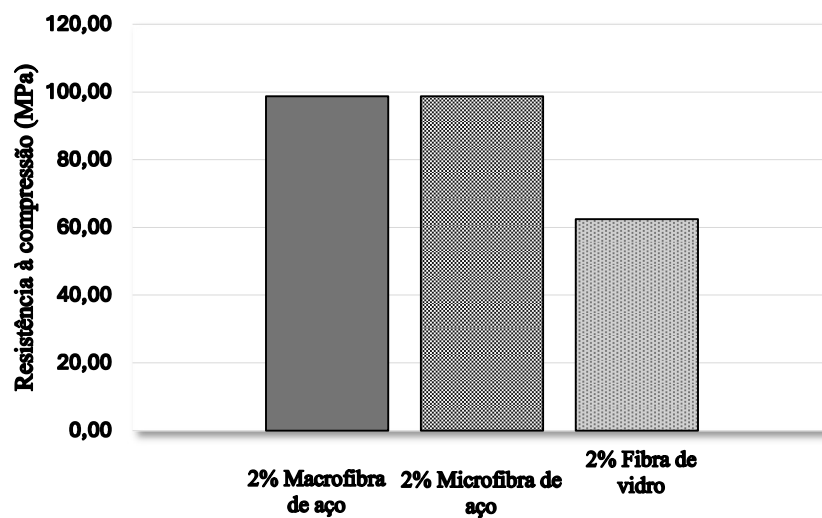
Quadro 13 - Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade do UHPC reforçado com 2% de fibras

2% de Fibras	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	2% de Fibras	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	2% de Fibras	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Macrofibra de aço	89,32	38,64	Microfibra de aço	100,81	38,79	Microfibra de vidro	48,51	50,10
	95,32	42,93		97,55	34,19		66,24	47,44
	97,82	38,66		97,82	39,07		72,43	42,57
Média	94,15	40,08	Média	98,73	37,35	Média	62,39	46,70
Desvio Padrão	4,37	2,47	Desvio Padrão	1,81	2,74	Desvio Padrão	12,42	3,82
Coef. de variação (%)	4,64	6,17	Coef. de variação (%)	1,83	7,33	Coef. de variação (%)	19,90	8,18

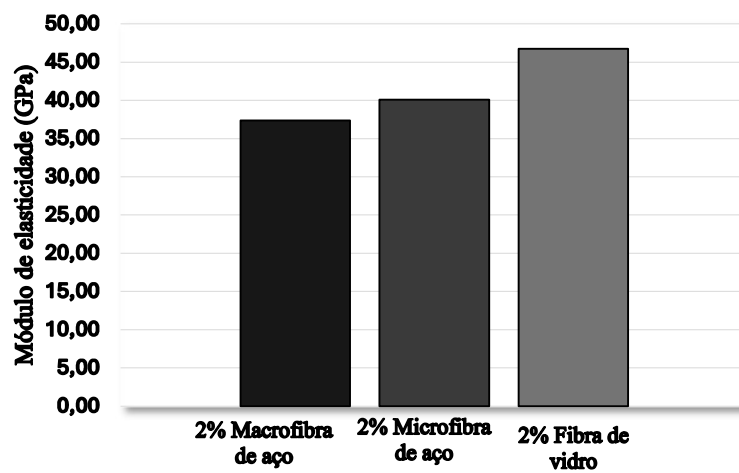
Fonte: Autor

A análise sugere que o tipo de fibra exerce influência significativa tanto nos valores médios obtidos quanto na variabilidade dos resultados experimentais. O estudo conjunto destes resultados permite antecipar que o comportamento mecânico observado está diretamente relacionado ao tipo de fibra empregada e à sua interação com a matriz cimentícia. As diferenças nos valores médios de resistência à compressão axial não são expressivas, mas variações na distribuição, no diâmetro e no peso específico das fibras tendem a influenciar a eficiência do reforço, especialmente quanto à homogeneidade do compósito e ao mecanismo de restrição da fissuração.

Figura 21 - Resistência à compressão média e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC com diferentes tipos de fibras



a) Compressão axial (MPa)



b) Módulo de elasticidade (GPa)

Fonte: Autor

O UHPC com microfibras de aço apresenta maior resistência média à compressão, atingindo aproximadamente 98,7 MPa, além do menor coeficiente de variação ($\approx 1,8\%$), o que indica elevada homogeneidade do material. Este comportamento pode ser associado à melhor dispersão das microfibras metálicas na matriz, favorecida pelo menor diâmetro e pela maior compatibilidade reológica com a pasta cimentícia, o que contribui para um mecanismo mais eficiente de confinamento da matriz e para o possível retardamento da propagação de microfissuras.

O UHPC reforçado com macrofibras de aço apresenta resistência média inferior ($\approx 94,2$ MPa) e maior variabilidade em comparação às microfibras de aço. Tal comportamento sugere que o maior diâmetro e o peso específico elevado das macrofibras favorecem fenômenos de segregação e distribuição não uniforme ao longo do corpo de prova, o que compromete a eficiência do reforço fibroso sob compressão axial.

A análise do UHPC com microfibras de vidro apresenta menor resistência média à compressão, da ordem de 62,4 MPa, além do maior coeficiente de variação ($\approx 19,9\%$), o que indica menor contribuição estrutural das fibras de vidro no comportamento compressivo do UHPC, bem como maior sensibilidade à heterogeneidade da matriz. A menor rigidez e resistência individual das fibras de vidro, quando comparadas às fibras de aço, limitam sua capacidade de restrição das deformações e de controle da fissuração sob estados de compressão elevada.

Ao comparar os resultados em função do tipo de fibra empregada, observa-se que o UHPC reforçado com macrofibras de aço apresenta resistência à compressão axial aproximadamente 50,9% superior à do UHPC com microfibras de vidro. O compósito contendo 2% de microfibra de aço apresenta resistência à compressão cerca de 58,2% superior à observada no material reforçado com 2% de fibras de vidro, o que demonstra um desempenho mecânico mais elevado do que os sistemas reforçados com fibras de aço. O comportamento elástico desses compósitos apresenta particularidades relevantes, o que torna necessária a análise do módulo de elasticidade, com a finalidade de compreender de forma mais abrangente a influência do tipo de fibra no desempenho global do UHPC.

Observa-se tendência distinta quando se trata da análise dos resultados do módulo de elasticidade. O UHPC com microfibra de vidro apresenta os maiores valores médios ($\approx 46,7$ GPa), enquanto os compósitos com fibras de aço apresentam módulos próximos entre si, os quais variam entre 37 e 40 GPa, uma queda de aproximadamente 20% e 14,2% respectivamente. Tal comportamento sugere que, apesar da menor resistência à compressão, a presença de

microfibras de vidro contribui para o aumento da rigidez global do compósito, possivelmente devido à elevada rigidez elástica do vidro e à interação fibra–matriz em níveis de deformação reduzidos.

Desta forma, os resultados evidenciam que o desempenho mecânico do UHPC depende fortemente do tipo de fibra empregada. As microfibras de aço mostram-se mais eficientes para maximizar resistência e uniformidade sob compressão, enquanto as macrofibras de aço apresentam desempenho intermediário, limitado por efeitos de segregação. As microfibras de vidro contribuem para o aumento do módulo de elasticidade, mesmo com prejuízo significativo da resistência à compressão e maior dispersão dos resultados.

5.2.1.2 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial – Análise do UHPC com CCA e RCD com microfibras de aço ou vidro.

O Quadro 14 apresenta a relação dos traços de UHPC reforçado com microfibras de aço e teores de 10%, 20% e 30% de adição mineral de cinza de casca de arroz como substituição parcial na composição de sílica ativa em seu traço.

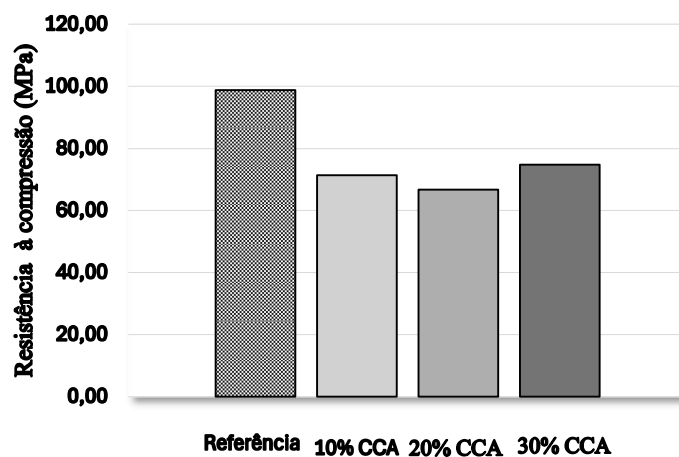
Quadro 14 - Resistência à compressão axial média e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC reforçado com microfibras de aço

Teor CCA (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Teor CCA (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Teor CCA (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
10% de CCA	82,23	46,54	20% de CCA	69,15	25,37	30% de CCA	80,50	54,90
	66,72	45,23		65,39	38,68		78,56	46,90
	64,97	44,24		65,58	54,87		65,08	48,54
Média	71,30	45,34	Média	66,71	39,64	Média	74,71	50,11
Desvio Padrão	9,50	1,15	Desvio Padrão	2,11	14,77	Desvio Padrão	8,40	4,23
Coef. de variação (%)	13,32	2,54	Coef. de variação (%)	3,17	37,27	Coef. de variação (%)	11,24	8,43

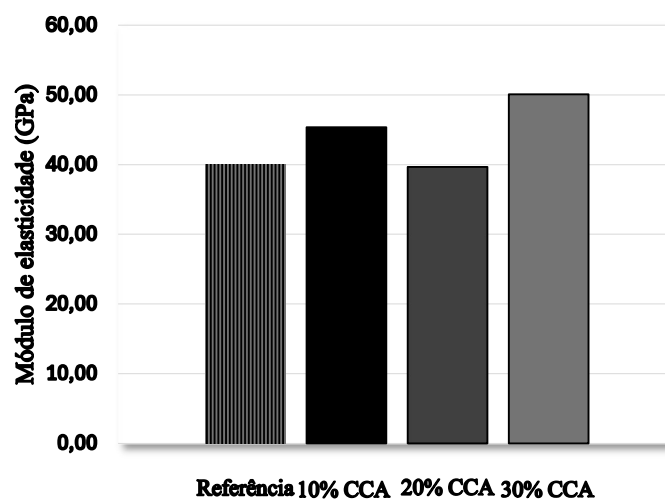
Fonte: Autor

A análise gráfica dos resultados de resistência à compressão axial é expressa na Figura 24, tal como a análise do módulo de elasticidade é expressa nas Figuras 22-a e 22-b, com a relação do UHPC com o tipo de fibra e os teores de adição mineral de cinza de casca de arroz. Nos compósitos avaliados, a cinza de casca de arroz é empregada como substituição da sílica ativa no UHPC, mantendo-se constante o teor de 2% de microfibras de aço em todos os traços. Desta forma, as variações observadas na resistência à compressão axial e no módulo de elasticidade estão diretamente associadas às diferenças físico-químicas e morfológicas entre a sílica ativa e a CCA, bem como à eficiência de suas reações pozolânicas no sistema cimentício.

Figura 22 - Resistência média à compressão axial e módulo de elasticidade do UHPC reforçado com fibras de aço e CCA aos 28 dias



a) Compressão axial (MPa)



b) Módulo de elasticidade (GPa)

O UHPC de referência, com 100% de sílica ativa em seu traço, apresenta os maiores valores médios de resistência à compressão axial aos 28 dias (98,73 MPa). A substituição progressiva da sílica ativa por CCA resulta em redução da resistência à compressão no teor de 10%, com resistência à compressão média de 71,3 MPa, desvio padrão de 9,5% e coeficiente de variação de 13,32%, o que aponta uma redução de 27,8% em relação à amostra de referência. O coeficiente de variação sugere uma sensibilidade do traço, causada por problemas de uniformidade ou problemas de distribuição das fibras na mistura.

A adição de 20% de CCA apresenta uma queda significativa de 66,71 MPa, uma queda de resistência de aproximadamente 36,7% em relação à amostra de controle. O coeficiente de variação de 3,17% demonstra uma homogeneidade da mistura e maior controle de qualidade deste compósito. Com relação a resistência, o teor de 20% de adição mineral indica que, nestas proporções, a CCA não reproduz integralmente o papel da sílica ativa na formação de uma matriz altamente resistente em idades iniciais. O teor de 30% de CCA apresenta uma resistência média ligeiramente superior em relação aos materiais anteriores (74,71 MPa), porém, com um coeficiente de variação elevado (11,24%), o que aponta não homogeneidade na mistura e dispersão das fibras na mistura.

Com base nos ensaios realizados, observa-se que o aumento do teor de cinza de casca de arroz (CCA) gera redução da resistência à compressão para o UHPC com microfibras de aço. Tal fato pode ser explicado porque, de acordo com Yang et al. (2025), as partículas rugosas da cinza de casca de arroz (CCA) não são tão eficazes quanto a sílica ativa (SA) no preenchimento dos microporos na matriz de cimento, o que reduz a densidade e a resistência final do concreto. O excesso de CCA pode afetar o processo de hidratação do cimento, efeito que diminui a taxa da reação de hidratação, que afeta o desenvolvimento das propriedades relacionadas. Tal redução da densidade pode ter agravado uma distribuição não uniforme das microfibras metálicas nos corpos de prova, já que estas fibras são mais pesadas que as convencionais usadas na produção do UHPC. Esta heterogeneidade de distribuição das fibras também ocasiona distribuição de tensões de compressão não uniforme, o que reduz a resistência à compressão. Mesmo com a presença das microfibras de aço — responsáveis por retardar a propagação de fissuras e estabilizar o comportamento pós-pico — a resistência última do compósito mostra-se fortemente dependente da qualidade da matriz cimentícia, que, neste caso, é menos resistente com a substituição da sílica ativa por CCA.

Em contraste com a resistência à compressão, o módulo de elasticidade apresenta tendência de aumento com o incremento do teor de CCA e alcança valores superiores ao traço de referência (37,35 GPa).

O material com 10% de CCA obtém um módulo de elasticidade tangencial de 45,35 GPa, um aumento de aproximadamente 21,4%, enquanto o concreto de ultra-alto desempenho com 20% e 30% de CCA apresenta módulos de 39,64 GPa e 50,11 GPa, o que indica um aumento de aproximadamente 6,13% e 34,2%, respectivamente.

Tal resultado indica que, embora a CCA não seja tão eficiente quanto a sílica ativa na elevação da resistência máxima em idades iniciais, ela é capaz de promover uma matriz mais rígida, possivelmente em função de melhor empacotamento das partículas sólidas, possível redução da porosidade capilar e formação de produtos de hidratação secundários mais densos.

A substituição da sílica ativa por CCA altera o balanço entre resistência e rigidez, o que resulta em compósitos mais rígidos, mas com menor capacidade resistente sob compressão axial.

A manutenção do teor de microfibras em todos os traços permite concluir que as diferenças observadas não estão relacionadas ao mecanismo de transferência de tensões nas fibras, mas sim à interação entre as fibras e uma matriz cimentícia com características distintas.

Nos traços com maior teor de CCA, as fibras atuam sobre uma matriz mais rígida e menos tenaz, o que pode antecipar a instabilidade sob compressão, apesar do controle de fissuração proporcionado pelas microfibras.

Os resultados de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade do UHPC reforçado com 2% de microfibra de aço, com substituição parcial e total do pó de quartzo por pó de RCD, são apresentados no Quadro 15 e nas Figuras 23-a e 23-b. Tais ensaios foram realizados aos 28 dias de cura, permitindo avaliar a influência da incorporação do material reciclado no comportamento mecânico do compósito cimentício.

A análise destes resultados permite comparar o desempenho do traço de referência com aqueles contendo 50% e 100% de substituição do pó de quartzo por RCD, tanto em termos de resistência à compressão quanto de rigidez do material.

Quadro 15 - Resistência à compressão axial média e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC reforçado com microfibras de aço e pó de RCD

Teor RCD (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Teor RCD (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
50% RCD	90,47	39,58	100% RCD	119,92	46,12
	77,19	54,67		112,81	44,83
	69,00	41,54		105,63	37,51
Média	78,89	45,26	Média	112,79	42,82
Desvio Padrão	10,83	8,21	Desvio Padrão	7,15	4,64
Coef. de variação (%)	13,73	18,14	Coef. de variação (%)	6,33	10,84

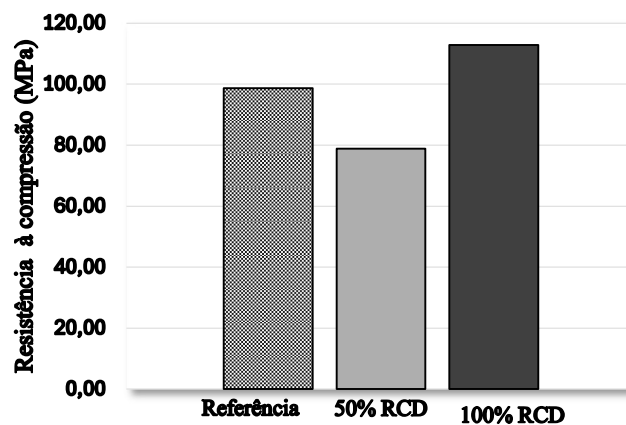
Fonte: Autor

Observa-se que o traço de referência apresenta resistência média à compressão axial de 98,73 MPa, com coeficiente de variação de 1,83%, resultado que indica excelente uniformidade.

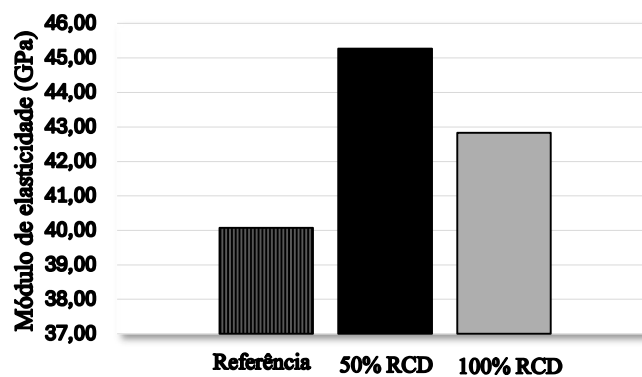
Para o traço com 50% de substituição por RCD, a resistência média obtida foi de 78,89 MPa, o que representa uma redução aproximada de 20% em relação ao traço de referência. Tal comportamento pode estar associado às características físicas e mineralógicas do pó de RCD, que podem influenciar o empacotamento das partículas e a densificação da matriz cimentícia. Este traço apresenta coeficiente de variação de 13,73%, o que aponta uma maior dispersão dos resultados quando comparado ao traço de referência.

O traço com 100% de substituição do pó de quartzo por RCD apresenta resistência média de 112,79 MPa, o que representa um aumento aproximado de 14% em relação ao traço de referência e de cerca de 43% em relação ao traço com 50% de RCD. Este resultado sugere que, para esse nível de substituição, o pó de RCD pode ter contribuído para um melhor empacotamento das partículas finas e para o refinamento da microestrutura do compósito, capaz de favorecer o desenvolvimento da resistência mecânica. O coeficiente de variação obtido para esse traço foi de 6,33%, indicando boa consistência experimental.

Figura 23 - Resistência média à compressão axial e módulo de elasticidade do UHPC reforçado com fibras de aço e RCD aos 28 dias



a) Compressão axial (MPa)



b) Módulo de elasticidade (GPa)

Fonte: Autor

Em relação ao módulo de elasticidade, os resultados indicam valores médios de 45,26 GPa para o traço com 50% de RCD e 42,82 GPa para o traço com 100% de substituição. Observa-se, portanto, uma leve redução do módulo de elasticidade com o aumento do teor de RCD, comportamento que pode estar relacionado à menor rigidez do material reciclado em comparação ao pó de quartzo. Tais valores obtidos permanecem dentro da faixa normalmente reportada para compósitos cimentícios de alto desempenho, o que sugere que a incorporação do RCD não compromete significativamente a rigidez global do material.

De modo geral, os resultados evidenciam que a substituição do pó de quartzo por pó de RCD pode influenciar de forma significativa o desempenho mecânico do UHPC, podendo resultar tanto em reduções quanto em incrementos na resistência à compressão, dependendo do teor de substituição adotado, além de provocar variações moderadas no módulo de elasticidade do compósito.

Em continuidade à análise anteriormente apresentada para o UHPC reforçado com 2% de fibras de aço, em que foram avaliados teores de 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz (CCA) como substituição parcial da sílica ativa, e a avaliação com 50% e 100% de RCD como substituição do pó de quartzo, procede-se à avaliação do comportamento do UHPC reforçado com 2% de fibras de vidro com CCA e RCD.

Neste contexto, o Quadro 16 apresenta os resultados obtidos para as formulações contendo diferentes teores de CCA, empregadas como substituição alternativa da sílica ativa. A análise desses resultados permite avaliar a influência conjunta do tipo de fibra e do teor de adição mineral sobre o desempenho do UHPC, o que possibilita uma comparação direta com o sistema previamente estudado com fibras de aço.

Quadro 16 - Resistência média à compressão axial e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC reforçado com fibras de vidro e CCA

Teor CCA (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Teor CCA (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Teor CCA (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
10% de CCA	43,74	21,72	20% de CCA	65,55	26,03	30% de CCA	66,19	42,24
	30,45	20,89		63,30	20,35		74,68	48,11
	37,08	34,01		62,34	19,12		50,66	23,30
Média	37,09	25,54	Média	63,73	21,84	Média	63,84	37,88
Desvio Padrão	6,64	7,35	Desvio Padrão	1,64	3,69	Desvio Padrão	12,18	12,96
Coef. de variação (%)	17,92	28,76	Coef. de variação (%)	2,58	16,88	Coef. de variação (%)	19,08	34,22

Fonte: Autor

Os resultados apresentados no Quadro 16 e nas Figuras 24-a e 24-b evidenciam que a substituição parcial da sílica ativa por cinza de casca de arroz (CCA) no UHPC reforçado com 2% de fibras de vidro exerce influência direta tanto na resistência à compressão axial quanto no módulo de elasticidade, além de afetar de forma significativa a dispersão dos resultados experimentais.

O traço com 10% de CCA apresenta resistência média à compressão axial de 37,09 MPa, valor substancialmente inferior ao observado no UHPC de referência, que apresenta resistência média de 62,39 MPa, o que corresponde a uma redução aproximada de 40,6%. O coeficiente de variação de 17,92% indica elevada dispersão dos resultados, o que sugere heterogeneidade da mistura, possível formação de zonas frágeis na matriz cimentícia e distribuição não homogênea das fibras de vidro, o que compromete o desempenho mecânico do material.

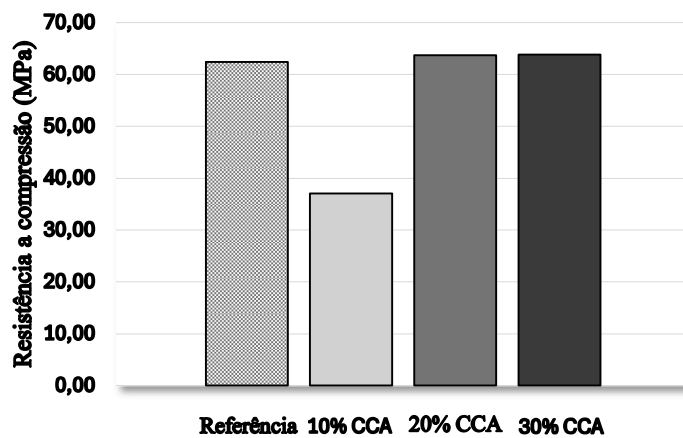
Para o UHPC contendo 20% de CCA, observa-se uma resistência média à compressão axial de 63,73 MPa, um valor muito próximo ao obtido para o traço de referência. Neste caso, a variação percentual em relação ao UHPC de referência foi praticamente desprezível, o que evidencia que este teor de substituição da sílica ativa não resulta em perda significativa de resistência mecânica. O coeficiente de variação reduzido (2,58%) sugere elevada homogeneidade da mistura e boa reprodutibilidade dos resultados, demonstra comportamento mecânico mais estável quando comparado aos demais teores analisados.

Enquanto os traços com 30% de CCA apresentam resistência média à compressão axial de 63,84 MPa, valor ligeiramente superior ao do UHPC de referência, que representa um aumento marginal da resistência média. O coeficiente de variação de 19,08% indica elevada dispersão dos resultados e reflete uma maior variabilidade do comportamento mecânico. Tal estado sugere que, apesar do ganho médio de resistência, o aumento do teor de CCA pode comprometer a uniformidade da matriz, possivelmente em função de variações na reatividade da CCA, aumento da porosidade ou dificuldade de dispersão das fibras de vidro.

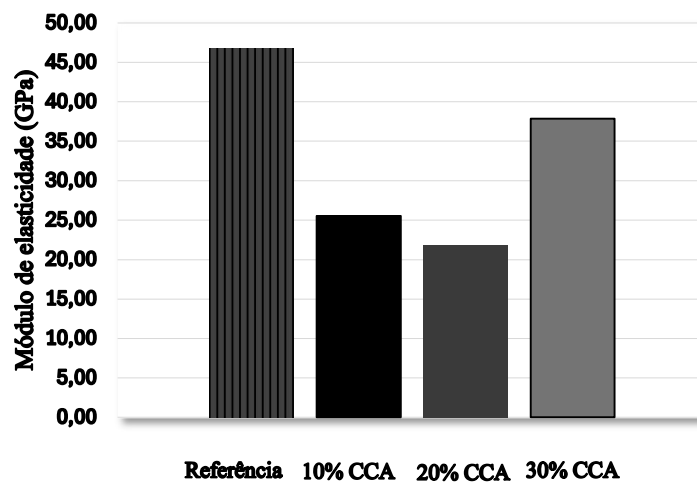
Com relação ao módulo de elasticidade, observa-se comportamento semelhante. O traço com 10% de CCA apresenta um módulo médio inferior ao do UHPC de referência e um elevado coeficiente de variação (28,76%), fator que reforça a indicação de heterogeneidade do material. O UHPC com 20% de CCA apresenta módulo médio reduzido em relação ao traço de referência, com dispersão moderada (16,88%), enquanto o traço com 30% de CCA apresenta módulo médio inferior, associado a elevado coeficiente de variação (34,22%), com comportamento menos previsível do material sob deformação.

De forma geral, os resultados indicam que o teor de 20% de CCA apresenta o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e homogeneidade, e os teores de 10% e 30% de CCA resultaram em maior dispersão dos resultados, o que demonstra sensibilidade do UHPC com fibras de vidro à substituição da sílica ativa em níveis mais baixos ou mais elevados.

Figura 24 - Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade do UHPC reforçado com fibras de vidro e CCA



a) Compressão axial (MPa)



b) Módulo de elasticidade (GPa)

Esta substituição implica redução da resistência à compressão axial aos 28 dias, especialmente em teores intermediários, o que evidencia que a CCA não reproduz integralmente a elevada reatividade e eficiência da sílica ativa em idades iniciais.

A utilização da CCA como alternativa à sílica ativa mostra-se tecnicamente viável, com o controle da otimização do teor de substituição e da idade de avaliação, em que se destaca o potencial do material em termos de sustentabilidade e desempenho mecânico.

Após a análise do comportamento mecânico do UHPC incorporando resíduos de construção e demolição (RCD) e reforçado com fibras de aço, procede-se à avaliação dos compósitos reforçados com fibras de vidro, mantendo-se o critério metodológico adotado anteriormente. Esta abordagem permite isolar a influência do tipo de fibra no desempenho à compressão axial e no módulo de elasticidade, bem como avaliar os efeitos da incorporação do RCD na interação fibra–matriz e na resposta mecânica global do UHPC.

O Quadro 17 apresenta os valores médios de resistência à compressão axial e de módulo de elasticidade do UHPC reforçado com fibras de vidro, considerando o traço de referência e os compósitos contendo 50% e 100% de resíduos de construção e demolição (RCD) como substituição parcial do pó de quartzo, enquanto as Figuras 25-a e 25-b ilustram resultados gráficos da resistência à compressão e do módulo de elasticidade tangencial destes compósitos.

Quadro 17 - Resistência média à compressão axial e módulo de elasticidade aos 28 dias do UHPC reforçado com fibras de vidro e RCD

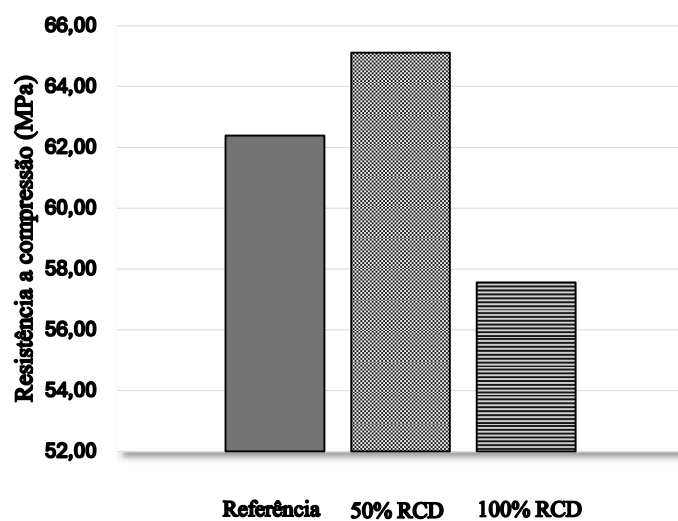
Teor RCD (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Teor RCD (%)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
50%	58,44	37,45	100%	59,43	44,38
	59,71	34,92		60,97	40,24
	77,20	39,12		52,28	69,42
Média	65,12	37,17	Média	57,56	51,35
Desvio Padrão	10,49	2,11	Desvio Padrão	4,64	15,79
Coef. de variação (%)	16,11	5,69	Coef. de variação (%)	8,06	30,75

Fonte: Autor

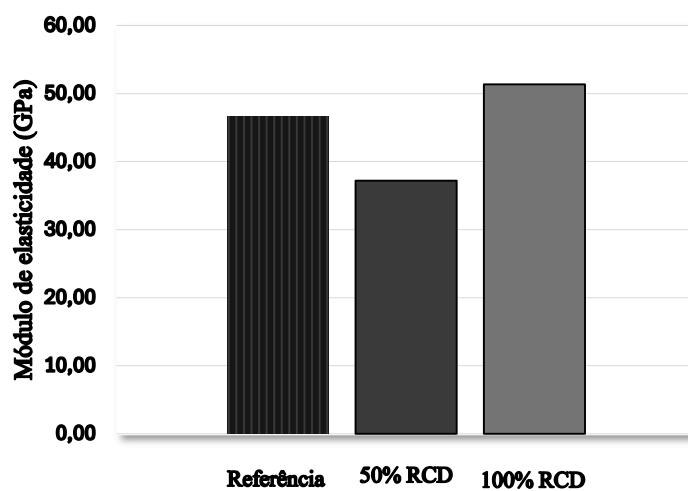
O Quadro de resultados referente aos traços de UHPC reforçados com fibras de vidro e contendo resíduos de construção e demolição (RCD) como substituição parcial do pó de quartzo (Quadro 17) evidencia diferenças relevantes no comportamento mecânico dos compósitos. O UHPC com 50% de RCD apresenta resistência média à compressão axial de 65,12 MPa, com desvio padrão de 10,49 MPa e coeficiente de variação de 16,11%, enquanto o traço com 100% de RCD apresenta resistência média de 57,56 MPa, associada a desvio padrão de 4,64 MPa e coeficiente de variação de 8,06%.

Em relação ao módulo de elasticidade, o compósito com 50% de RCD apresenta valor médio de 37,17 GPa, com baixa dispersão ($CV = 5,69\%$), ao passo que o traço com 100% de RCD aponta módulo médio de 51,35 GPa, acompanhado por desvio padrão elevado (15,79 GPa) e coeficiente de variação de 30,75%. Tais resultados fornecem a base quantitativa para a análise comparativa previamente apresentada, o que permite correlacionar os efeitos do teor de RCD com as variações observadas na resistência à compressão axial, na rigidez do material e na dispersão dos resultados experimentais.

Figura 25 - Resistência à compressão axial do UHPC reforçado com fibras de vidro e RCD



a) Compressão axial (MPa)



b) Módulo de elasticidade (GPa)

A comparação entre o UHPC de referência reforçado com fibras de vidro e os compósitos contendo resíduos de construção e demolição (RCD) evidencia que a substituição parcial do pó de quartzo influencia simultaneamente a resistência à compressão axial, o módulo de elasticidade e a dispersão dos resultados experimentais.

O UHPC com 50% de RCD aponta resistência média à compressão 4,4% superior à do traço de referência, acompanhada de redução do coeficiente de variação, o que demonstra melhora relativa da homogeneidade da mistura.

O traço com 100% de RCD apresenta uma redução de 7,7% na resistência média, com coeficiente de variação significativamente inferior, o que evidencia comportamento mecânico mais uniforme.

No que se refere ao módulo de elasticidade, o UHPC com 50% de RCD apresenta redução aproximada de 20,4% em relação ao traço de referência, associada à baixa dispersão dos resultados, enquanto o compósito com 100% de RCD ilustra incremento de aproximadamente 10,0% no módulo médio, com elevado coeficiente de variação, o que indica maior rigidez global, com menor previsibilidade do comportamento elástico.

De forma geral, os resultados de compressão axial e módulo de elasticidade evidenciam que o desempenho mecânico do UHPC resulta de um equilíbrio entre tipo de fibra, qualidade da matriz cimentícia e adição mineral empregada.

As fibras de aço, em especial as microfibras, destacam-se pelo aumento da resistência à compressão e pela redução da variabilidade dos resultados, o que indica maior homogeneidade e eficiência no confinamento da matriz. As fibras de vidro, embora apresentem resistências médias inferiores, vão contribuir de forma significativa para o aumento do módulo de elasticidade, o que resulta em compósitos mais rígidos e com mais sensibilidade à heterogeneidade da mistura.

A substituição da sílica ativa por CCA e RCD altera o balanço entre resistência e rigidez: a CCA tende a reduzir a resistência à compressão, sobretudo em teores inadequados, mas pode elevar a rigidez da matriz, enquanto o RCD atua como material de preenchimento, o que promove ganhos de homogeneidade em determinados teores, ainda que com efeitos distintos sobre resistência e módulo.

Assim, os resultados demonstram que não existe uma solução ótima, mas sim combinações mais adequadas conforme o desempenho mecânico desejado, o que reforça a importância da análise conjunta dessas propriedades.

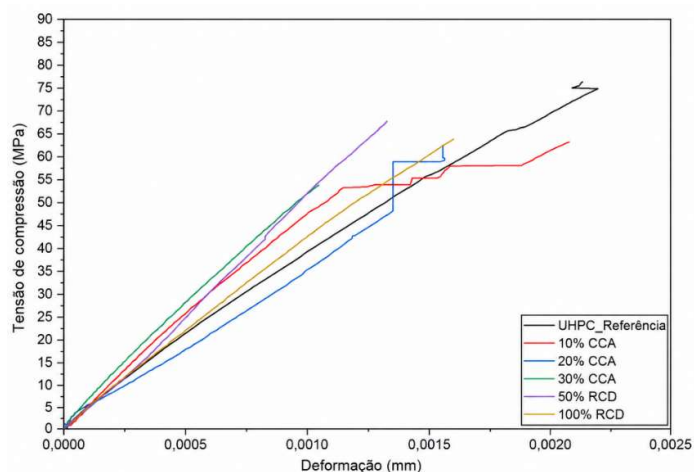
5.2.1.3 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade tangencial – Análise do diagrama de tensão vs deformação

Encerrada a análise dos resultados de resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade, torna-se necessária a avaliação do comportamento mecânico do UHPC ao longo do carregamento, com finalidade de compreender os mecanismos associados à deformação e à ruptura do material.

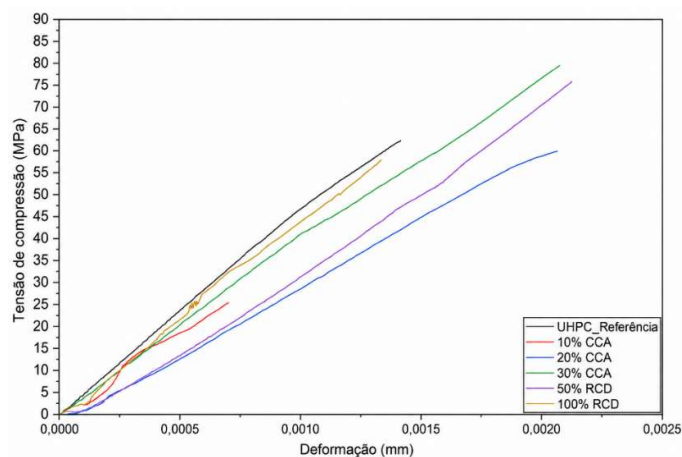
Neste contexto, procede-se à análise das curvas tensão $\times$ deformação (Figura 26), com ênfase na influência do tipo de fibra e das adições minerais sobre o comportamento pré-pico, a resposta pós-pico e a capacidade de dissipação de energia dos compósitos avaliados.

A Figura 26 apresenta os diagramas tensão–deformação obtidos para o UHPC_Referência e para as misturas contendo substituições por CCA e RCD, todas reforçadas com 2% de microfibras de aço (Figura 26-a) e 2% de microfibras de vidro (Figura 26-b). Observa-se comportamento aproximadamente linear na região inicial das curvas, o que caracteriza a resposta elástica do material até o início do processo de microfissuração da matriz cimentícia.

Figura 26 - Curvas tensão vs deformação do UHPC



a) 2% de microfibra de aço



b) 2% de microfibra de vidro

Fonte: Autor

Ao analisar UHPC com 2% de microfibras de aço, o UHPC_Referência, ou seja, concreto de ultra-alto desempenho sem adições minerais, mas com microfibras de aço, observa-se crescimento linear da tensão até o pico que é chamado de comportamento elástico-linear.

A incorporação de adição mineral não se mostra como principal alternativa vantajosa da característica mecânica do UHPC, onde todas as misturas mostraram-se inferiores ao UHPC_Referência. Para os teores de cinza de casca de arroz, o concreto de ultra-alto desempenho mostra picos de tensão de compressão máxima entre 65 MPA (10% CCA) e 55

MPa (30% CCA) com deformações elásticas de 0,002 mm e 0,001 mm respectivamente. O teor de 20% de CCA entre as incorporações desta adição mineral demonstra resistência de tensão máxima superior aos outros teores, embora continue inferior ao UHPC_Referência, com um pico de tensão de aproximadamente 65 MPa e deformação elástica de 0,0015 mm.

O UHPC com incorporação de RCD apresenta características de tensão e deformação semelhantes, porém com a incorporação parcial de 50% RCD com uma deformação elástica de 0,0012 mm e pico de tensão de aproximadamente 70 MPa, enquanto a substituição total de RCD (100% RCD) aponta tensão de 63 MPa, mas com uma deformação elástica de 0,0015 mm.

De forma geral, todos os compósitos com adições minerais apresentaram um comportamento elástico linear inferior ao UHPC_Referência, com melhor característica entre os teores de 20% de CCA e 50% RCD. Estas resistências para o UHPC de acordo com a norma ABNT NBR 17246-1:2025 são inferiores ao que esta normativa determina, e os resultados e, laboratório apresentam coeficientes de variação altos, o que sugere possível heterogeneização da mistura, segregação das fibras de aço nos corpos de prova e incorporação de vazios nas amostras.

A Figura 26-b ilustra o diagrama de tensão vs deformação do UHPC composto com reforço de 2% de fibras de vidro, comparado com o UHPC com os teores de 10%, 20% e 30% de substituição de CCA por microssilica ativa, e resíduos de construção e demolição, como substituição de 50% e 100% do pó de quartzo.

O UHPC_Referência apresenta crescimento aproximadamente linear da tensão até o pico, que atinge valores próximos de 60 MPa, seguido de deformação máxima de aproximadamente 0,0014 mm. No gráfico, encontra-se expresso somente o comportamento elástico linear, com a deformação máxima e a tensão máxima de compressão. Tal comportamento indica resposta relativamente frágil da matriz, com limitada capacidade de absorção de energia após o pico.

A incorporação de CCA no UHPC mostra influência direta no comportamento elástico linear do compósito, no qual o teor de 10% CCA alcança resistência inferior ao UHPC_Referência com pico de 25 MPa e deformação máxima de 0,0008 mm, sendo a mostra com menor resistência de forma geral. Para os teores de 20% CCA e 30% CCA, o comportamento elástico linear se apresenta de forma superior ao UHPC_Referência, em que 20% CCA alcança tensão de compressão máxima de aproximadamente 58 MPa com

deformação máxima de 0,0021 mm, enquanto 30% CCA tem pico de tensão de compressão máxima de 80 MPa, e deformação máxima de 0,002 mm.

De forma geral, a análise dos diagramas tensão–deformação indica que as misturas de UHPC reforçadas com fibras de vidro apresentam comportamento mecânico caracterizado por resposta aproximadamente linear na região inicial, seguida pelo desenvolvimento de microfissuras na matriz cimentícia e subsequente redistribuição de tensões através do mecanismo de ponte de fibras. Observa-se que as misturas contendo CCA apresentam variações na tensão máxima e na deformação associada ao pico, sugerindo influência da adição pozolânica na microestrutura da matriz. Conforme os teores de CCA aumentam, eles tendem a favorecer maior capacidade de deformação do compósito UHPC.

Para teores de RCD, o comportamento elástico linear mostra-se inverso ao do teor de CCA, em que a incorporação parcial de resíduo de construção e demolição (50% RCD) atinge resistência de tensão de compressão máxima próxima de 75 MPa com deformação elástica máxima de 0,002 mm, enquanto a substituição total de RCD (100% RCD) apresenta tensão máxima de 57 MPa com deformação de 0,0013 mm. Estes dados sugerem que a incorporação total de RCD na mistura de UHPC não auxilia diretamente no comportamento elástico linear da estrutura do material cimentício.

Tal característica pode estar relacionada à textura superficial e à heterogeneidade das partículas recicladas, que podem contribuir para mecanismos adicionais de dissipação de energia e retardar a propagação de fissuras. Estes resultados indicam que a combinação de fibras de vidro com agregados reciclados pode contribuir para o desenvolvimento de compósitos cimentícios com comportamento mecânico mais deformável.

5.2.2 Resistência à tração indireta por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado em prensa universal do tipo INSTRON, com velocidade de carregamento de 100 mm/s. Os corpos de prova são posicionados na orientação horizontal, com a carga aplicada ao longo da geratriz longitudinal, conforme o procedimento usual para este tipo de ensaio.

A ruptura das amostras é caracterizada por um estalo audível em todos os traços de UHPC avaliados, acompanhado pelo surgimento de fissuras ao longo da seção transversal dos

corpos de prova, conforme ilustrado nas Figuras 27 - a e 27 - b, e Figuras 28 - a e 28 - b. Tal comportamento é observado de forma consistente em todas as amostras ensaiadas.

A presença de fibras contribui significativamente para a manutenção da integridade dos corpos de prova após a ruptura inicial, o que impede a separação completa dos fragmentos. Observa-se predominantemente a formação de fissuras discretas, sem destacamento total da peça. Nos compósitos reforçados com macrofibras e microfibras de aço, não ocorre a ruptura completa do corpo de prova, sendo identificadas fissuras distribuídas ao longo do diâmetro e concentradas na região central da seção transversal. Nos compósitos reforçados com fibras de vidro, verifica-se uma ruptura abrupta, com separação instantânea e total do corpo de prova.

Figura 27 - Amostras de UHPC com microfibras de aço aos 28 dias submetidas à compressão diametral



a) UHPC com 10% de CCA



b) UHPC com 20% de CCA

Fonte: Autor

Figura 28 - Amostras de UHPC com microfibras de vidro aos 28 dias submetidas à compressão diametral



a) UHPC com 10% de CCA



b) UHPC com 50% RCD

Fonte: Autor

5.2.2.1 Resistência à tração indireta por compressão diametral – Análise do UHPC com fibras de vidro e aço

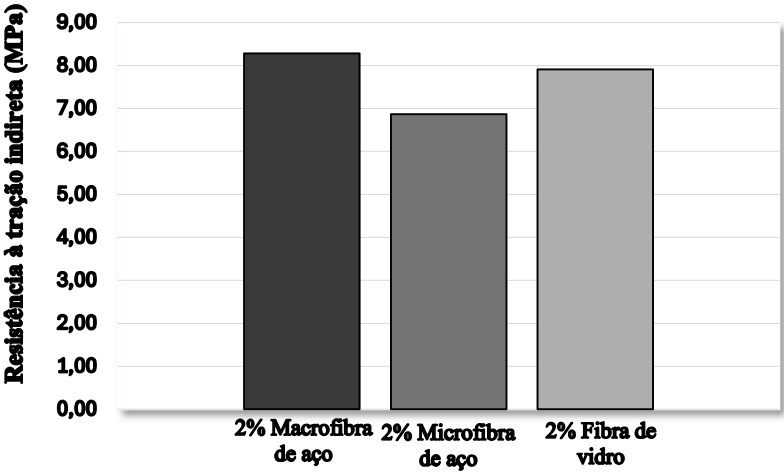
O Quadro 18, juntamente com a Figura 29, apresenta a resistência à tração por compressão diametral do compósito de ultra-alto desempenho (UHPC) contendo 2% de diferentes tipos de fibras, evidenciando o efeito da macrofibra de aço, microfibra de aço e microfibra de vidro no desempenho mecânico do material.

Quadro 18 - Resistência à tração indireta do UHPC aos 28 dias

Teor de fibra	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Teor de fibra	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Teor de fibra	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
2% de Macrofibra de aço	9,61	2% de Microfibra de aço	5,64	Microfibra de vidro (2%)	10,11
	8,41		6,36		7,81
	6,82		8,60		5,79
Média	8,28	Média	6,86	Média	7,90
Desvio Padrão	1,40	Desvio Padrão	1,55	Desvio Padrão	2,16
Coef. de variação (%)	16,92	Coef. de variação (%)	22,52	Coef. de variação (%)	27,33

Fonte: Autor

Figura 29 - Resistência à tração indireta do UHPC com 2% de fibra aos 28 dias



Fonte: Autor

Com base nos resultados apresentados no Quadro 18 e ilustrados na Figura 29, observa-se que o UHPC reforçado com 2% de macrofibra de aço apresenta o maior valor médio de resistência à compressão diametral, atingindo 8,28 MPa, sendo adotado como referência para a comparação entre os diferentes tipos de fibras.

Em relação a este valor, a mistura contendo 2% de microfibra de aço apresenta resistência média de 6,86 MPa, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 17,75% e é o menor entre as fibras. O UHPC com 2% de microfibra de vidro possui uma resistência à tração de 7,90 MPa com pouca variação de resistência em relação à macrofibra de aço, com queda de 0,05%. Tais resultados evidenciam a influência direta do tipo de fibra no mecanismo de transferência de tensões sob tração indireta, sendo a macrofibra de aço mais eficiente devido ao seu maior comprimento, maior área de ancoragem e maior capacidade de ponte de fissuras, a qual retarda a propagação das trincas durante o ensaio.

Do ponto de vista estatístico, observa-se maior dispersão dos resultados para a microfibra de aço, refletida pelo coeficiente de variação de 27,33%, o que pode ser atribuído à distribuição aleatória e à variabilidade do engajamento das fibras no plano de ruptura. As misturas com macrofibra de aço e microfibra de vidro apresentaram coeficientes de variação de 26,92% e 22,52%, respectivamente, o que evidencia comportamento mais heterogêneo e com maior capacidade de resistência pós-fissuração.

5.2.2.2 Resistência à tração indireta por compressão diametral – Análise do UHPC com adições minerais de CCA e RCD

Após a análise da resistência à tração por compressão diametral do concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) reforçado com diferentes tipos de fibras, procedeu-se à avaliação do UHPC contendo microfibras de aço e vidro, com substituição parcial da sílica ativa por cinza de casca de arroz (CCA) nos teores de 10%, 20% e 30%, conforme apresentado no Quadro 19 e na Figura 30.

Tratando-se do UHPC com adições de 10%, 20% e 30% de CCA na substituição de sílica ativa (Quadro 19), observa-se que a relação entre a concentração de CCA e a resistência à compressão diametral mostra-se diretamente proporcional, ou seja, conforme aumenta o teor de cinza de casca de arroz, a resistência mostra-se superior, salvo a exceção do teor de 30% de

CCA que possui uma ligeira queda. Não obstante, para efeitos de comparação com os resultados de UHPC de referência, as adições minerais influenciam positivamente a resistência do UHPC, mostrando-se superiores, dado que é expressamente notável, quando traduzido em gráfico, como aponta a Figura 30-a.

Quadro 19 - Resistência à tração indireta do UHPC com 2% de fibras de aço ou 2% de vidro aos 28 dias – Traços com CCA

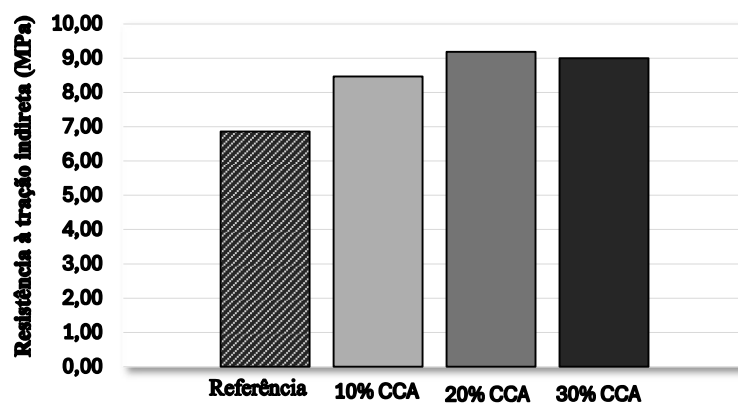
UHPC com 2% de microfibra de aço							
Teor CCA (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à tração indireta (MPa)
Referência (0% CCA)	5,64	10% de CCA	8,07	20% de CCA	9,78	30% de CCA	9,59
	6,36		8,14		8,43		8,96
	8,60		9,18		9,34		8,45
Média	6,86	Média	8,46	Média	9,18	Média	9,00
Desvio Padrão	1,55	Desvio Padrão	0,62	Desvio Padrão	0,69	Desvio Padrão	0,57
Coef. de variação (%)	22,52	Coef. de variação (%)	7,37	Coef. de variação (%)	7,51	Coef. de variação (%)	6,39
UHPC com 2% de microfibra de vidro							
Teor CCA (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à tração indireta (MPa)
Referência (0% CCA)	5,79	10% de CCA	7,04	20% de CCA	6,05	30% de CCA	9,53
	10,11		6,63		5,93		7,38
	7,81		6,15		5,81		7,21
Média	7,90	Média	6,61	Média	5,93	Média	8,04
Desvio Padrão	2,16	Desvio Padrão	0,45	Desvio Padrão	0,12	Desvio Padrão	1,29
Coef. de variação (%)	27,33	Coef. de variação (%)	6,75	Coef. de variação (%)	2,02	Coef. de variação (%)	16,03

Fonte: Autor

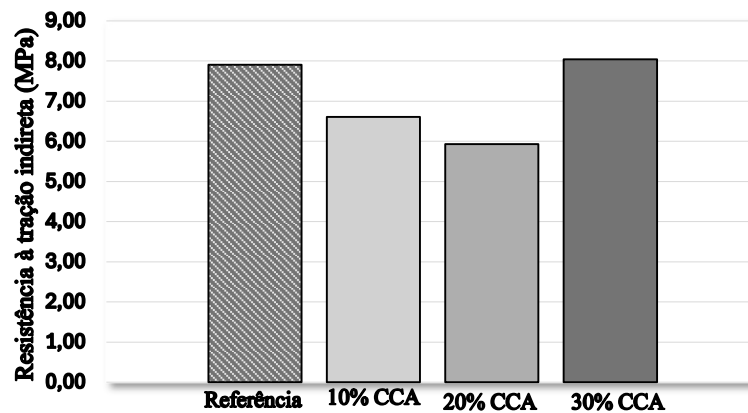
Observa-se que o teor de 20% de CCA proporciona o maior valor médio de resistência, atingindo 9,18 MPa, o que representa um aumento de aproximadamente 33,82% em relação ao UHPC de referência com microfibra de aço (6,86 MPa). Este comportamento pode ser atribuído ao efeito *filler* e à elevada atividade pozolânica da CCA, que favorecem o

refinamento da microestrutura da matriz cimentícia e a melhoria da zona de transição interfacial entre matriz e fibras.

Figura 30 - Resistência à tração indireta do UHPC com 2% de fibras de aço ou vidro aos 28 dias – Traços com CCA



a) UHPC com 2% de microfibras de aço



b) UHPC com 2% de microfibras de vidro

Para o teor de 10% de CCA, a resistência média foi de 8,46 MPa, ainda superior à referência, com ganho de cerca de 23,32%, o que indica que o aumento do teor de substituição começa a limitar a disponibilidade de sílica reativa para a formação de produtos de hidratação mais densos.

Já o teor de 30% de CCA apresenta resistência média de 9 MPa, correspondente a um incremento de aproximadamente 31,2% em relação ao traço de referência, o que evidencia que substituições mais elevadas tendem a reduzir a eficiência mecânica ou manter-se estável com relação ao teor de 20%, possivelmente em função do efeito de diluição do ligante e do aumento da demanda de água para adequada dispersão das partículas finas.

Do ponto de vista estatístico, observa-se redução significativa da dispersão dos resultados com o aumento do teor de CCA, refletida nos coeficientes de variação de 7,37% e 6,39% para os teores de 10% e 30%, respectivamente, em comparação ao traço de referência (22,52%), o que indica um comportamento mais homogêneo do material.

Os resultados sugerem que a substituição parcial da sílica ativa por CCA, especialmente no teor de 20%, constitui uma estratégia eficiente para melhorar a resistência à tração indireta do UHPC, mantendo boa homogeneidade e desempenho mecânico satisfatório.

Os resultados do UHPC com adição de cinza de casca de arroz (CCA) e fibra de vidro são apresentados na Quadro 20 e ilustrados graficamente na Figura 30-b, sendo comparados ao UHPC de referência contendo 2% de microfibras de vidro, cuja resistência média à tração por compressão diametral foi de 7,90 MPa.

Observa-se que o compósito com 10% de CCA apresenta resistência média de 6,61 MPa, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 16,33% em relação ao traço de referência. Apesar da queda de desempenho mecânico, tal traço apresenta baixo desvio padrão (0,45 MPa) e coeficiente de variação de 6,75%, o que indica comportamento mecânico relativamente homogêneo e boa repetibilidade dos resultados.

Para o teor de 20% de CCA, verifica-se a menor resistência média, de 5,93 MPa, o que representa uma redução de cerca de 24,94% em relação ao UHPC de referência, ainda que associada à elevada homogeneidade da mistura, evidenciada pelo coeficiente de variação de apenas 2,02%, o que sugere uma matriz mais uniforme, com menor eficiência mecânica.

O UHPC com 30% de CCA apresenta resistência média de 8,04 MPa, valor ligeiramente superior ao traço de referência, com incremento de aproximadamente 1,77%, o que indica que, neste teor, a combinação entre o efeito *filler* e a atividade pozolânica da CCA pode ter contribuído para o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia e para a

melhoria da interação fibra–matriz. Este traço apresenta coeficiente de variação de 16,03%, superior aos demais teores com CCA, o que pode estar associado à heterogeneidade do material ou à distribuição não uniforme das fibras de vidro ao longo das amostras, afetando a consistência dos resultados.

De forma geral, os resultados evidenciam que a influência da CCA no UHPC reforçado com fibra de vidro é fortemente dependente do teor de substituição adotado, havendo um equilíbrio entre ganho de resistência e homogeneidade do compósito. Estes resultados sugerem a existência de um teor ótimo de substituição da sílica ativa por CCA, no qual os benefícios microestruturais superam os efeitos de diluição do ligante, especialmente em compósitos reforçados com fibras de menor módulo de elasticidade, como a fibra de vidro.

O Quadro 20 e a Figura 31, apresentados a seguir, reúnem os resultados do ensaio de tração por compressão diametral do UHPC contendo 2% de microfibras de aço e vidro, aos 28 dias de cura, com substituição parcial (50%) e total (100%) do pó de quartzo por pó de RCD.

São apresentados os valores individuais, média, desvio padrão e coeficiente de variação, o que torna possível avaliar não apenas o desempenho mecânico dos traços, mas também a sua dispersão estatística. A análise comparativa com o traço de referência possibilita verificar a influência do teor de RCD na resistência à tração indireta do compósito, bem como a contribuição do reforço fibroso no comportamento do material frente às tensões de tração.

Quadro 20 - Resistência à tração indireta do UHPC com 2% de fibras de aço aos 28 dias – Traços com RCD

UHPC com 2% de microfibras de aço					
Teor RCD (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor RCD (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor RCD (%)	Resistência à tração indireta (MPa)
Referência (0% RCD)	5,64	50% RCD	10,43	100% RCD	13,52
	6,36		10,83		12,22
	8,60		10,62		10,81
Média	6,86	Média	10,63	Média	12,18
Desvio Padrão	1,55	Desvio Padrão	0,20	Desvio Padrão	1,35
Coef. de variação (%)	22,52	Coef. de variação (%)	1,85	Coef. de variação (%)	11,11
UHPC com 2% de microfibras de vidro					
Teor RCD (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor RCD (%)	Resistência à tração indireta (MPa)	Teor RCD (%)	Resistência à tração indireta (MPa)
Referência (0% RCD)	5,79	50% RCD	9,73	100% RCD	8,91
	10,11		7,66		6,18
	7,81		7,52		6,12
Média	7,90	Média	8,30	Média	7,07
Desvio Padrão	2,16	Desvio Padrão	1,24	Desvio Padrão	1,59
Coef. de variação (%)	27,33	Coef. de variação (%)	14,91	Coef. de variação (%)	22,53

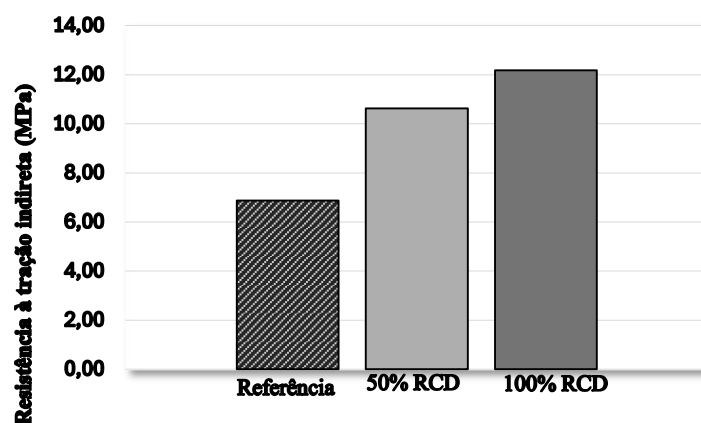
Fonte: Autor

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral (MPa) aos 28 dias demonstraram incremento expressivo no desempenho mecânico do UHPC com a substituição do pó de quartzo por pó de RCD. O traço com 2% de microfibras de aço com resistência média de 6,86 MPa é utilizado como referência para os traços com adição de RCD como substituição parcial no pó de quartzo, dados estes expressos na Figura 36-a.

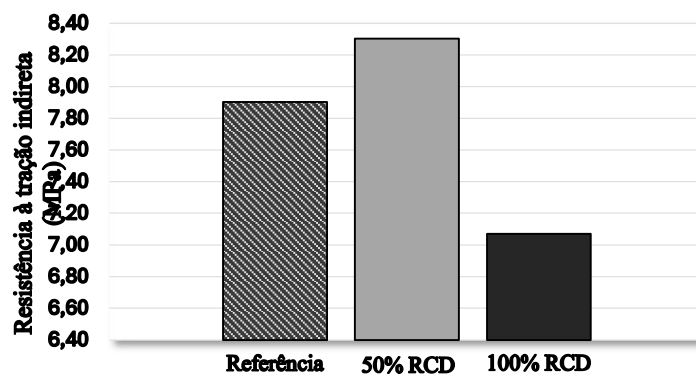
As misturas com 50% e 100% de RCD atingem 10,63 MPa e 12,18 MPa, respectivamente. Tais valores representam aumentos de aproximadamente 55% para o traço com 50% de substituição e 78% para o traço com substituição total e evidenciam que o RCD não influencia diretamente no comportamento à tração indireta, podendo inclusive ter contribuído para o refinamento da matriz e melhoria da interface fibra–matriz.

Observa-se ainda que o traço com 50% de RCD apresenta excelente homogeneidade estatística ($CV = 1,85\%$), enquanto o traço com 100% de RCD demonstra variabilidade moderada ($CV = 11,11\%$), ambos inferiores ao traço de referência ($CV = 22,52\%$), o que indica possível melhoria na dispersão das fibras e maior estabilidade do compósito com a incorporação do material reciclado.

Figura 31 - Resistência à compressão diametral do UHPC com 2% de fibras de aço ou vidro aos 28 dias – Traços com RCD



a) UHPC com 2% de microfibras de aço



b) UHPC com 2% de microfibras de vidro

Observa-se, a partir da análise dos resultados, que o compósito reforçado com 2% de fibras de aço e contendo adições minerais — CCA e RCD — em substituição, respectivamente, à microssílica ativa e ao pó de quartzo apresenta resistências à tração superiores ao traço de referência. Tal comportamento sugere que ambas as adições minerais contribuem para o refinamento da matriz cimentícia, o que favorece a formação de produtos de hidratação do cimento Portland e promove melhoria na microestrutura do compósito. No que se refere especificamente à resistência à tração por compressão diametral, destaca-se a atuação significativa das fibras no mecanismo de ponte de fissuras, o que contribui para a redistribuição de tensões e para o incremento do desempenho mecânico do material.

O Quadro 20 e a Figura 31-b apresentam os resultados da resistência à tração por compressão diametral do concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) reforçado com 2% de microfibra de vidro, no qual o pó de quartzo foi parcialmente substituído por resíduo de construção e demolição (RCD) nos teores de 50% e 100%.

A análise destes resultados tem como objetivo avaliar a influência da substituição do agregado fino por material reciclado no desempenho mecânico do compósito, bem como verificar os efeitos dessa adição mineral na homogeneidade do material, por meio da avaliação estatística dos dados experimentais. Os resultados são comparados ao UHPC de referência com fibra de vidro, o que permite discutir os impactos da incorporação do RCD na matriz cimentícia e na interação fibra–matriz sob solicitações de tração indireta.

Observa-se que o compósito com 50% de RCD apresenta resistência média de 8,30 MPa, valor que corresponde a um aumento de aproximadamente 5,1% em relação ao UHPC de referência (7,90 MPa). Tal comportamento indica que a substituição parcial do pó de quartzo por RCD, neste teor, pode ter contribuído positivamente para o desempenho mecânico, possivelmente em função do efeito *filler*, do ajuste granulométrico e do melhor empacotamento das partículas, o que favorece a transferência de tensões na matriz cimentícia. Do ponto de vista estatístico, o traço com 50% de RCD apresenta desvio padrão de 1,24 MPa e coeficiente de variação de 14,91%, inferiores aos observados para o traço de referência (27,33%), indicando redução da dispersão dos resultados e comportamento mecânico mais uniforme.

O UHPC com 100% de RCD aponta resistência média de 7,07 MPa, o que representa uma redução de aproximadamente 10,5% em relação ao traço de referência. Este traço apresenta coeficiente de variação de 22,53%, o que demonstra maior dispersão dos resultados quando comparado ao teor de 50% de RCD, o que pode estar associado à

heterogeneidade do material, à maior variabilidade granulométrica do RCD e à possível redução da qualidade da zona de transição interfacial entre a matriz cimentícia e as fibras de vidro.

Os resultados indicam que a incorporação de RCD no UHPC com fibra de vidro apresenta comportamento dependente do teor de substituição, sendo o teor de 50% o mais eficiente, por proporcionar ganho de resistência aliado à maior homogeneidade do compósito, enquanto a substituição total do pó de quartzo tende a comprometer o desempenho mecânico.

A análise integrada dos resultados de resistência à tração por compressão diametral evidencia que o desempenho do UHPC é fortemente condicionado pela combinação entre o tipo de fibra empregada e a natureza da adição mineral, bem como pelo teor de substituição adotado. Os compósitos reforçados com fibras de aço apresentaram os maiores níveis de resistência, atribuídos ao comprimento efetivo das fibras e à maior capacidade de ponte de fissuras, o que favorece a redistribuição de tensões após o início da fissuração.

Os compósitos com fibra de vidro apresentaram resistências inferiores, com comportamento mais sensível às modificações da matriz cimentícia promovidas pelas adições minerais.

No caso da substituição parcial da sílica ativa por cinza de casca de arroz (CCA), observa-se comportamento dependente do teor incorporado. Para UHPC com fibra de aço, teores moderados de CCA resultaram em ganhos de resistência, associados ao efeito *filler* e à atividade pozolânica, que promovem o refinamento da microestrutura e a melhoria da zona de transição interfacial. Para UHPC com fibra de vidro, os teores intermediários de CCA (10% e 20%) conduziram a reduções de resistência, ainda que acompanhadas de menor dispersão estatística, indicando maior homogeneidade do material. O teor de 30% de CCA mostra-se capaz de recuperar e até superar a resistência do traço de referência, o que sugere que, neste caso, os efeitos microestruturais da CCA compensaram a menor eficiência mecânica da fibra de vidro.

Quanto à substituição do pó de quartzo por resíduo de construção e demolição (RCD) em UHPC com fibra de vidro, verifica-se que a incorporação de 50% de RCD proporciona incremento de resistência e redução da dispersão dos resultados, o que demonstra que o RCD, quando empregado em teores moderados, pode atuar positivamente no empacotamento granular e na densificação da matriz cimentícia.

A substituição total (100% de RCD) resulta em queda de resistência e aumento da variabilidade dos resultados, possivelmente em função da heterogeneidade do material

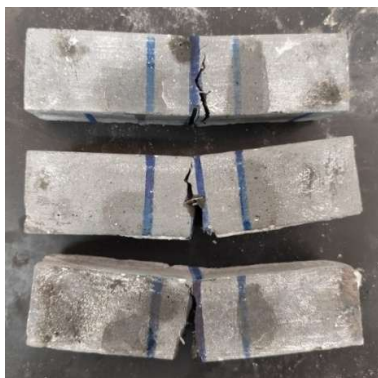
reciclado, da maior variabilidade granulométrica e da redução da qualidade da interface matriz-fibra.

Tais resultados indicam que tanto a CCA quanto o RCD podem ser utilizados de maneira tecnicamente viável em UHPC, desde que seus teores sejam cuidadosamente controlados e adequadamente compatibilizados com o tipo de fibra empregado. Observa-se ainda que compósitos com fibra de vidro apresentam maior sensibilidade às alterações microestruturais da matriz, o que torna essencial a definição de teores ótimos de substituição para garantir equilíbrio entre desempenho mecânico e homogeneidade do material.

5.2.3 Tração na flexão por 3 pontos

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão (MPa) permitem avaliar a relação da caracterização mecânica entre as macrofibras de aço, microfibras e aço e vidro, tal como o efeito da substituição parcial da sílica ativa por cinza de casca de arroz (CCA) e pó de quartzo por resíduo de construção e demolição (RCD) no comportamento mecânico do UHPC. As amostras, em sua maioria, apresentam ruptura gradual, em que a concentração de fibras de aço impede a segregação de sedimentos e tampouco a separação total da peça pelo entalhe (Figuras 32 - a e 32 - b).

Figura 32 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos na idade de 28 dias – traço referência



a) UHPC com 10% de CCA



b) UHPC com 30% de CCA

Fonte: Autor

5.2.3.1 Tração na flexão por 3 pontos – Análise do UHPC com fibras de vidro e aço

A análise dos resultados de resistência à tração na flexão por três pontos aos 28 dias, apresentados no Quadro 21 e na Figura 33, evidencia a influência do tipo de fibra no desempenho mecânico do UHPC, com teor fixo de 2%.

O compósito reforçado com microfibras de aço apresenta o maior valor médio de resistência à flexão (28,09 MPa), que corresponde a um incremento de aproximadamente 14,3% em relação ao UHPC com macrofibra de aço (24,58 MPa) e de cerca de 31,6% quando comparado ao material com microfibras de vidro (21,35 MPa). Tal comportamento mecânico pode ser associado à maior eficiência da microfibras de aço no controle da microfissuração inicial e na redistribuição de tensões após a fissuração da matriz, o que favorece um mecanismo de reforço mais ativo na zona tracionada.

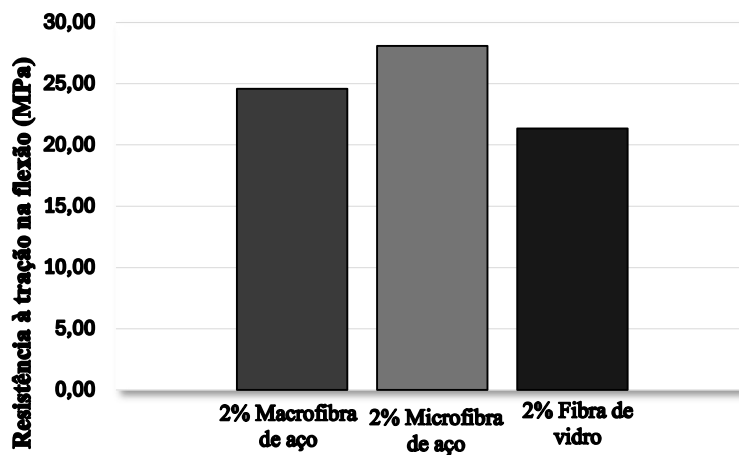
O UHPC com macrofibra de aço demonstra maior estabilidade dos resultados, com coeficiente de variação de apenas 6,75%, valor aproximadamente 33% menor que o observado para a microfibras de aço (10,12%), o que indica comportamento mecânico mais homogêneo.

Quadro 21 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos na idade de 28 dias – 2%
de teor de fibras

Teor de fibras (2%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor de fibras (2%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor de fibras (2%)	Resistência à Flexão (MPa)
Referência (macrofibra de aço)	22,68	Referência (microfibra de aço)	24,85	Referência (microfibra de vidro)	13,26
	25,27		29,24		28,94
	25,77		30,17		21,86
Média	24,58	Média	28,09	Média	21,35
Desvio Padrão	1,66	Desvio Padrão	2,84	Desvio Padrão	7,85
Coef. de variação (%)	6,75	Coef. de variação (%)	10,12	Coef. de variação (%)	36,77

Fonte: Autor

Figura 33 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos na idade de 28 dias – 2%
de teor de fibras



Fonte: Autor

O uso de microfibra de vidro resulta não apenas na menor resistência média, mas também em elevada dispersão experimental, com coeficiente de variação de 36,77%, ou seja, cerca de 5,4 vezes superior ao obtido para a macrofibra de aço, o que sugere menor eficiência de ancoragem e maior sensibilidade às heterogeneidades da matriz.

Estes resultados indicam que, além do teor volumétrico, as propriedades mecânicas, a geometria e o módulo de elasticidade das fibras são determinantes para o desempenho à tração em flexão do UHPC.

5.2.3.2 Tração na flexão por 3 pontos – Análise do UHPC com CCA e RCD

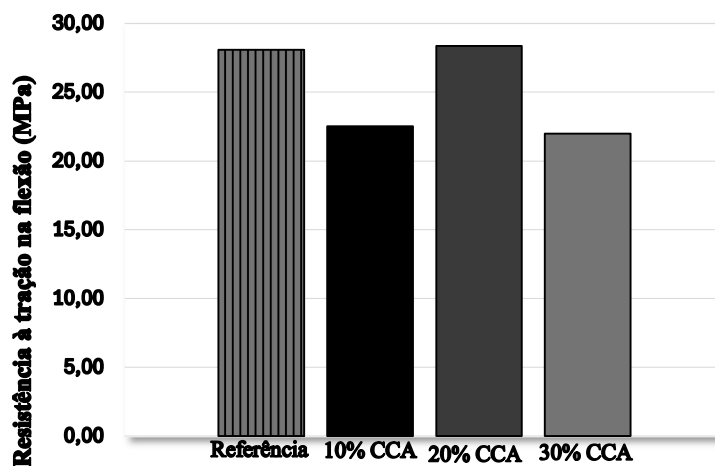
O Quadro 22 e a Figura 34 apresentam os resultados dos traços contendo 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz (CCA) em substituição parcial à sílica ativa. A análise comparativa dos resultados é realizada tomando como referência o UHPC com 2% de microfibra de aço e microfibra de vidro, o que permite avaliar, de forma sistemática, a influência das diferentes proporções de CCA como adição mineral sobre o desempenho do material. As amostras, em sua maioria, apresentam ruptura gradual, em que a concentração de fibras de aço impede a segregação de sedimentos e tampouco a separação total da peça pelo entalhe (Figuras 34 - a e 34 - b).

Quadro 22 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos do UHPC com fibras de aço e vidro na idade de 28 dias – adição de cinzas de casca de arroz

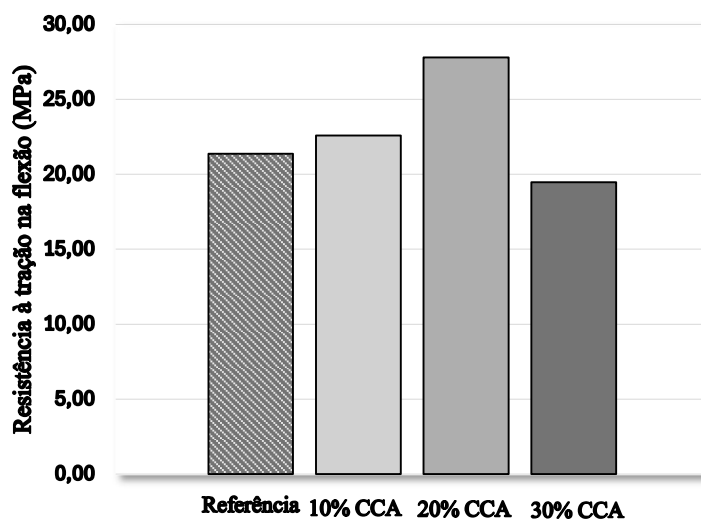
UHPC com 2% de microfibra de aço							
Teor CCA (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à Flexão (MPa)
UHPC Referência (0% de CCA)	24,85	10% de CCA	26,67	20% de CCA	42,39	30% de CCA	23,60
	29,24		21,73		21,84		22,57
	30,17		19,17		20,87		19,80
Média	28,09	Média	22,52	Média	28,36	Média	21,99
Desvio Padrão	2,84	Desvio Padrão	3,81	Desvio Padrão	12,15	Desvio Padrão	1,97
Coef. de variação (%)	10,12	Coef. de variação (%)	16,91	Coef. de variação (%)	42,85	Coef. de variação (%)	8,95
UHPC com 2% de microfibra de vidro							
Teor CCA (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor CCA (%)	Resistência à Flexão (MPa)
UHPC Referência (0% de CCA)	13,26	10% de CCA	18,31	20% de CCA	39,49	30% de CCA	22,64
	28,94		19,72		22,66		18,00
	21,86		29,74		21,26		17,75
Média	21,35	Média	22,59	Média	27,80	Média	19,46
Desvio Padrão	7,85	Desvio Padrão	6,23	Desvio Padrão	10,14	Desvio Padrão	2,76
Coef. de variação (%)	36,77	Coef. de variação (%)	27,59	Coef. de variação (%)	36,47	Coef. de variação (%)	14,17

Fonte: Autor

Figura 34 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos do UHPC com fibras de aço e vidro na idade de 28 dias – adição de cinzas de casca de arroz



a) UHPC com 2% de microfibras de aço



b) UHPC com 2% de microfibras de vidro

Fonte: Autor

O UHPC de referência com 2% de microfibras de aço, expresso na Figura 39-a, apresenta resistência média à flexão de 28,09 MPa, com desvio padrão de 2,84 MPa e coeficiente de variação de 10,12%, que sugere material com bom desempenho mecânico e adequada homogeneidade. Este comportamento está diretamente associado à elevada compacidade da matriz proporcionada pela sílica ativa, bem como à eficiente interação fibra-matriz, essencial para o mecanismo de ocorrência de fissuras característico do UHPC.

A substituição de 10% de sílica ativa por CCA resulta em uma redução da resistência média à flexão para 22,52 MPa, o que corresponde a uma queda de aproximadamente 19,8% em relação ao traço de referência. Um aumento do coeficiente de variação para 16,91% torna-se observável, sugerindo maior dispersão dos resultados. Tal comportamento indica que, nesse teor, a CCA não reproduz integralmente os efeitos físicos e químicos da sílica ativa, o que compromete a homogeneidade da matriz e a eficiência do ancoramento das fibras de aço.

Para o teor de 20% de CCA, a resistência média à flexão atinge 28,36 MPa, valor ligeiramente superior ao do UHPC de referência. Esse resultado é acompanhado por um coeficiente de variação elevado (42,85%), o que evidencia grande dispersão entre os corpos de prova. Apesar do desempenho médio satisfatório, a elevada variabilidade indica instabilidade microestrutural do material, possivelmente associada à distribuição não uniforme da CCA, à variabilidade de sua atividade pozolânica e à influência negativa na zona de transição interfacial fibra-matriz. Desta forma, esse traço apresenta potencial mecânico, porém com baixa confiabilidade estatística.

O UHPC com 30% de CCA apresenta resistência média à flexão de 21,99 MPa, que corresponde a uma redução de aproximadamente 21,7% em relação ao traço de referência. O coeficiente de variação é de 8,95%, o que aponta resultados mais homogêneos, porém com desempenho mecânico inferior. Tal comportamento sugere que teores elevados de CCA comprometem a densificação da matriz cimentícia, capazes de reduzir a eficiência do mecanismo de transferência de tensões e do ancoramento das fibras de aço.

De modo geral, os resultados indicam que a sílica ativa desempenha papel fundamental no desempenho à flexão do UHPC com fibras de aço. A CCA pode atuar como material suplementar, desde que seu teor de substituição seja cuidadosamente limitado. Embora o teor de 20% de CCA tenha apresentado resistência média comparável à referência, a elevada dispersão dos resultados inviabiliza sua aplicação sem controle rigoroso dos parâmetros de processamento e da qualidade do material pozolânico.

Apresenta-se também no Quadro 22 e na Figura 34-b a análise do comportamento à tração na flexão por três pontos aos 28 dias do UHPC reforçado com 2% de fibras de vidro, considerando como referência o traço sem adições minerais e, em seguida, os compósitos com substituição parcial da sílica ativa por cinza de casca de arroz (CCA) nos teores de 10%, 20% e 30%.

Os resultados de resistência à tração na flexão por três pontos aos 28 dias para o UHPC reforçado com 2% de fibras de vidro, apresentados na Quadro 26, indicam inicialmente que o traço de referência apresenta resistência média de 21,35 MPa, associada a elevada dispersão experimental, com desvio padrão de 7,85 MPa e coeficiente de variação de 36,77%, o que evidencia comportamento mecânico pouco homogêneo.

A incorporação de 10% de cinza de casca de arroz (CCA) resulta em resistência média de 22,59 MPa, o que representa um incremento de aproximadamente 5,8% em relação ao UHPC de referência. Observa-se que a variabilidade permanece elevada, com desvio padrão de 6,23 MPa e coeficiente de variação de 27,59%, o que denota que, neste teor, a CCA contribui de forma limitada para a estabilização do comportamento mecânico do compósito.

Para o traço com 20% de CCA, a resistência média à flexão atinge 27,80 MPa, o que corresponde a um aumento expressivo de cerca de 30,2% em relação ao UHPC de referência, um efeito positivo da substituição parcial da sílica ativa neste teor. Tal ganho pode ser associado à intensificação da reação pozolânica da CCA e ao refinamento da microestrutura da matriz, efeito que favorece a interação fibra–matriz e o mecanismo de ponte de fissuras.

Este traço apresenta desvio padrão de 10,14 MPa e coeficiente de variação de 36,47%, valores semelhantes aos do traço de referência, o que indica a dispersão dos resultados de forma elevada, possivelmente em função de heterogeneidades na distribuição das fibras de vidro e da própria CCA.

O traço com 30% de CCA apresenta resistência média de 19,46 MPa, o que representa uma redução de aproximadamente 8,9% em relação ao UHPC de referência. Analisa-se comportamento significativamente mais homogêneo, com desvio padrão de apenas 2,76 MPa e coeficiente de variação de 14,17%, o que corresponde a uma redução de cerca de 61,5% no CV quando comparado ao traço de referência. Tal resultado sugere que teores elevados de CCA podem contribuir para uma matriz mais uniforme, ainda que menos eficiente do ponto de vista mecânico.

O Quadro 23 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão por três pontos aos 28 dias para o UHPC de referência, reforçado com 2% de microfibras de aço, e para os traços

de UHPC com incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) nos teores de 50% e 100%, em substituição ao pó de quartzo. Os resultados do UHPC reforçado com 2% de microfibra de vidro e adição mineral de RCD também são expressos neste Quadro.

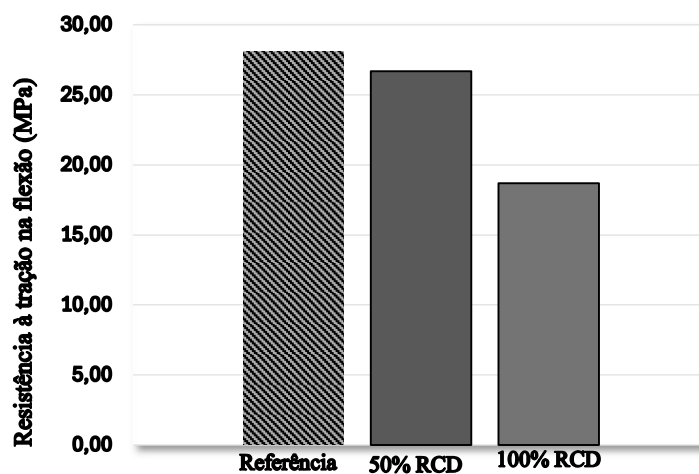
A análise comparativa tem como objetivo avaliar a influência do uso de RCD no comportamento à tração na flexão do UHPC, mantendo-se constantes o teor e o tipo de fibra, de modo a isolar os efeitos associados às alterações na matriz cimentícia e na interface fibra–matriz. Esta abordagem permite verificar o impacto do RCD tanto nos níveis de resistência quanto na variabilidade dos resultados, o que fornece subsídios para a avaliação da viabilidade técnica do seu emprego em matrizes cimentícias de ultra-alto desempenho.

Quadro 23 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos do UHPC com fibras de aço e vidro na idade de 28 dias – adição de resíduos de construção e demolição

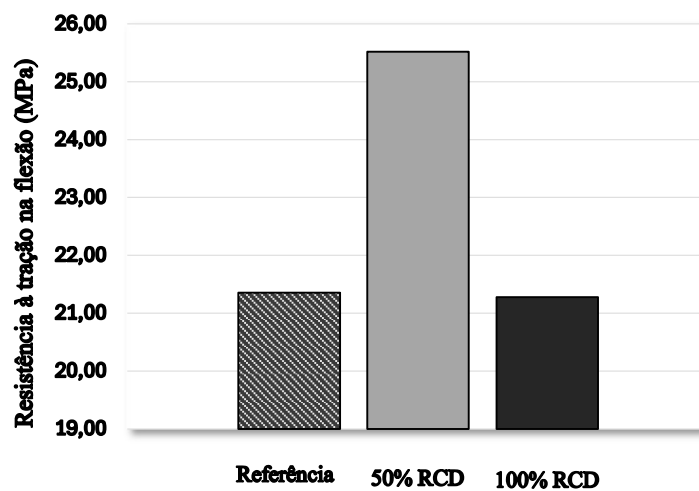
UHPC com 2% de microfibra de aço					
Teor RCD (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor RCD (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor RCD (%)	Resistência à Flexão (MPa)
UHPC Referência (0% de RCD)	24,85	50% RCD	33,39	100% RCD	19,75
	29,24		23,64		16,55
	30,17		23,01		19,75
Média	28,09	Média	26,68	Média	18,68
Desvio Padrão	2,84	Desvio Padrão	5,82	Desvio Padrão	1,85
Coef. de variação (%)	10,12	Coef. de variação (%)	21,81	Coef. de variação (%)	9,91
UHPC com 2% de microfibra de vidro					
Teor RCD (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor RCD (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Teor RCD (%)	Resistência à Flexão (MPa)
UHPC Referência (0% de RCD)	13,26	50% RCD	21,96	100% RCD	24,49
	28,94		24,77		20,04
	21,86		29,82		19,30
Média	21,35	Média	25,52	Média	21,28
Desvio Padrão	7,85	Desvio Padrão	3,98	Desvio Padrão	2,80
Coef. de variação (%)	36,77	Coef. de variação (%)	15,62	Coef. de variação (%)	13,18

Fonte: Autor

Figura 35 - Resistência à tração na flexão por 3 pontos do UHPC com fibras de aço e vidro na idade de 28 dias – adição de resíduos de construção e demolição



a) UHPC com 2% de microfibras de aço



b) UHPC com 2% de microfibras de vidro

A resistência à tração na flexão obtida no ensaio de flexão em três pontos, aos 28 dias, evidencia que a incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) afeta significativamente o desempenho mecânico do UHPC (Figura 35-a).

Para a substituição de 50% do pó de quartzo por RCD, a resistência média foi de 26,68 MPa, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 5,0% em relação à referência. Observa-se um aumento expressivo da dispersão dos resultados, com desvio padrão de 5,82 MPa e coeficiente de variação de 21,81%, que sugere maior heterogeneidade interna do compósito. Este comportamento pode ser associado à variabilidade inerente aos agregados reciclados, especialmente em função de sua composição multifásica, maior rugosidade superficial, porosidade elevada e possível presença de argamassa aderida, fatores que tendem a alterar a zona de transição interfacial e a redistribuição de tensões no material.

Para a mistura com 100% de RCD, a resistência média foi reduzida para 18,68 MPa, o que representa uma queda de aproximadamente 33,5% em relação à referência e de cerca de 30,0% em comparação à composição com 50% de RCD. Tal decréscimo mais acentuado indica que o aumento do teor de RCD compromete significativamente a capacidade resistente do compósito sob solicitação flexional, uma vez que a menor rigidez e a maior deformabilidade dos agregados reciclados reduzem a eficiência da transferência de tensões entre matriz e fibras, o que prejudica o mecanismo de ponte de fissuras, fundamental para o desempenho do UHPC à tração na flexão.

A mistura com 100% de RCD apresenta menor dispersão experimental, com desvio padrão de 1,85 MPa e coeficiente de variação de 9,91%, o que indica resposta mais uniforme entre os corpos de prova.

De modo geral, os resultados mostram que a substituição parcial por RCD ainda permite manter desempenho próximo ao da mistura de referência, enquanto a substituição total conduz a perdas mecânicas relevantes, o que evidencia que em compósitos de ultra-alto desempenho reforçados com fibras, o controle das características físicas e microestruturais dos agregados reciclados é decisivo para a manutenção da resistência à flexão.

Os resultados de resistência à tração na flexão por três pontos aos 28 dias para o UHPC reforçado com 2% de fibras de vidro, com incorporação de pó de resíduo de construção e demolição (RCD), expressos na Figura 35-b, indicam que o traço com 50% de RCD apresenta resistência média de 25,52 MPa, valor aproximadamente 19,5% superior ao do UHPC de referência (21,35 MPa). Este ganho de resistência pode estar associado ao efeito de preenchimento do pó de RCD e à possível melhoria do empacotamento granular da matriz, o

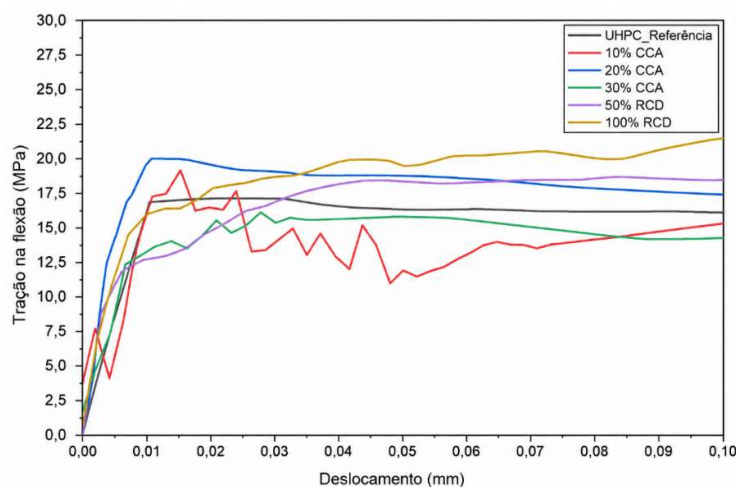
que contribui para uma transferência de tensões mais eficiente até a fissuração. O traço com 50% de RCD apresenta ainda desvio padrão de 3,98 MPa e coeficiente de variação de 15,62%, o que representa uma redução de cerca de 57,5% no CV em relação ao traço de referência (36,77%) e indica comportamento mecânico mais homogêneo.

O UHPC com 100% de RCD apresenta resistência média de 21,28 MPa, valor praticamente equivalente ao do UHPC de referência, com diferença inferior a 0,5%, o que denota que a substituição total não promove ganhos significativos de resistência à flexão. Tal traço apresenta desvio padrão de 2,80 MPa e coeficiente de variação de 13,18%, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 64,2% no CV quando comparado ao traço de referência, o que evidencia um comportamento consideravelmente mais estável.

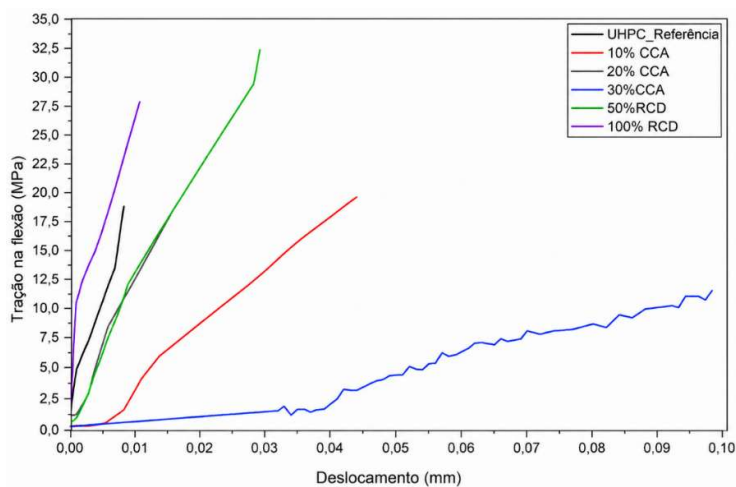
5.2.3.3 Tração na flexão por 3 pontos – Análise do diagrama força vs deslocamento

Após analisar os resultados em relação à resistência à tração média na flexão por 3 pontos, houve a necessidade de estudar os efeitos do diagrama força *versus* deslocamento do compósito com RCD e CCA para fibras de aço e vidro. Tal estudo permite investigar o comportamento pós-pico e características de ductilidade e a influência das fibras nas zonas tracionadas das amostras. Cada gráfico foi expresso com duas a três amostras prismáticas devidamente monitoradas pelo equipamento LVDT para aferir o deslocamento mediante a força aplicada. Estes dados são expressos na Figura 36-a e Figura 36-b.

Figura 36 - Diagrama de força *versus* deslocamento do UHPC com adições minerais de CCA e RCD



a) UHPC com 2% de microfibra de aço



b) UHPC com 2% de microfibra de vidro

Fonte: Autor

A Figura 36 apresenta os diagramas de tração na flexão em função do deslocamento para os compósitos de UHPC reforçados com 2% de fibras de aço e fibras de vidro.

De modo geral, todos os compósitos com microfibras de aço (Figura 45-a) apresentam comportamento característico de materiais cimentícios reforçados com fibras, com três estágios bem definidos: (I) regime elástico inicial, (II) fissuração da matriz cimentícia e

(III) regime pós-fissuração governado pelo mecanismo de ponte de fibras (*fiber bridging*) e arrancamento progressivo das fibras.

Todos os traços apresentam configurações semelhantes no diagrama em questão, onde seu comportamento elástico se dá até 0,01 mm e com resistências de pico entre 12 MPa e 20 MPa aproximadamente.

No traço de referência, observa-se um rápido crescimento da resistência até atingir valores próximos de 17 MPa, correspondentes ao início da fissuração da matriz. Após este estágio, ocorre o comportamento pós-pico ou tensão residual, que se mostra de forma constante a partir de uma deformação de 0,01 mm no centro do entalhe, associada à formação da fissura principal e à perda parcial da contribuição da matriz cimentícia, observa-se também que este material continua sua deformação de forma constante até 0,03 mm, quando começa a perder a resistência este comportamento evidencia a atuação eficiente das fibras de aço na transferência de tensões através da fissura. Tal comportamento indica que as fibras promovem um mecanismo de redistribuição de tensões e permite que o material apresente maior tenacidade e capacidade de absorção de energia, características desejáveis em compósitos de UHPC.

Para o UHPC com 10% de CCA, observa-se uma leve redução da resistência máxima, com valores próximos de 19 MPa, resistência esta 11,76% superior ao traço de referência. Após a fissuração inicial, o material apresenta um comportamento pós-fissuração relativamente estável, com redução gradual da resistência ao longo do deslocamento a partir de 0,015 mm, embora seu comportamento pós-pico seja mais acentuado.

O UHPC com 20% de CCA mostra um aumento mais significativo da resistência máxima à tração na flexão com valores próximos de 19 MPa, cujo comportamento pós-pico se dá a partir de um deslocamento de 0,011 mm com uma tensão residual mais estável, comportamento semelhante ao traço de referência, o que indica atuação das fibras na fase elástica linear.

Para a mistura contendo 30% de CCA, observa-se comportamento inferior em relação a outros teores de CCA e o UHPC_Referência, com resistência máxima próxima de 16 MPa, o que representa redução aproximada de 6% em relação ao traço de referência, no qual o diagrama indica manutenção de um patamar resistente relativamente constante ao longo do aumento do deslocamento. Seu deslocamento máximo no comportamento elástico linear, começa a partir de 0,012 mm, valor este superior aos outros traços de UHPC com cinzas de casca de arroz. Este comportamento sugere que a presença das fibras proporciona mecanismos de ponte e dissipação de energia capazes de contribuir significativamente para evitar a ruptura

frágil do compósito, embora o teor de 30% de CCA não auxilie na distribuição de tensões na flexão ao longo do material cimentício.

Os compósitos contendo adição de RCD apresentam comportamento superior ao traço de referência, com distinção no comportamento elástico-linear do UHPC, caracterizado por maiores níveis de resistência e maior estabilidade pós-fissuração. Observa-se que o compósito com 50% de RCD atinge resistência próxima de 19 MPa, superando o traço de referência em aproximadamente 10%, com um deslocamento máximo de 0,043 mm.

Já o concreto de ultra-alto desempenho com 100% de RCD apresenta um comportamento semelhante ao de 50%, com pico de tensão de 18 MPa e 0,02 mm de deslocamento. Após o pico de resistência, o material apresenta um patamar praticamente estável ao longo de todo o deslocamento analisado, o que indica possível elevada capacidade de transferência de tensões após a formação da fissura. Este comportamento pode estar relacionado a uma melhor interação entre as fibras de aço e a matriz cimentícia modificada pela presença do RCD, que favorece o mecanismo de arrancamento progressivo das fibras e aumenta a energia dissipada durante o processo de fissuração.

A adição de RCD demonstra potencial para melhorar o desempenho mecânico e o comportamento pós-fissuração do UHPC, o que proporciona maior estabilidade no patamar resistente e maior capacidade de absorção de energia. Estes resultados evidenciam que a composição da matriz exerce influência significativa na eficiência do mecanismo de atuação das fibras, sendo determinante para o desempenho mecânico global do compósito.

A área sob os diagramas força–deslocamento indica que os compósitos com melhor estabilidade pós-fissuração apresentam maior capacidade de absorção de energia, refletindo diretamente na tenacidade do material e na eficiência do mecanismo de ponte das fibras. A adição de CCA no UHPC auxilia na característica mecânica, com todos os traços, com exceção do teor de 30% de CCA, superiores ao traço de referência, o teor de 20% de CCA apresenta melhor comportamento, com alta tensão na flexão de até 19 MPa aproximadamente, e com um deslocamento de 0,01 mm no pico, ou seja, um comportamento elástico linear superior aos UHPC analisados, com capacidade de alta tensão sob deformação mínima.

A adição parcial de RCD na mistura de UHPC com relação ao comportamento mecânico de tração na flexão apresenta comportamentos elásticos lineares inferiores ao do UHPC_Referência, em que com 50% de RCD alcança tensão máxima de flexão de aproximadamente 13 MPa com uma deformação máxima de 0,01 mm, enquanto a substituição

total de pó de quartzo por RCD (100%RCD) apresenta tensão máxima de aproximadamente 16 MPa com deformação de 0,01 mm.

De forma geral, observa-se que os compósitos reforçados com fibras de vidro (Figura 36-b) apresentam comportamento mecânico distinto daquele observado para fibras metálicas, caracterizado por menor estabilidade pós-fissuração e maior tendência à perda abrupta de resistência após a fissuração da matriz. No diagrama, observa-se de maneira geral, que o material não possui comportamento residual de tensão.

No traço de referência, observa-se um crescimento rápido da resistência até valores próximos de 19 MPa, correspondentes ao regime elástico inicial e à capacidade resistente da matriz cimentícia, onde a perda de resistência após o pico ocorre de forma mais pronunciada, o que indica menor eficiência do mecanismo de transferência de tensões através da fissura. Tal característica pode ser atribuída às características mecânicas das fibras de vidro, que apresentam menor capacidade de ancoragem e menor resistência ao arrancamento quando comparadas às fibras metálicas, e resulta em menor estabilidade no regime pós-fissuração.

Com o UHPC com 10% de CCA, observa-se comportamento semelhante o UHPC_Referência tratando-se da resistência máxima salvo a exceção do deslocamento máximo que alcança valores próximos de 0,045 mm. Para o compósito de teor de 20% CCA, observa-se que o comportamento elástico linear se mostra semelhante ao UHPC_Referência, com tensão de flexão máxima de aproximadamente 16 MPa com uma deformação máxima superior à referência, de 0,015 mm.

A mistura com 30% de CCA, apresenta comportamento relativamente mais instável, com aumento progressivo da resistência ao longo do deslocamento e valores máximos próximos de 12 MPa, porém com um deslocamento de 0,1 mm.

De forma geral, tratando-se do comportamento elástico linear, o UHPC com adição mineral de cinzas de casca de arroz apresenta tensão média máxima semelhante ao UHPC_Referência, com capacidade de deslocamento no entalhe superior, o que mostra a característica elástica superior ao compósito sem adição, embora suas resistências não sejam superiores ao mesmo.

Nos compósitos contendo RCD, observa-se comportamento heterogêneo. O traço com 50% de RCD apresenta crescimento rápido da resistência até valores próximos de 31 MPa, com deslocamento máximo no entalhe de até 0,03 mm. Este comportamento indica que a eficiência do mecanismo de ponte das fibras mostra-se superior e a incorporação de RCD com comportamento *filler* auxilia na distribuição de tensões e no comportamento elástico do UHPC.

Já o compósito com 100% de RCD apresenta comportamento inferior ao UHPC com substituição parcial (50% RCD), porém com comportamento superior ao UHPC_Referência, em que sua tensão máxima atinge valores de aproximadamente 28 MPa com deslocamento máximo próximo de 0,01 mm.

Do ponto de vista micromecânico, os resultados indicam que o mecanismo dominante nos compósitos reforçados com fibras de vidro é o rompimento ou arrancamento precoce das fibras, o que reduz a capacidade do material de manter tensões residuais após a fissuração. Diferentemente das fibras de aço, que apresentam elevada resistência ao arrancamento e elevada capacidade de dissipação de energia, as fibras de vidro possuem comportamento mais frágil e menor resistência à interação mecânica com a matriz cimentícia.

Os resultados indicam que os compósitos reforçados com fibras de vidro apresentam menor estabilidade pós-fissuração e menor tenacidade quando comparados aos compósitos reforçados com fibras de aço, o que demonstra, em experimento, que o tipo de fibra exerce influência significativa no desempenho mecânico do UHPC sob esforços de tração na flexão. Traços contendo teores de RCD apresentam comportamento relativamente mais estável e superior ao UHPC_Referência, o que sugere que a composição da matriz pode influenciar a eficiência do mecanismo de transferência de tensões entre fibra e matriz.

5.2.4 Retração autógena do UHPC

As misturas de UHPC foram submetidas ao mesmo regime de cura úmida para a avaliação da variação dimensional autógena. O desmolde dos corpos de prova ocorreu no terceiro dia de idade. Em função do elevado teor de superplastificante presente nas formulações, que retarda parcialmente o ganho inicial de rigidez do sistema cimentício, adotou-se a condição $L_3 = L_0$, considerando-se essa idade como referência inicial para as leituras de variação dimensional.

5.2.4.1 Retração autógena – Análise do UHPC com fibras de aço e vidro

O Quadro 24 apresenta os valores médios de variação dimensional obtidos a partir de três corpos de prova para cada composição, acompanhados de seus respectivos desvios-padrão, nas idades estabelecidas para o ensaio. O comportamento temporal destas variações encontra-se representado graficamente e permite visualizar de forma clara a evolução dimensional das misturas ao longo do período analisado.

De maneira geral, observa-se que os concretos de ultra-alto desempenho avaliados apresentam tendência inicial de expansão nas primeiras idades. Até aproximadamente o décimo quarto dia, verifica-se um crescimento progressivo da deformação expansiva, o que indica que, nesse intervalo, os efeitos associados à formação e ao desenvolvimento dos produtos de hidratação predominam sobre os mecanismos de retração autógena. A partir desta idade ocorre uma inversão no comportamento dimensional, caracterizada pelo início de um processo de retração progressiva que se estende até o quinquagésimo sexto dia, idade final de monitoramento do ensaio.

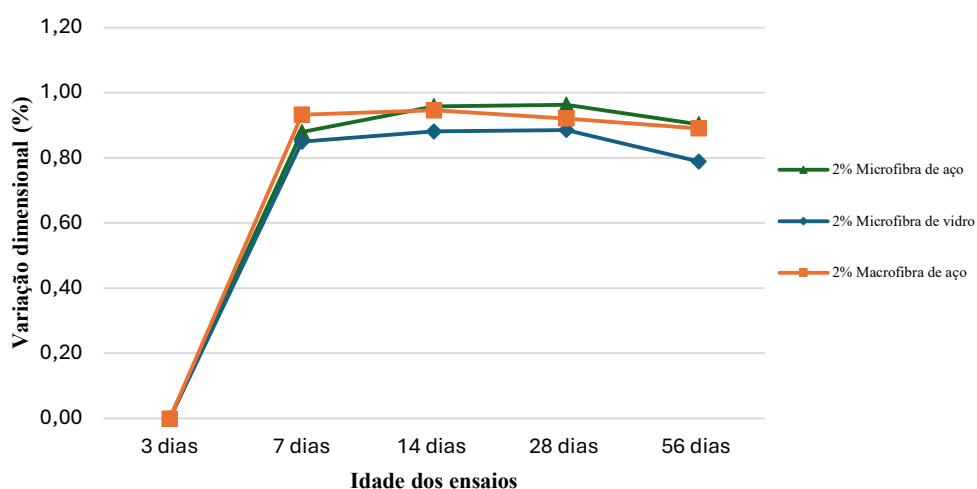
Este comportamento evidencia o caráter altamente reativo do sistema cimentício presente no UHPC, no qual a intensa hidratação inicial, associada à elevada finura dos materiais constituintes e à baixa relação água/aglomerante, promove inicialmente uma reorganização volumétrica da matriz cimentícia, seguida pela predominância dos mecanismos de autodessecação interna e retração autógena.

Tratando-se da análise entre as fibras, o Quadro 24 expressa estes resultados, com as variações de 2% de teor de macrofibra de aço, microfibra de aço e microfibra de vidro, tal como a variação dimensional é expressa graficamente na Figura 37.

Quadro 24 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de fibras

UHPC 2% Macrofibra de aço	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	UHPC 2% Microfibra de aço	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	UHPC 2% Microfibra de vidro	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)
	3	0,00	0,00		3	0,00	0,00		3	0,00	0,00
	7	0,93	0,19		7	0,88	0,06		7	0,85	0,19
	14	0,95	0,10		14	0,96	0,06		14	0,88	0,10
	28	0,92	0,14		28	0,96	0,04		28	0,89	0,14
	56	0,89	0,13		56	0,90	0,03		56	0,79	0,13

Fonte: Autor

Figura 37 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de fibras

Fonte: Autor

Observa-se que a incorporação de diferentes tipos de fibras ao UHPC resulta em comportamentos distintos quanto à variação dimensional ao longo das idades analisadas.

De modo geral, todas as composições apresentam aumento acentuado da variação dimensional entre 3 e 7 dias, seguido por uma tendência de estabilização ou leve redução até os 56 dias. Para o UHPC reforçado com 2% de macrofibras de aço, a variação dimensional atinge 0,93% aos 7 dias e apresenta leve incremento até 0,95% aos 14 dias, seguido de discreta redução para 0,92% e 0,89% aos 28 e 56 dias, respectivamente.

Um comportamento semelhante foi observado para o UHPC contendo 2% de microfibras de aço, o qual apresenta valores de 0,88%, 0,96%, 0,96% e 0,90% nas idades de 7,

14, 28 e 56 dias, respectivamente, o que indica a maior variação dimensional entre as misturas avaliadas nas idades intermediárias.

O compósito reforçado com 2% de microfibras de vidro apresenta os menores valores de variação dimensional ao longo de todo o período analisado, com 0,85% aos 7 dias e redução progressiva até 0,79% aos 56 dias. Tal comportamento sugere que as microfibras de vidro contribuem de forma mais efetiva para a restrição das deformações autógenas, possivelmente em função da maior distribuição volumétrica e da capacidade de atuar na escala microestrutural da matriz cimentícia.

Em termos comparativos, aos 56 dias, a mistura com microfibra de vidro apresenta variação aproximadamente 11% inferior à mistura com microfibra de aço e cerca de 13% inferior à mistura com macrofibra de aço, o que evidencia maior eficiência desse reforço na mitigação da variação dimensional tardia.

5.2.4.2 Retração autógena – Análise do UHPC com adições minerais de CCA e RCD

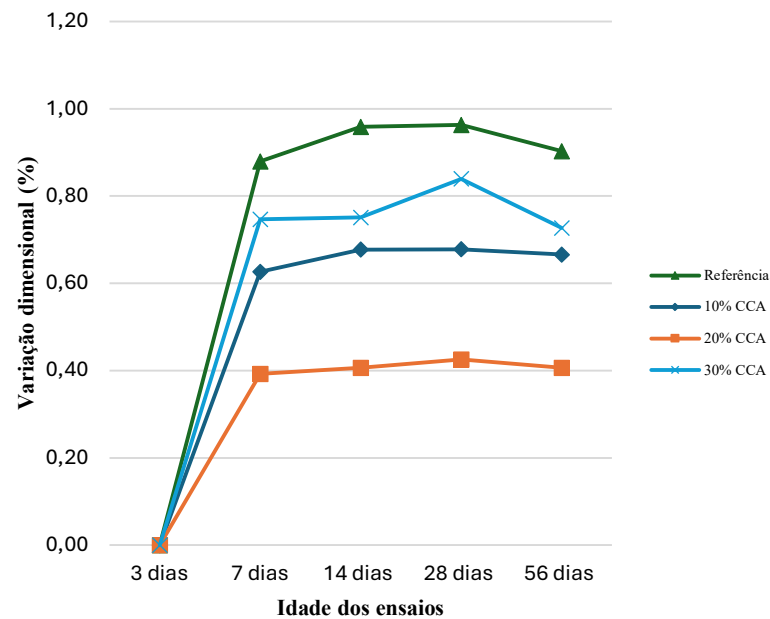
Em sequência, realiza-se a análise dos resultados do concreto de ultra-alto desempenho com teor de 2% de microfibra de aço, com adições minerais de CCA e posteriormente, com RCD. Os resultados do UHPC com adição parcial de cinza de casca de arroz na microssílica, são expressos no Quadro 25 e de forma gráfica na Figura 38 respectivamente.

Quadro 25 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de aço e cinzas de casca de arroz (CCA)

UHPC Referência	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	10% CCA	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	20% CCA	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	30% CCA	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)
	3	0,00	0,00		3	0,00	0,00		3	0,00	0,00		3	0,00	0,00
	7	0,88	0,06		7	0,63	0,03		7	0,39	0,14		7	0,75	0,23
	14	0,96	0,06		14	0,68	0,02		14	0,41	0,14		14	0,75	0,22
	28	0,96	0,04		28	0,68	0,00		28	0,43	0,14		28	0,84	0,33
	56	0,90	0,03		56	0,67	0,02		56	0,41	0,13		56	0,73	0,21

Fonte: Autor

Figura 38 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de aço e cinza de casca de arroz (CCA)



Fonte: Autor

A variação dimensional do UHPC reforçado com 2% de microfibras de aço e diferentes teores de cinza da casca de arroz (CCA) apresenta comportamento dependente do teor de substituição, o que denota a influência direta da adição pozolânica na evolução das deformações autógenas do material.

Observa-se que todas as misturas apresentam aumento acentuado da variação dimensional entre 3 e 7 dias, período em que ocorre intensa hidratação dos ligantes cimentícios e consequentemente, o desenvolvimento das deformações autógenas típicas de matrizes de UHPC.

A mistura de referência apresenta os maiores valores ao longo de todo o período analisado, atingindo 0,88% aos 7 dias e alcançando o pico de aproximadamente 0,96% aos 14 e 28 dias, seguido de leve redução para 0,90% aos 56 dias.

A incorporação de 10% de CCA resulta em redução moderada da variação dimensional, com valores de 0,63%, 0,68%, 0,68% e 0,67% nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias, respectivamente, valores que correspondem a uma diminuição aproximada de 28% em relação à mistura de referência aos 7 dias e cerca de 26% aos 56 dias. Tal característica indica que a presença da CCA contribui para modificar a cinética de hidratação e a microestrutura da matriz, que reduzem parcialmente as deformações autógenas.

A mistura com 20% de CCA apresenta a menor variação dimensional entre todas as composições analisadas, com valores de 0,39%, 0,41%, 0,43% e 0,41% nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias, respectivamente. Comparativamente à referência, tal redução atinge aproximadamente 56% aos 7 dias e 54% aos 56 dias, o que aponta elevada eficiência da substituição parcial do cimento por CCA no controle da variação dimensional do UHPC. Tal resultado pode estar associado à elevada finura e à atividade pozolânica da CCA, que favorecem o refinamento da microestrutura e alteram a disponibilidade de água nos poros capilares, o que reduz a intensidade das deformações autógenas.

O UHPC com 30% de CCA apresenta comportamento intermediário, com valores de 0,75%, 0,75%, 0,84% e 0,73% nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias, com desempenho inferior ao observado para a substituição de 20%, o que sugere que teores mais elevados de CCA podem alterar a densificação da matriz e a cinética de hidratação de forma menos favorável ao controle da deformação autógena.

De forma geral, os resultados indicam que a substituição parcial do cimento por CCA contribui significativamente para a redução da variação dimensional do UHPC, sendo o teor de 20% de CCA o que apresenta maior eficiência entre as composições analisadas.

Observa-se tendência de estabilização das deformações após 28 dias para todas as misturas, comportamento típico de matrizes de UHPC, no qual a taxa de hidratação diminui e a microestrutura torna-se progressivamente mais densa, reduzindo a evolução das deformações autógenas ao longo do tempo.

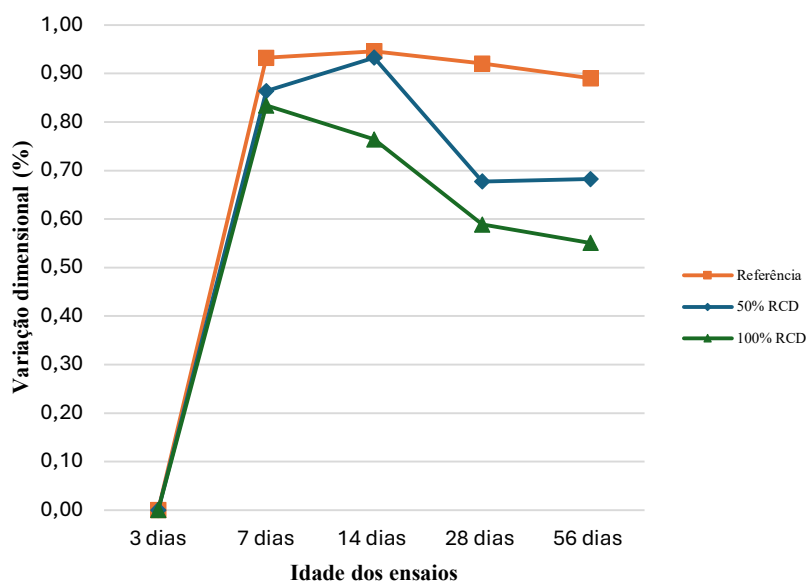
Em sequência, o Quadro 26 expressa os valores do UHPC com adição parcial de resíduos de construção e demolição (RCD) em substituição a 50% e 100% do pó de quartzo, mistura esta que contém 2% de teor de microfibra de aço. A representação gráfica destes resultados se dá pela Figura 39, que apresenta de forma ilustrativa estes resultados, em comparação ao UHPC de referência.

Quadro 26 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de aço e resíduos de construção e demolição (RCD)

UHPC Referência	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	50% de RCD	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	100% de RCD	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)
	3	0,00	0,00		3	0,00	0,00		3	0,00	0,00
	7	0,88	0,06		7	0,86	0,13		7	0,83	0,11
	14	0,96	0,06		14	0,93	0,15		14	0,76	0,07
	28	0,96	0,04		28	0,68	0,19		28	0,59	0,21
	56	0,90	0,03		56	0,68	0,18		56	0,55	0,20

Fonte: Autor

Figura 39 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibras de aço e resíduos de construção e demolição (RCD)



Fonte: Autor

A variação dimensional do UHPC reforçado com 2% de microfibras de aço e diferentes teores de resíduo de construção e demolição (RCD) evidencia influência significativa da substituição parcial do material cimentício na evolução das deformações ao longo do tempo. De maneira geral, todas as composições apresentam aumento acentuado da variação dimensional entre 3 e 7 dias, comportamento característico de matrizes de UHPC associado à intensa hidratação inicial e ao desenvolvimento da retração autógena. A mistura de referência apresenta os maiores valores de variação dimensional ao longo do período analisado, atingindo 0,88% aos 7 dias e aproximadamente 0,96% aos 14 e 28 dias, seguida por leve redução para 0,90% aos 56 dias.

A incorporação de 50% de RCD promove redução moderada da variação dimensional nas idades mais avançadas. Aos 7 dias, a mistura apresenta valor de 0,86%, próximo ao observado para a referência, e aos 28 dias a variação reduz para 0,68%, mantendo-se praticamente constante até 56 dias. Comparativamente à mistura de referência, observa-se uma redução aproximada de 29% aos 28 dias e de cerca de 24% aos 56 dias, o que indica que

a presença do RCD contribui para limitar a evolução das deformações autógenas ao longo do tempo.

O UHPC com 100% de RCD aponta uma redução ainda mais expressiva da variação dimensional. Aos 7 dias, o valor registrado foi de 0,83%, inferior ao da referência, e a partir desta idade verifica-se tendência de redução progressiva das deformações, que atingem 0,76% aos 14 dias, 0,59% aos 28 dias e 0,55% aos 56 dias, respectivamente. Em relação à mistura de referência, tais reduções correspondem aproximadamente a 38% aos 28 dias e 39% aos 56 dias, característica que aponta elevada eficiência da substituição total por RCD no controle da variação dimensional do compósito.

De modo geral, os resultados indicam que a incorporação de RCD contribui para a mitigação da variação dimensional do UHPC, especialmente nas idades mais avançadas, sendo a mistura com 100% de RCD a que apresenta o comportamento mais estável entre as composições analisadas. Tal comportamento pode estar associado à maior porosidade intrínseca das partículas recicladas, que atuam como reservatórios internos de água, fenômeno capaz de promover um efeito semelhante ao de cura interna e reduzir a intensidade das deformações autógenas ao longo do processo de hidratação. A presença destas partículas pode alterar a microestrutura da matriz cimentícia e minimizar tensões internas associadas à retração.

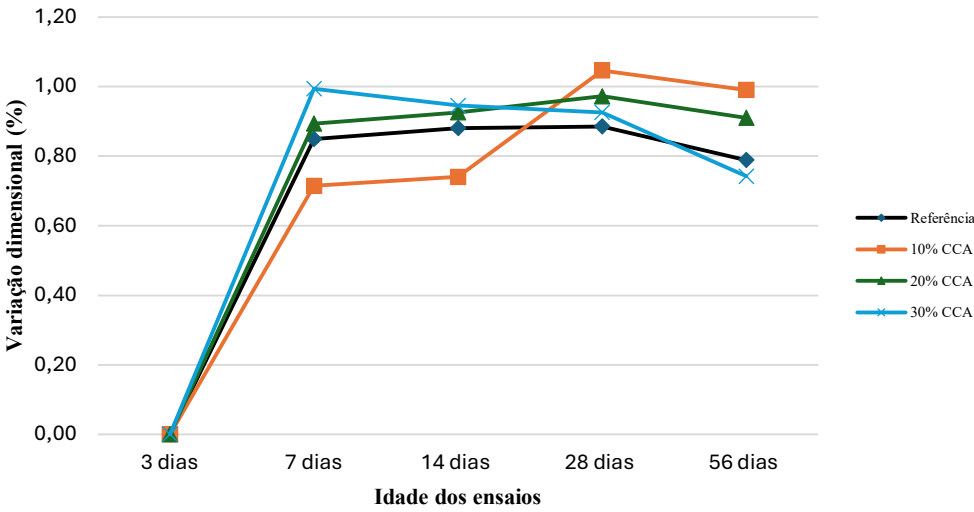
Após analisar os resultados referentes ao UHPC incorporando adições minerais e 2% de microfibras de aço, realiza-se também o estudo dos resultados da variação dimensional do compósito com adições minerais de CCA e RCD e teor de 2% de microfibras de vidro. Inicialmente, analisam-se os resultados do concreto de ultra-alto desempenho com adição de 10%, 20% e 30% de cinzas de casca de arroz para incorporação de 2% de fibras de vidro, que são expressos no Quadro 27 e na Figura 40.

Quadro 27 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de vidro e cinzas de casca de arroz (CCA)

UHPC Referência	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	10% CCA	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	20% CCA	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	30% CCA	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)
	3	0,00	0,00		3	0,00	0,00		3	0,00	0,00		3	0,00	0,00
	7	0,85	0,19		7	0,71	0,32		7	0,89	0,10		7	0,99	0,19
	14	0,88	0,10		14	0,74	0,31		14	0,93	0,11		14	0,95	0,13
	28	0,89	0,14		28	1,05	0,12		28	0,97	0,03		28	0,93	0,06
	56	0,79	0,13		56	0,99	0,08		56	0,91	0,10		56	0,74	0,05

Fonte: Autor

Figura 40 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de vidro e cinza de casca de arroz (CCA)



Fonte: Autor

A variação dimensional do UHPC reforçado com 2% de microfibras de vidro e diferentes teores de CCA apresenta comportamento dependente do teor de substituição do ligante, o que evidencia a influência significativa da cinza da casca de arroz na evolução das deformações autógenas da matriz cimentícia.

De maneira geral, todas as composições apresentam aumento expressivo da variação dimensional entre 3 e 7 dias, comportamento típico de compósitos de UHPC associado à intensa hidratação inicial e ao consumo acelerado da água capilar devido ao baixo fator água/aglomerante. A mistura de referência apresenta valores de 0,85% aos 7 dias, 0,88% aos 14 dias e 0,89% aos 28 dias, seguidos de uma redução para 0,79% aos 56 dias, que indica tendência de estabilização da deformação nas idades mais avançadas.

A mistura do UHPC com 10% de CCA apresenta valores inferiores nas primeiras idades, registrando 0,71% aos 7 dias e 0,74% aos 14 dias, dado que representa valores reduzidos de 16% e 15%, respectivamente, em relação à mistura de referência. Observa-se aumento significativo da variação dimensional aos 28 e 56 dias, que atingem 1,05% e 0,99%, respectivamente, valores superiores aos observados na referência. Tal comportamento sugere que a evolução microestrutural da matriz pode resultar em maiores deformações tardias.

Para a mistura com 20% de CCA, observa-se comportamento intermediário entre as composições analisadas. A variação dimensional atinge 0,89% aos 7 dias e 0,93% aos 14 dias, valores que aumentam ligeiramente para 0,97% aos 28 dias e reduzem para 0,91% aos 56 dias. Comparativamente à referência, esta mistura apresenta valores ligeiramente superiores em praticamente todas as idades, indicando que este teor de substituição não promove redução significativa da variação dimensional para o sistema com microfibras de vidro.

A mistura com 30% de CCA apresenta característica distinta, com valores mais elevados nas idades iniciais (0,99% aos 7 dias e 0,95% aos 14 dias), e apresenta redução progressiva nas idades posteriores, em que alcança resultados de 0,93% aos 28 dias e 0,74% aos 56 dias. Em comparação com a mistura de referência, observa-se que a deformação aos 56 dias apresenta redução de aproximadamente 6%, resultado este que denota maior estabilidade dimensional em idades tardias.

A análise geral indica que a incorporação de CCA em matrizes de UHPC reforçadas com microfibras de vidro altera significativamente o comportamento da variação dimensional, sem apresentar tendência clara de redução sistemática das deformações nas idades iniciais. Observa-se que teores mais elevados de substituição, como 30% de CCA, podem favorecer maior estabilidade dimensional em idades avançadas, comportamento este que pode estar

relacionado à elevada finura e atividade pozzolânica da CCA, que contribuem para o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia e para a redistribuição da água nos poros capilares ao longo do processo de hidratação.

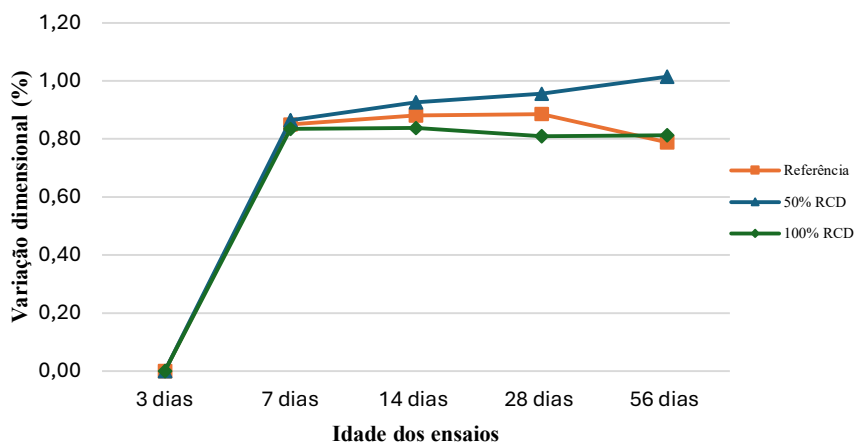
Em seguida a este estudo, ainda tratando-se do UHPC com 2% de fibras de vidro, realiza-se a análise dos resultados deste compósito com a adição mineral de resíduo de construção e demolição, dado que esta substituição é parcialmente de 50% e totalmente (100%) pelo pó de quartzo com finalidade de estudar o efeito *filler* deste material. Estes resultados são expressos de maneira numérica no Quadro 28 e de formato gráfico na Figura 41.

Quadro 28 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibras de vidro e resíduos de construção e demolição (RCD)

UHPC Referência	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	50% de RCD	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)	100% de RCD	Idade	ΔL_i (%)	Desvio padrão (%)
	3	0,00	0		3	0,00	0,00		3	0,00	0,00
	7	0,85	0,19		7	0,86	0,13		7	0,83	0,11
	14	0,88	0,10		14	0,93	0,13		14	0,84	0,07
	28	0,89	0,14		28	0,96	0,13		28	0,81	0,03
	56	0,79	0,13		56	1,01	0,03		56	0,81	0,03

Fonte: Autor

Figura 41 - Variação dimensional ΔL_i do UHPC com 2% de microfibra de vidro e resíduos de construção e demolição (RCD)



Fonte: Autor

A variação dimensional do UHPC reforçado com 2% de microfibras de vidro e diferentes teores de resíduo de construção e demolição (RCD) apresenta comportamento dependente do teor de substituição, assim como a CCA, o que denota a influência do agregado reciclado na evolução das deformações autógenas da matriz cimentícia.

A incorporação de 50% de RCD resulta em comportamento distinto ao longo do período analisado. No sétimo dia, a mistura apresenta valor de 0,86%, próximo ao observado para a referência, mas diferente da amostra de referência. A variação dimensional aumenta progressivamente nas idades posteriores, quando atinge 0,93% aos 14 dias, 0,96% aos 28 dias e 1,01% aos 56 dias. Em comparação com a mistura de referência, observa-se aumento aproximado de 4% aos 14 dias, 8% aos 28 dias e cerca de 28% aos 56 dias, o que indica a contribuição para intensificar as deformações dimensionais em idades mais avançadas do UHPC com 50% de RCD.

A mistura com 100% de RCD apresenta característica mais estável ao longo do tempo. Aos 7 dias, registra variação de 0,83%, valor ligeiramente inferior ao da referência, mantendo valores relativamente próximos nas idades subsequentes, com 0,84% aos 14 dias, 0,81% aos 28 dias e 0,81% aos 56 dias. Comparativamente à mistura de referência, observa-se redução aproximada de 5% aos 28 dias e de cerca de 3% aos 56 dias, o que indica que a substituição total por RCD contribui para maior estabilidade dimensional do composto.

5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO UHPC: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS LABORATORIAIS E DADOS DA LITERATURA

Como último parâmetro de análise dos resultados, utilizaram-se os dados coletados no Subcapítulo 3.3 para a comparação das propriedades mecânicas do UHPC em função do teor de fibras empregado. A metodologia adotada consistiu no cálculo das médias das propriedades mecânicas reportadas na maior parte dos estudos analisados, utilizando-as como referência comparativa em relação aos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa.

As propriedades mecânicas selecionadas para a análise comparativa foram: resistência à compressão axial (MPa), resistência à tração na flexão (MPa) e módulo de elasticidade (GPa), considerando UHPC com teor de 2% de microfibras de aço, comprimento de fibras variando entre 13 mm e 20 mm, cura submersa e idade de ruptura aos 28 dias. O Quadro 29 apresenta os dados coletados referentes às propriedades mecânicas reportadas na literatura e aos resultados obtidos em laboratório.

Observa-se, ainda, a escassez de informações na literatura acerca de ensaios relacionados ao módulo de elasticidade e à resistência à tração na flexão em compósitos reforçados com fibras de aço e fibras de vidro.

Quadro 29 - Propriedades mecânicas encontradas na literatura para UHPC com 2% de fibras

Teor de 2% de fibras de aço						2% de fibras de vidro					
Compressão axial (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)		Tração na flexão (MPa)		Compressão axial (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)		Tração na flexão (MPa)	
Li <i>et. al</i> (2022)	161	Zhang <i>et. al</i> (2023)	40,1	Li <i>et. al</i> (2022)	27,5	Yan, <i>et.al</i> (2021)	120	Yan, <i>et.al</i> (2021)	29,5	Yan, <i>et.al</i> (2021)	24
WU <i>et. al</i> (2019)	149,9	Krahl <i>et. al</i> (2018)	44,5	Li <i>et. al</i> (2020)	11,4	Mohammed <i>et.al</i> (2021)	158	Mohammed <i>et.al.</i> (2021)	43,1	Mohammed <i>et.al.</i> (2021)	15,5
Zhang <i>et. al</i> (2023)	151	Krahl <i>et. al</i> (2019)	41,5	Li <i>et.al</i> (2020)	25,97	He <i>et. al</i> (2021)	132		41,5		15
Krahl <i>et. al</i> (2018)	150,5	Li <i>et. al</i> (2020)	29	WU <i>et.al</i> (2019)	41,73	P. Sujitha Magdalene <i>et al.</i> (2023)	107	He <i>et.al.</i> (2021)	38	-	-
Yu <i>et. al</i> (2014)	146	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Li <i>et. al</i> (2020)	127,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	154	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WUA <i>et. al</i> (2019)	120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wang <i>et. al</i> (2023)	158,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor

O Quadro 30 expressa os resultados das propriedades mecânicas médias dos dados encontrados na literatura, que será chamado de UHPC-1 com os resultados alcançados em laboratório, chamados de UHPC-2. Neles estão resultados médios de compressão axial, tração na flexão, e módulo de elasticidade do UHPC com 2% de fibras de aço e vidro, tal qual seu desvio padrão e coeficiente de variação.

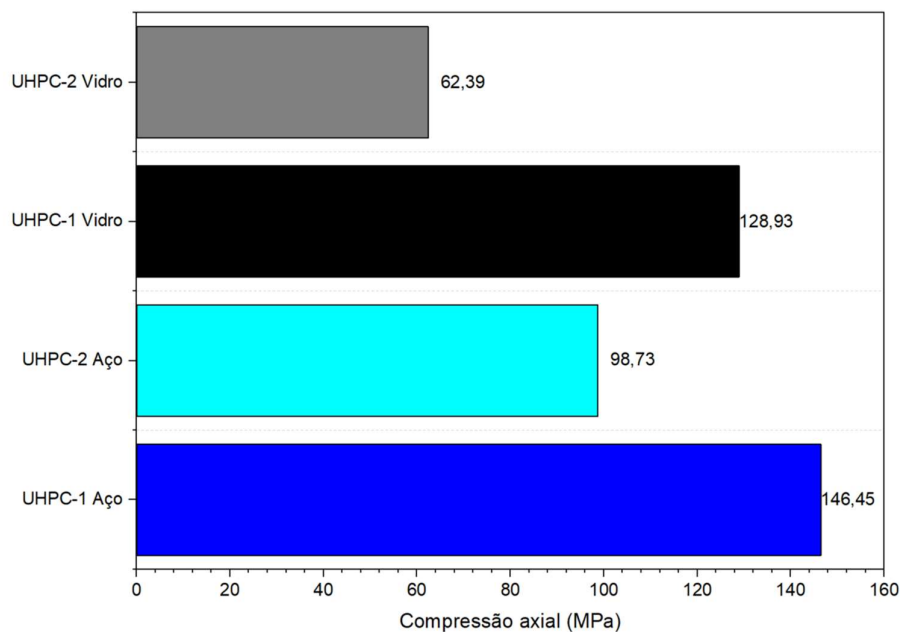
Quadro 30 - Propriedades mecânicas do UHPC com fibras de aço e vidro –
Resultados da literatura e resultados experimentais

UHPC - 2% de microfibras de aço								
Propriedade mecânica	UHPC-1	UHPC-2	Propriedade mecânica	UHPC-1	UHPC-2	Propriedade mecânica	UHPC-1	UHPC-2
Compressão axial (MPa)	146,45	98,73	Módulo de elasticidade (GPa)	38,78	37,35	Tração na flexão (MPa)	26,65	28,09
Desvio padrão	13,75	1,81	Desvio padrão	6,77	2,74	Desvio padrão	12,40	2,84
Coef. de variação (%)	9,39	1,83	Coef. de variação (%)	17,46	7,33	Coef. de variação (%)	46,52	10,12
UHPC - 2% de microfibras de vidro								
Propriedade mecânica	UHPC-1	UHPC-2	Propriedade mecânica	UHPC-1	UHPC-2	Propriedade mecânica	UHPC-1	UHPC-2
Compressão axial (MPa)	128,93	62,39	Módulo de elasticidade (GPa)	38,03	46,70	Tração na flexão (MPa)	18,17	21,35
Desvio padrão	21,65	12,42	Desvio padrão	6,07	3,82	Desvio padrão	5,06	7,85
Coef. de variação (%)	16,80	19,90	Coef. de variação (%)	15,96	8,18	Coef. de variação (%)	27,84	36,77

Fonte: Autor

A Figura 42 apresenta um gráfico comparativo dos resultados médios de resistência à compressão axial aos 28 dias para os compósitos UHPC-1 e UHPC-2 reforçados com fibras de aço e fibras de vidro. A partir da análise dos resultados, torna-se possível verificar a compatibilidade entre os valores obtidos experimentalmente em laboratório e aqueles reportados na literatura especializada.

Figura 42 - Resistência à compressão axial aos 28 dias para o UHPC com 2% de fibras de aço e 2% de fibras de vidro



Fonte: Autor

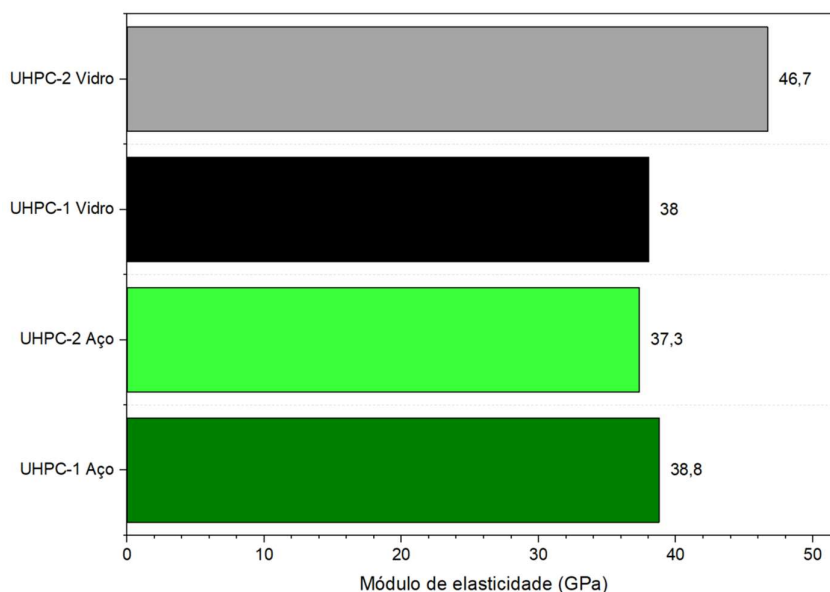
Com base nos resultados apresentados na Figura 42, observa-se que os valores de resistência à compressão obtidos experimentalmente em laboratório foram inferiores àqueles reportados na literatura, tanto para os compósitos reforçados com fibras de aço quanto para os reforçados com fibras de vidro.

Para os compósitos com fibras de aço, verificou-se que o UHPC-2 apresentou resistência à compressão 32,6% inferior em relação ao UHPC-1. Tal comportamento pode estar associado a fatores como segregação das fibras, influência do tipo de fibra empregado no estudo experimental — especialmente em função do peso das fibras, que pode favorecer o processo de segregação —, bem como à possível heterogeneidade na mistura dos materiais constituintes do UHPC.

Comportamento semelhante foi observado nos compósitos reforçados com fibras de vidro, em que o UHPC-2 apresentou redução de 51,61% na resistência à compressão em comparação ao UHPC-1.

Para o módulo de elasticidade, a Figura 43 expressa os resultados obtidos para o UHPC com fibras de aço e fibras de vidro, comparando dados laboratoriais (UHPC-2) com os dados da literatura (UHPC-1).

Figura 43 - Módulo de elasticidade aos 28 dias para o UHPC com 2% de fibras de aço e 2% de fibras de vidro



Fonte: Autor

Ao analisar o módulo de elasticidade do concreto de ultra-alto desempenho, observa-se que os resultados obtidos experimentalmente para os compósitos reforçados com fibras de aço (UHPC-2) apresentaram comportamento coerente com os valores reportados na literatura (UHPC-1), mantendo valores próximos entre si. Tal resultado indica que, embora o UHPC com fibras de aço tenha apresentado resistência à compressão inferior aos valores médios encontrados em estudos bibliográficos, seu comportamento elástico linear — relacionado à capacidade de deformação do material sob tensão no regime elástico — mostrou-se compatível com os resultados descritos em trabalhos publicados.

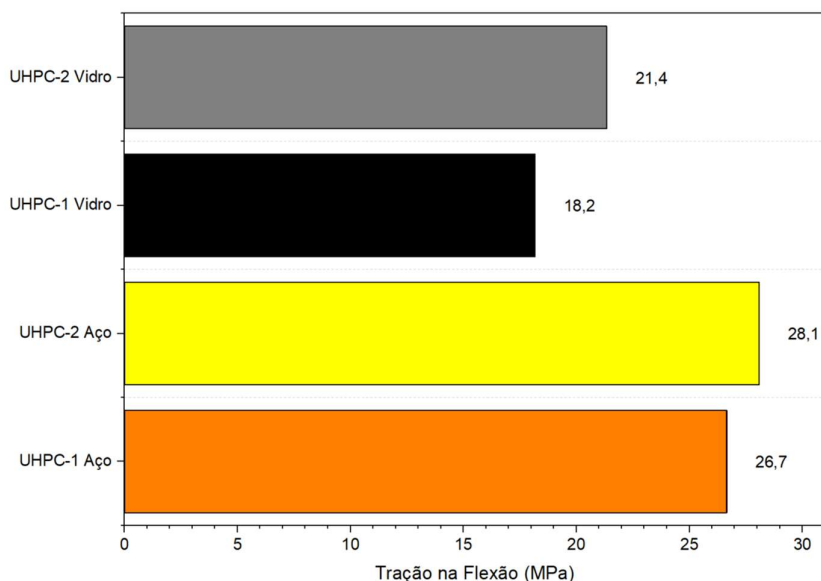
Comportamento semelhante pode ser observado para os compósitos reforçados com fibras de vidro, em que o UHPC-2 apresentou módulo de elasticidade aproximadamente 23% superior ao do UHPC-1. Esse resultado demonstra que o concreto de ultra-alto desempenho

produzido em laboratório apresentou maior rigidez quando comparado aos valores médios reportados na literatura, embora sua resistência à compressão tenha sido inferior.

A Figura 44 apresenta, de forma gráfica, os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão por ensaio de flexão em três pontos no concreto de ultra-alto desempenho, aos 28 dias de idade, considerando compósitos reforçados com 2% de microfibras de aço e 2% de microfibras de vidro.

Os valores médios reportados na literatura para os compósitos reforçados com fibras de aço e fibras de vidro foram denominados UHPC-1, enquanto os resultados obtidos experimentalmente em laboratório foram designados como UHPC-2.

Figura 44 - Tração na flexão aos 28 dias para o UHPC com 2% de fibras de aço e 2% de fibras de vidro



Fonte: Autor

Os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão indicam que o concreto de ultra-alto desempenho produzido em laboratório (UHPC-2) apresenta comportamento mecânico superior em relação aos valores médios reportados na literatura (UHPC-1), evidenciando desempenho satisfatório quanto à capacidade resistente à flexão.

Para os compósitos reforçados com fibras de aço, o UHPC-2 apresenta resistência à tração na flexão aproximadamente 6% superior ao UHPC-1. Já para os compósitos reforçados com fibras de vidro, esse comportamento mostra-se mais expressivo, com o UHPC-2 apresentando desempenho cerca de 18% superior em relação ao UHPC-1. Tais resultados sugerem que a incorporação das microfibras contribuiu de maneira significativa para o aumento da capacidade de absorção de tensões de tração e para o controle da propagação de fissuras, favorecendo o desempenho mecânico do material sob esforços de flexão.

De maneira geral, observa-se que a única propriedade mecânica em que os resultados experimentais mostraram desempenho inferior aos valores encontrados na literatura foi a resistência à compressão axial, tanto para os compósitos reforçados com fibras de aço quanto para aqueles reforçados com fibras de vidro. Em contrapartida, os resultados obtidos para o módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão apresentaram comportamento compatível — e, em alguns casos, superior — aos dados reportados em estudos bibliográficos.

Esses resultados demonstram que o processo de dosagem, preparo e caracterização mecânica do UHPC desenvolvido em laboratório apresentou coerência técnica e reprodutibilidade satisfatória, validando o potencial de utilização de fibras de aço e fibras de vidro como materiais de reforço em concretos de ultra-alto desempenho. Além disso, os resultados obtidos evidenciam a viabilidade do desenvolvimento experimental de compósitos cimentícios avançados com elevado desempenho mecânico, contribuindo para a ampliação dos estudos relacionados ao comportamento do UHPC reforçado com fibras e para futuras aplicações na engenharia civil.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos resultados, somada ao conhecimento adquirido no embasamento teórico e nos estudos prévios a respeito do UHPC com fibras de aço e vidro, tornam-se possíveis algumas considerações:

O tipo de fibra e as adições minerais influenciam diretamente a resistência à tração por compressão diametral, na qual as misturas de UHPC com fibras de aço apresentaram maiores valores de resistência do que as com fibras de vidro. Além disso, pode-se notar que a concentração de sílica ativa contribui significativamente para a resistência à tração, haja vista que as misturas com a fração final de RCD apresentaram maiores valores de resistência à tração diametral.

Os maiores valores de resistência à compressão foram obtidos para o UHPC reforçado com fibras de aço, enquanto os maiores valores de módulo de elasticidade foram obtidos para o UHPC reforçado com fibras de vidro. Em ambos os casos para as misturas de UHPC com a fração fina do RCD.

Os resultados de resistência à compressão foram reduzidos com a incorporação da CCA e microfibras de aço, as quais, por serem mais pesadas, acabaram concentrando-se na região inferior do corpo de prova, em virtude da redução da densidade da matriz cimentícia do UHPC, causando essa redução da propriedade mecânica devido à distribuição não uniforme das tensões de compressão.

Os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade evidenciam que o desempenho mecânico do UHPC é fortemente influenciado pelo tipo de fibra e pelas adições minerais empregadas, o que auxilia no comportamento elástico linear da estrutura, onde a capacidade de deformação em relação à carga máxima é superior ao traço de referência com a adição de 20% de CCA e 50% de RCD.

As microfibras de aço proporcionam os maiores valores de resistência e maior homogeneidade do compósito, enquanto as fibras de vidro resultam em menor resistência, porém maior rigidez global no UHPC de referência.

Os resultados de resistência à tração indireta evidenciam forte dependência do tipo de fibra e das adições minerais no comportamento do UHPC. As fibras de aço, especialmente as macrofibras, apresentaram melhor desempenho, devido à maior capacidade de ponte de

fissuras e redistribuição de tensões, enquanto as fibras de vidro mostraram comportamento mais frágil e sensível às variações da matriz.

A incorporação de cinza de casca de arroz contribui para o aumento da resistência em teores ótimos, associada à atividade pozolânica, enquanto o uso de RCD demonstra potencial significativo de melhoria, especialmente em substituições parciais, com característica de promover maior compacidade e eficiência na transferência de tensões.

Tratando-se da tração na flexão por três pontos, as microfibras de aço apresentaram os melhores resultados, devido à maior eficiência no controle da microfissuração e na redistribuição de tensões, enquanto as fibras de vidro demonstraram comportamento mais frágil e maior variabilidade. A incorporação de cinza de casca de arroz, em teores moderados, pode manter ou até elevar a resistência à flexão, embora com aumento da dispersão dos resultados, enquanto teores elevados tendem a reduzir o desempenho. O uso de RCD mostra potencial de melhoria, especialmente em substituições parciais, que contribui para o empacotamento granular e para o aumento da tenacidade e da estabilidade pós-fissuração. Tal potencial de melhoria ocasionada na mistura de UHPC com RCD se deve ao maior incremento de microssílica na mistura.

O comportamento à flexão é governado pela eficiência do mecanismo de ponte de fibras e pela qualidade da interface fibra–matriz, sendo essencial o equilíbrio entre resistência, ductilidade e homogeneidade do compósito.

A análise dos diagramas força versus deslocamento evidencia o comportamento típico de compósitos cimentícios reforçados com fibras, com presença de regime elástico inicial, fissuração da matriz e resposta pós-fissuração governada pelo mecanismo de ponte de fibras. Os compósitos com fibras de aço apresentam maior estabilidade pós-pico e manutenção da capacidade resistente ao longo do deslocamento, indicando elevada tenacidade e eficiência na redistribuição de tensões.

Os compósitos com fibras de vidro demonstram comportamento mais frágil, com queda acentuada de resistência após a fissuração, o que reflete menor capacidade de ancoragem e dissipação de energia. A incorporação de CCA, especialmente em teores elevados, tende a reduzir a resistência máxima, enquanto o uso de RCD contribui para maior estabilidade do patamar pós-fissuração e aumento da capacidade de absorção de energia. Os diagramas confirmam que o desempenho à flexão está diretamente relacionado à interação fibra–matriz e à eficiência do mecanismo de transferência de tensões após a fissuração.

Os resultados de retração autógena evidenciam comportamento típico do UHPC, com expansão inicial nas primeiras idades seguida por retração progressiva ao longo do tempo, associada à hidratação.

O tipo de fibra influencia diretamente as deformações, sendo as fibras de vidro mais eficientes na mitigação da variação dimensional. A incorporação de cinza de casca de arroz mostra-se altamente eficaz na redução da retração, com destaque para o teor de 20%, que apresenta os menores valores, enquanto teores mais elevados apresentaram desempenho intermediário.

O uso de RCD também contribui para a mitigação das deformações, especialmente em maiores teores, possivelmente devido ao efeito de cura interna promovido pela maior porosidade do material reciclado. Os resultados indicam que a retração autógena do UHPC é fortemente dependente da composição da matriz e pode ser significativamente controlada por meio do uso adequado de adições minerais e fibras.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o desempenho do UHPC está diretamente associado à sinergia entre a composição da matriz cimentícia, o tipo de fibra e as adições minerais empregadas. A caracterização dos materiais evidencia a importância de constituintes pozolânicos e de efeito filler na densificação da microestrutura, o que reflete nos resultados mecânicos.

Nos ensaios de compressão, módulo de elasticidade, tração indireta e flexão, verifica-se que as fibras de aço proporcionam os melhores desempenhos, especialmente em termos de resistência, tenacidade e estabilidade pós-fissuração, enquanto as fibras de vidro apresentaram comportamento mais frágil e maior variabilidade. A incorporação de cinza de casca de arroz mostrou potencial significativo, principalmente no teor de 20% que promove melhorias ou manutenção do desempenho mecânico. O uso de resíduos de construção e demolição demonstra viabilidade técnica, e contribui para o empacotamento granular, melhoria da tenacidade e, em determinados casos, manutenção de níveis adequados de resistência.

A análise dos diagramas força versus deslocamento confirma a relevância do mecanismo de ponte de fibras na capacidade de absorção de energia e no comportamento pós-fissuração. Em relação à retração autógena, observa-se que as deformações são fortemente influenciadas pela composição do compósito, sendo mitigadas pelo uso de CCA e RCD, especialmente em teores adequados.

Assim, conclui-se que a otimização do UHPC não depende de um único parâmetro, mas do equilíbrio entre resistência, ductilidade, estabilidade e durabilidade, obtido por meio do

ajuste criterioso dos constituintes do compósito, visando atender às exigências específicas de aplicação.

Ainda existe a necessidade de investigação de métodos ou técnicas de mistura a fim de homogeneizar a mistura de UHPC, no estudo da densidade deste concreto, visto que conforme aumenta o teor de adição mineral, menor torna sua densidade, o que contribui para a segregação das fibras de aço, e assim, compromete a resistência a compressão axial.

Tratando-se da característica destes traços sob esforços de módulo de elasticidade, tração indireta, flexão e retração autógena, os valores observados são compatíveis com os existentes na literatura. Ao analisar a resistência média do UHPC sob esforços de compressão axial, notam-se valores inferiores aos da bibliografia, mostrando a necessidade de investigação mais detalhada destes resultados.

Como sugestões de futuras pesquisas, recomendam-se estudos microscópicos das trações deste compósito, aprimorar técnicas de cura a fim de uniformizar as reações químicas de hidratação, investigar a taxa de densidade das amostras endurecidas com altos teores de CCA, avaliar o custo financeiro deste compósito e emissão de CO₂ na atmosfera através da avaliação de custo de vida.

REFERÊNCIAS

ACI 239 239R-18 (2018). Ultra-High Performance Concrete: An emerging technology report. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2018.

ALI, T. K. M.; FARIDI, A. S.; ABDULBHASHEER, M. A. Influence of Optimum Particle Packing on the Macro and Micro Properties of Sustainable Concrete. *Sustainability*, v. 15, n. 19, p. 14331, 28 set. 2023. DOI: 10.3390/su151914331.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of 5 to 15 % (SN3148.03). Farmington Hills: ACI, jun. 2024.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16834:2020 – Concreto – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522:2021 – Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17246:2025 – Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC). Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

AWASSA, O.; EL-HACHA, R.; PERRY, V.. Para tirar o máximo do UHPC. *Revista Estrutura*. São Paulo: IBRACON, 2025

BLÁZY, J.; RENAUD, C.; KRAUSE, M.; et al. Glass fiber reinforced concrete as a durable and enhanced construction material. *Materials*, Basel, v. 15, n. 9, 2022.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: Isaia, G. C. *CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA*. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 1v. Cap. 8, p.261-309.

ELYASIGORJI, F.; FARAJANI, F.; HAJIPOUR MANJILI, M.; LIN, Q.; ELYASIGORJI, S.; FARHANGI, V.; TABATABAI, H. Comprehensive Review of Direct and Indirect Pozzolanic Reactivity Testing Methods. *Buildings*, v. 13, n. 11, p. 2789, 2023. DOI: 10.3390/buildings13112789.

Factos On Climate (FACTS ON CLIMATE). Global CO₂ emissions from fossil fuels & cement production., 2025. Disponível em: . Acesso em: 8 jul. 2025.

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*, [S.L.], v. 15, n. 9, p. 3027, 21 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15093027>.

FENG, Z.; SHEN, D.; LUO, Y.; HUANG, Q.; LIU, Z.; JIANG, G.. 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*, [S.L.], v. 68, p. 106035, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106035>.

GONG, J.; MA, Y.; FU, J.; HU, J.; OUYANG, X.; ZHANG, Z.; WANG, H. Elucidating the role of recycled concrete powder in low-carbon ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, v. 411, p. 135023, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135023>

GU, C.; YE, G.; SUN, W. (2015). Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. *Science China Technological Sciences*, 58, 587-599

GURSEL, A. P.; MARYMAN, H.; OSTERTAG, C. A LifeCycle Approach to Environmental, Mechanical, and Durability Properties of “Green” Concrete Mixes with Rice Husk Ash. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 823–836, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.06.029.

HA, N. S.; MARUNDRURY, S. S.; PHAM, T. M.; POURNASIRI, E.; SHI, F.; HAO, H. Effect of Grounded Blast Furnace Slag and Rice Husk Ash on Performance of UltraHighPerformance Concrete (UHPC) Subjected to Impact Loading. *Construction and Building Materials*, v. 329, p. 127213, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127213.

HE, J.; CHEN, W.; ZHANG, B.; YU, J.; LIU, H.. The Mechanical Properties and Damage Evolution of UHPC Reinforced with Glass Fibers and High-Performance Polypropylene Fibers. *Materials*, [S.L.], v. 14, n. 9, p. 2455, 9 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14092455>.

HEWLETT, Peter C.; LISKA, Martin (Ed.). *Lea’s chemistry of cement and concrete*. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. 896 p. ISBN 978-0-08-100773-0.

HUANG, H.; GAO, X.; WANG, H.; YE, H. Influence of Rice Husk Ash on Strength and Permeability of Ultra-High Performance Concrete. *Constr. Build. Mater.* 2017, 149, 621–628.

JANG, H. O.; LEE, H. S.; CHO, K.; KIM, J. Numerical and Experimental Analysis of the Shear Behavior of UltrahighPerformance Concrete Construction Joints. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018, 6429767. DOI: 10.1155/2018/6429767.

KAMJOU, A. S.; KHALOO, A.; HASSANPOUR, S.. Experimental and numerical investigation of minimum required fiber content in bending characteristics of 100 MPa UHPC-formulated concrete. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 16, p. 01066, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01066>..

KANG, S. H.; HONG, S. G.; MOON, J. The Use of Rice Husk Ash as Reactive Filler in UltraHigh Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 115, p. 389–400, 2019. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.09.004.

KANG, S. T.; LEE, Y.; PARK, Y. D.; KIM, J. K. Tensile fracture properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) with steel fibers. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 23, n. 12, p. 3864–3870, 2020.

KRAHL, P. A. CARRAZEDO, R.; DEBS, M. K.. Mechanical damage evolution in UHPFRC: experimental and numerical investigation. *Engineering Structures*, [S.L.], v. 170, p. 63-77, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.064>.

KRAHL, P. A.; GIDRÃO, G. M. S.; CARRAZEDO, R.. Cyclic behavior of UHPFRC under compression. *Cement And Concrete Composites*, [S.L.], v. 104, p. 103363, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103363..>

LI, J.; DENG, Z. Tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with different hybrid fibers. *Structural Concrete*, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 1415-1435, 25 nov. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202200353>. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/suco.202200353>. Acesso em: 02 abr. 2024.

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*, [S.L.], v. 318, p. 125935, fev. 2022. Elsevier BV..

LI, X.; CAO, M. Recent Developments on the Effects of Micro and NanoLimestone on the Hydration Process, Products, and Kinetics of Cement. *Materials*, v. 17, n. 9, p. 2133, 21 mai. 2024. DOI: 10.3390/ma17092133.

LIN, Y.; YAN, J.; WANG, Z.; FAN, F.; ZOU, C. Effect of Silica Fumes on Fluidity of UHPC: Experiments, Influence Mechanism and Evaluation Methods. *Constr. Build. Mater.* 2019, 210, 451–460.

LIU, Y.; SHI, C.; ZHANG, Z.; LI, N.; SHI, D.. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: effects of steel fiber and silica fume. *Cement And Concrete Composites*, [S.L.], v. 112, p. 103665, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103665>.

LIU, Y.; ZHANG Z.; SHI, C.; ZHU, D.; LI, N.; DENG, Y.. Development of ultra-high performance geopolymer concrete (UHPGC): influence of steel fiber on mechanical properties. *Cement And Concrete Composites*, [S.L.], v. 112, p. 103670, set. 2020. Elsevier BV. .

LU, M. et al. Worldwide scaling of waste generation in urban systems. *arXiv*, 2022. Disponível em: . Acesso em: 8 jul. 2025.

MADHKHAN, M.; SAEIDIAN, P. Mechanical properties of ultra-high performance concrete reinforced by glass fibers under accelerated aging. *Materials And Energy Research Center*, [s. l], v. 34, n. 5, p. 1074-1084, maio 2021.

MAGDALENE, P. S.; KARTHIKEYAN, B.; SELVARAJ, S. K.; DEEPIKA, S.; ALQARYOUTI, Y.; ELDIN, H. M. S.; AZAB, M.. Ultra-high-performance concrete with Iron ore tailings and non-metallic and hybrid fibers-A comprehensive experimental study. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 19, p. 02544, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02544>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02544>. Acesso em: 02 fev. 2024.

MARCHAND, P.; BABY, F. KHADOUR, A. BATTESTI, T; RIVILLON, P.; QUIERTANT, M.; NGUYEN, H.; GÉNÉREUX, G.; DEVEAUD, J.; SIMON, A.. Bond behaviour of reinforcing bars in UHPFRC. *Materials And Structures*, [S.L.], v. 49, n. 5, p. 1979-1995, 21 maio 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-015-0628-0>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2008.

MERINO, M.; HAKAN, T.; PAZ, J. da. Análise do consumo de recursos e geração de resíduos na construção civil. *Environmental Impact Journal*, 2010.

MÉSZÖLY, T; RANDL,. Assessment of Methods to Derive Tensile Properties of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *Materials*, [S.L.], v. 17, n. 13, p. 3259, 2 jul. 2024. MDPI AG. .

MOHAMMED, B. H.; SHERWANI, A. F. H.; FARAJ, R. H.; QADIR, H. H.; YOUNIS, K. H.. Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concretes: effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers. *Ain Shams Engineering Journal*, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 1557-1567, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.008>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.008>. Acesso em: 04 maio 2024.

MUHYADDIN, G. F. Mechanical and fracture characteristics of ultra-high performance concretes reinforced with hybridization of steel and glass fibers. *Heliyon*, [S.L.], v. 9, n. 7, p. 17926, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17926>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17926>. Acesso em: 04 abr. 2024.

NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. 5th ed. Pearson Education, 2011.

NEZHENTSEVA, A.; SORENSEN, E. V.; ANDERSEN, L. V.; SHULER, F. *Distribution and Orientation of Steel Fibres in UHPFRC*. Aalborg: Aalborg University, 2013.

OLAIYA, B. C.; LAWAN, M. M.; OLONADE, K. A.; SEGUN, O. O. et al. An overview of the use and process for enhancing the pozzolanic performance of industrial and agricultural wastes in concrete. *Discover Applied Sciences*, v. 7, art. 164, 21 fev. 2025. DOI: 10.1007/s42452-025-06586-1.

OLIVEIRA, C.O. e Estudo Numérico e Experimental Da Distribuição Das Fibras de Aço Em Vigas de UHPFRC; Universidade de São Paulo: São Carlos, Brazil, 2020.

PRADO, L. P. Estudo Da Interface Do Concreto Pré-Moldado e Concreto de Altíssimo Desempenho Reforçado Com Fibras. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2020.

PRADO L.P.; CARRAZEDO R.; EL DEBS M. Interface strength of High-Strength concrete to Ultra-High-Performance concrete. *Eng Struct.* 2022; 252:16
p.<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113591>.

PURTON, M. Cement production is responsible for about 8 % of the world's CO₂ emissions. World Economic Forum, 2024. Disponível em: . Acesso em: 8 jul. 2025.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z.; FANG, Z. A Review on Ultra High Performance Concrete: Part I. Raw Materials and Mixture Design. *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 741–751, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088.

SHI, F.; YIN, S.; PHAM, T. M.; TULADHAR, R.; HAO, H.. Pullout and flexural performance of silane groups and hydrophilic groups grafted polypropylene fibre reinforced UHPC. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 277, p. 122335, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122335>.

SILVA, R. V.; DE BRITTO, J.; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 85, p. 88–98, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.005>

SILVA, M. L.; PRADO, L. P.; FÉLIX, E. F.; SOUSA, A. M. D.; AQUINO, D. P.. The Influence of Materials on the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): a literature review. *Materials*, [S.L.], v. 17, n. 8, p. 1801, 14 abr. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma17081801>.

SMARZEWSKI, P. Effect of Curing Period on Properties of Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Ultra-High Performance Concrete. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, [S.L.], v. 245, p. 032059, out. 2017. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/245/3/032059>.

SMARZEWSKI, Piotr. Mechanical and microstructural studies of high performance concrete with condensed silica fume. *Applied Sciences*, v. 10, n. 3, p. 969, 2020. DOI: 10.3390/app10030969.

SOHAIL, M. G.; KAHRAMAN, R.; NUAIMI, N. A.; GENCTURK, Bora; ALNAHHAL, Wael. Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes. *Journal Of Building Engineering*, [S.L.], v. 33, p. 101669, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101669>.

TASHIMA, M. M.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; BERNABEU, J. P.; SOUSA, L. C.; MELGES, J. L. P. Cinza de Casca de Arroz (CCA) Altamente Reativa: Método de Produção e Atividade Pozolânica. *Ambiente Construído*, v. 12, p. 151–163, 2012. DOI: 10.1590/S167886212012000200010.

TAHIR, H.; ALI, B.; QURESHI, L. A.; et al. Optimization of mechanical characteristics of alkali-resistant glass fiber reinforced concrete. *Sustainability*, Basel, v. 15, 2023.

TIAN, H.; Zhou, Z.; Wei, Y.; Wang, Y.; Lu, J. Experimental investigation on axial compressive behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) filled glass FRP tubes. *Construction and Building Materials*, vol. 225, pp. 678–691, 2019.

VAN, V. T. A.; RÖBLER, C.; BUI, D. D.; LUDWIG, H. M.. Rice Husk Ash as Both Pozzolanic Admixture and Internal Curing Agent in Ultra-High Performance Concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2014, 53, 270–278.

VIGNESHWARI, M.; ARUNACHALAM, K.; ANGAYARKANNI, A. Replacement of Silica Fume with Thermally Treated Rice Husk Ash in Reactive Powder Concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 188, p. 264–277, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.008.

WANG, J.J.; ZHANG, S.S.; NIE, X.F.; YU, T.. Compressive behavior of FRP-confined ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Composite Structures*, [S.L.], v. 312, p. 116879, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116879>.

WANG, S.; XU, L.; CHI, Y.; CUI, K.; YIN, C.; LI, B.. Cyclic tensile behavior of ultra-high performance concrete with hybrid steel-polypropylene fiber: experimental study and analytical model. *Composite Structures*, [S.L.], v. 321, p. 117255, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117255>.

WANG, Y.; QIAO, P.; SUN, J.; CHEN, A.. Influence of fibers on tensile behavior of ultra-high performance concrete: a review. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 430, p. 136432, jun. 2024. Elsevier BV..

WILLE, K.; NAAMAN, A. E.; EL-TAWIL, S.; PARRA-MONTESINOS, G. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing. *Materials and Structures*, Dordrecht, v. 45, p. 309–324, 2014.

WEI, J.; LI, J.; LIU, Z.; WU, C.; LIU, J.. Behaviour of hybrid polypropylene and steel fibre reinforced ultra-high performance concrete beams against single and repeated impact loading. *Structures*, [S.L.], v. 55, p. 324–337, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.036>.

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*, [S.L.], v. 123, p. 105786, set. 2019. Elsevier BV.

WU, C.; ZHANG, Y.; LI, Q.; et al. Effect of alkali-resistant glass fiber content on the mechanical and microstructural properties of fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 314, 2022.

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, [S.L.], v. 174, p. 107021, out. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107021>.

WU, Y.; WANG, L.; ZHANG, H.; LI, Z.; ZHOU, M. Elucidating the role of recycled concrete powder in low-carbon ultra-high performance concrete: Multi-performance evaluation. *Construction and Building Materials*, v. 441, p. 137520, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137520.

XAVIER, V. H. C.; SALLES, A. M. S. L. M.; MENEGHETTI, E. M.; MAEDA, G. H. H.; SOUSA, A. M. D.; FÉLIX, E. F.; PRADO, L. P.. Experimental and Numerical Analyses on the Flexural Tensile Strength of Ultra-High-Performance Concrete Prisms with and Without Rice Husk Ash. *Buildings*, [S.L.], v. 15, n. 10, p. 1635, 13 maio 2025. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/buildings15101635>.

YANG, P.; CHEN, B.; AFGAN, S.; HAQUE, M. A.; WU, M.; HAN, J Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fiber. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 279, p. 122489, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122489>.

YANG, Y.P.; DENG, Y.G.; CHEN, L.s.. Properties of high-volume rice husk ash UHPC with various fineness. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 458, p. 139614, jan. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139614>.

YOO, D. Y.; BANTHIA, N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, Oxford, v. 73, p. 267–280, 2016

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H.J.H.. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement And Concrete Research*, [S.L.], v. 56, p. 29-39, fev. 2014. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>.

ZBED, T. Ultra High Performance Concrete – Properties and Technology. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Science*, v. 61, n. 1, p. 183–193, 2013.

ZHANG, C.; LI, Z.; WANG, Y.; et al. Mechanical behavior of alkali-resistant glass fiber reinforced concrete under impact loading. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 404, 2024.

ZHANG, S. S.; WANG J. J.; LIN, G.; FERNANDO, D.. Stress-strain models for ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) under triaxial compression. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 370, p. 130658, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130658>.

ZHANG, S. S.; WANG, J. J.; LIN, G.; YU, T.; FERNANDO, D. StressStrain Models for UltraHigh Performance Concrete (UHPC) and UltraHigh Performance FiberReinforced Concrete (UHPFRC) under Triaxial Compression. *Construction and Building Materials*, v. 370, p. 130658, 2023. DOI: 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*,

[S.L.], v. 214, p. 28-36, jul. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.106>.

ZHANG, Z.; SCHERER, G. W.; BAUER, Al.. Morphology of cementitious material during early hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 107, p. 85–100, 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.009.

ZHENG, P.; LIU, Y.; CHEN, H.; et al. Improved mechanical and microscopic properties of ultra-high-performance concrete with hybrid alkali-resistant glass fibers. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 430, 2024.