

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO –
CAMPUS RIO VERDE – GO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA APLI-
CADA E SUSTENTABILIDADE – PPGEAS**

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO
DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO DE REJEITOS DE
MINERAÇÃO E FIBRAS METÁLICAS**

**Autor: Guilherme César Martins de Moraes
Orientador: Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales**

RIO VERDE - GO

2026

GUILHERME CÉSAR MARTINS DE MORAIS

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO
DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO DE REJEITOS DE
MINERAÇÃO E FIBRAS METÁLICAS**

Projeto apresentado à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, do Instituto Federal Goiano - Campos Rio Verde – Área de concentração (Tecnologia e Ciência dos Materiais), como requisito para obtenção do título de Mestre no PPGEAS.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales

RIO VERDE - GO

2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

M828 Morais, Guilherme César Martins de
 DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO
 DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO DE REJEITOS DE
 MINERAÇÃO E FIBRAS METÁLICAS / Guilherme César
 Martins de Morais. Rio Verde, GO 2026.

108f. il.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales.

Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de
0233144 - Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e
Sustentabilidade (Campus Rio Verde).

1. Rejeitos de mineração. 2. Ultra-alta resistência. 3.
Ecoeficiência. 4. Empacotamento de partículas. 5. Economia
Circular. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 4/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO DE
REJEITOS DE MINERAÇÃO E FIBRAS METÁLICAS

Autor: Guilherme César Martins de Moraes
Orientador: Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia Aplicada
e Sustentabilidade

APROVADO em 20 de março de 2026.

Prof^ª. Dra. Alessandra Lorenzetti de
Castro
Avaliador Externo
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Philippe Barbosa Silva
Avaliador Interno
IFGOIANO / Rio Verde

Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales
Presidente da banca
IFGOIANO / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcel Willian Reis Sales**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 20/03/2026 16:46:52.
- **Alessandra Lorenzetti de Castro**, Alessandra Lorenzetti de Castro - Professor Avaliador de Banca - Universidade de São Paulo (63025530000104), em 20/03/2026 16:49:31.
- **Philippe Barbosa Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 20/03/2026 17:55:55.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 794679
Código de Autenticação: c6db85b02f





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
 MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
 SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
 INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 7/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 101
Data: 20/03/2026	Hora de início: 14:00h	Hora de encerramento: 18:00h
Matrícula do discente:	2024102331440002	
Nome do discente:	Guilherme César Martins de Moraes	
Título do trabalho:	DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO E FIBRAS METÁLICAS	
Orientador:	Marcel Willian Reis Sales	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Tecnologia e gestão em construção civil e infraestrutura	
Projeto de pesquisa de vinculação	PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO (UHPC) COM AREIAS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO E FIBRAS METÁLICAS	
Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales (Presidente da banca), Profª. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro (Avaliadora Externa) e Prof. Dr. Philippe Barbosa Silva (Avaliador Interno) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada de forma online, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de **GUILHERME CÉSAR MARTINS DE MORAIS**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Marcel Willian Reis Sales, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcel Willian Reis Sales, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 20/03/2026 16:43:08.
- **Alessandra Lorenzetti de Castro, Alessandra Lorenzetti de Castro - Professor Avaliador de Banca - Universidade de São Paulo (63025530000104)**, em 20/03/2026 16:49:31.
- **Philippe Barbosa Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 20/03/2026 17:55:42.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 794685
Código de Autenticação: aba1b96ef1



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /


O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.


Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME CESAR MARTINS DE MORAIS**
Data: 30/04/2026 09:56:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Local / /
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente
 **MARCEL WILLIAN REIS SALES**
Data: 11/05/2026 14:59:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de sabedoria e força, por me guiar e sustentar em cada etapa desta jornada.

À minha esposa, pelo amor, paciência, incentivo e compreensão incondicional que foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Sua presença e apoio foram decisivos em todos os momentos.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, pela oportunidade, pelo suporte acadêmico e pela estrutura disponibilizada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade, atenção e valiosas contribuições oferecidas a este trabalho. Sou grato pelo tempo dedicado à leitura criteriosa desta pesquisa e pela postura ética e construtiva durante a avaliação.

À empresa Realmix Concreto, pelo apoio técnico, pela parceria, pela disponibilidade de toda a infraestrutura, por incentivar e acreditar em todo o desenvolvimento e pela disponibilização de materiais e recursos essenciais para a execução desta pesquisa.

Às empresas Agera e Chryso Saint-Gobain, pela disponibilização de materiais e recursos essenciais para a execução desta pesquisa.

Aos laboratórios CRTI – Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação e Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Goiás, pela contribuição no desenvolvimento dos ensaios e análises.

À Universidade Federal de Goiás (UFG), pelo suporte científico e institucional, fundamentais para a realização deste estudo.

À minha família, amigos, colegas de trabalho e todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, deixo o meu sincero agradecimento.

BIOGRAFIA

Guilherme César Martins de Moraes é mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. Natural de Patos de Minas (MG), formou-se em Engenharia Civil pelo Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM) em 2015 e concluiu a especialização em Estruturas de Concreto Armado e Fundações pela Universidade Paulista (UNIP) em 2019.

Possui experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em dosagem de concretos, execução de obras e desenvolvimento de projetos estruturais. Atuou em pesquisas relacionadas à caracterização e aplicação de agregados na produção de concreto e participou de diversos congressos e eventos técnicos. Também colaborou na organização de eventos acadêmicos e foi membro do Crea Minas Júnior, exercendo função de secretário de atas.

Atualmente, concentra seus estudos na área de tecnologia do concreto, com foco em soluções sustentáveis e no aprimoramento do desempenho de materiais cimentícios.

Sumário

RESUMO	17
ABSTRACT	17
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivo Geral	18
1.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Justificativa	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Propriedades do UHPC	20
2.2 Materiais	22
2.2.1 <i>Silica ativa</i>	22
2.2.2 <i>Superplastificantes</i>	22
2.2.3 <i>Agregados</i>	23
2.2.4 <i>Areias de rejeitos de mineração</i>	23
2.2.5 <i>Fibras</i>	24
2.3 Empacotamento	25
2.4 Projetos de Mistura	26
2.4.1 <i>Comportamento a tração e flexão</i>	28
2.5 Aplicações	29
REFERÊNCIAS	31
CAPÍTULO 1	33
RESUMO	34
ABSTRACT	34
1 INTRODUÇÃO	35
2 METODOLOGIA	36
2.6 Planejamento	36
2.7 Execução	37
2.8 Extração	38
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS	56
CAPÍTULO 2	59
RESUMO	60
ABSTRACT	60
1 INTRODUÇÃO	61
2 MATERIAIS E MÉTODOS	62
2.1 ETAPA 1 - Caracterização dos materiais constituintes:	63
2.2 ETAPA 2: Estudo de dosagem do traço referência	64
2.3 ETAPA 3: Propriedades físicas e mecânicas nos estados fresco e endurecido, com e sem fibras metálicas	65
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
3.1 Propriedades das areias de rejeito de mineração	67
3.2 Teores ideais do traço e comportamento no estado fresco	72
3.3 Propriedades mecânicas e físicas	77
3.3.1 <i>Resistência a compressão, capilaridade e MAV</i>	77
3.3.1.1 <i>Análise Estatística por t de student</i>	85
3.3.2 <i>Energia de Fratura e Tenacidade</i>	86

3.3.2.1	Análise Estatística por t de student.....	93
3.3.3	<i>Módulo de elasticidade</i>	95
3.4	Impacto ambiental	97
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
	REFERÊNCIAS	104
	CONCLUSÃO GERAL	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - MEV de ITZ entre argamassa de cimento convencional e UHPC.	23
Figura 2 - Mecanismos de absorção de energia da fibra-matriz.	24
Figura 3 - Concreto tradicional versus UHPC.	26
Figura 4 - Comparação entre vários materiais do concreto.	26
Figura 5 - Comportamento da tensão-deformação de tração do UHPC.	28
Figura 6 - Comportamento de fissuração do UHPC.	29
Figura 1-1 - Etapas do Mapeamento.	36
Figura 2-1- Formulário de qualidade da RSL para definição dos trabalhos.	37
Figura 3-1- Formulário de extração da RSL para definição dos trabalhos.	38
Figura 4-1 - Fluxo de seleção e extração dos artigos	39
Figura 1-2 – Representação dos materiais constituintes.	62
Figura 2-2 – (a) Materiais secos utilizados para composição do concreto; (b) Aditivo utilizado no desenvolvimento do estudo; (c) Fibras metálicas utilizadas no desenvolvimento do estudo	62
Figura 3-2 – Fluxograma das etapas dos métodos.	63
Figura 4-2 – Sequência de mistura do traço ideal	65
Figura 4-2 – Ensaio a ser realizados nos estados fresco e endurecido.	66
Figura 6-2 – Gráficos da análise por difração de Raios X (DRX) das areias de rejeitos de mineração.	67
Figura 7-2 – Gráficos da análise por termogravimetria das areias de rejeitos de mineração ...	68
Figura 8-2 – Calorimetria semiadiabática com os aglomerantes do traço.	73
Figura 9-2 – Comparação das curvas granulométricas das 3 amostras por retido	73
Figura 10-2 – Curva de composição por acumulado com a curva ideal e o R^2 da composição	74
Figura 11-2 – Composição e teores ideais do traço de UHPC com areias de rejeito de mineração (UHPC-TS)	75
Figura 12-2 – Concreto após espalhamento segundo ASTM C1437:2020	76
Figura 13-2 – Evolução das resistências à compressão nas idades 7 e 28 dias, com e sem fibra	78
Figura 14-2 – Corpo de prova sem fibra após rompimento por compressão	78
Figura 15-2 – (a) Imagem 1 de MEV do UHPC-TS sem fibra metálica; (b) EDS do ponto 1 da Imagem 1; (c) EDS do ponto 2 da Imagem 1; (d) EDS do ponto 3 da Imagem 1; (e) EDS do ponto 4 da Imagem 1	79
Figura 16-2 – (a) Imagem 4 de MEV do UHPC-TS com fibra metálica; (b) EDS do ponto 1 da Imagem 4; (c) EDS do ponto 2 da Imagem 4; (d) EDS do ponto 3 da Imagem 4; (e) EDS do ponto 4 da Imagem 4	80
Figura 17-2 – (a) Imagem 5 de MEV do UHPC-TS com fibra metálica; (b) EDS do ponto 1 da Imagem 5; (c) EDS do ponto 2 da Imagem 5; (d) EDS do ponto 3 da Imagem 5; (e) EDS do ponto 4 da Imagem 5; (f) EDS do ponto 5 da Imagem 5; (g) EDS do ponto 6 da Imagem 5 ..	82
Figura 18-2 – Comparativo de Força x Deformação de todas as amostras	87
Figura 19-2 – (a) Ruptura do CP01 “sem fibra”; (b) Ruptura do CP01_F “com fibra”; (c) Detalhe do efeito da fibra no CP01_F	88
Figura 20-2 – (a) Face rompida do CP01 “sem fibra”; (b) Face rompida do CP01_F “com fibra”	88
Figura 21-2 – Comparativo de Tensão x Deformação de todas as amostras no ensaio de tração por compressão diametral	90

Figura 22-2 – (a) CP1 “sem fibra” posicionado para ser ensaiado; (b) CP1 “sem fibra” após ruptura para a tração por compressão diametral; (c) CP1 “com fibra” posicionado para ser ensaiado. (d) CP1 “com fibra” após ruptura para a tração por compressão diametral. (e) Detalhe do efeito da fibra no CP1 “com fibra” após ruptura para a tração por compressão diametral	91
Figura 23-2 – Imagem 1 de MEV do UHPC-TS com fibra metálica	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre projetos de mistura e resistência à compressão (28 dias).....	27
Tabela 1-1- Base de dados cadastradas e <i>strings</i> de busca utilizados na seleção.....	36
Tabela 1-2 – Análise por Fluorescência de Raio (FRX) dos óxidos maiores das areias de rejeitos de mineração	70
Tabela 2-2 – Análise por Fluorescência de Raio (FRX) dos óxidos menores das areias de rejeitos de mineração	70
Tabela 3-2 – Análise do cimento utilizado.....	72
Tabela 4-2 – Massa específica dos materiais secos do estudo	73
Tabela 5-2 – Massa unitária dos materiais secos do estudo	74
Tabela 6-2 – Índice de espalhamento segundo ASTM C1437:2020, com e sem fibra	76
Tabela 7-2 – Massa específica, rendimento e teor de ar por método gravimétrico - NBR 9833:2008	77
Tabela 8-2 – Resistências à compressão com e sem fibra, em MPa	78
Tabela 9-2 – Resultados de MAV (Massa específica, absorção de água e índice de vazios) pela NBR 9778:2005	84
Tabela 10-2 – Absorção de água por capilaridade pela NBR 9779:2012	84
Tabela 11-2 - Resumo Estatístico Descritivo para resultados de resistência a compressão.....	85
Tabela 12-2 – Valores de incremento (%) na evolução das idades dos resultados de resistência a compressão do UHPC-TS.....	86
Tabela 13-2 – Valores de tenacidade e deformação por corpo de prova.....	88
Tabela 14-2 – Valores de energia de fratura (Gf) e intensidade de tensão crítica (KIC).....	89
Tabela 15-2– Resultados de resistência a tração por compressão diametral no UHPC-TS com e sem fibras.....	90
Tabela 16-2 – Verificação estatística de ganho dos grupos “Sem Fibra” e “Com fibra”.....	90
Tabela 17-2 – Análise de significância estatística.....	94
Tabela 18-2 – Análise intragrupo por coeficiente de variação	94
Tabela 19-2 – Análise <i>t de student</i> para os resultados do ensaio de tração por compressão diametral	95
Tabela 20-2 – Resultados dos ensaios de Módulo de elasticidade em GPa com análise estatística descritiva.....	96
Tabela 21-2 – Comparativo entre grupos e dentro dos grupos.....	96
Tabela 22-2 – Comparativo por <i>t de student</i> entre grupos e dentro dos grupos, para resultados com adição de alumina	96
Tabela 23-2 – Comparativo por <i>t de student</i> entre literatura e resultados desta pesquisa.....	97
Tabela 24-2 – Valores de GWP adotados, extraídos da EPD de cada material	97
Tabela 25-2 – Valores de consumo de misturas de UHPC para comparativo.....	98
Tabela 26-2 - Limite inferior de consumo de kg de CO ₂ -eq / m ³ de acordo com a faixa inferior da Tabela 23-2	98

Tabela 27-2 - Limite superior de consumo de kg de CO ₂ -eq / m ³ de acordo com a faixa inferior da Tabela 23-2	99
Tabela 28-2 - Consumo de kg CO ₂ -eq / m ³ do traço ideal do UHPC-TS deste estudo	99
Tabela 29-2 – Índice de ligantes e índice de cimento do UHPC-TS deste estudo	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-1 – Artigos selecionados pela RSL com autores, ano e revista.....	39
Quadro 2-1 – Comparativos entre os artigos aprovados.....	44
Quadro 3-1 – Artigos que centralizam substituições de agregados e aglomerantes.....	48
Quadro 4-1 – Principais lacunas dos artigos selecionados na RSL.....	50
Quadro 5-1 – Propostas de pesquisa e desenvolvimento a partir de lacunas levantadas e observadas na RSL.	53
 Quadro 1-2 – Especificações dos ensaios realizados para caracterização dos materiais.....	 63

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

a/b – Relação água/aglutinante

a/c – Relação água/cimento

a/l – Relação água/ligante

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ADVA® 458 UHPC – Aditivo superplastificante redutor de água tipo 2, acelerador de pega e de resistência

ASTM – American Society for Testing and Materials

ASTM – American Society for Testing and Materials

Ba – Bário

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CaO – Óxido de cálcio

CAR – Concreto de Alta Resistência

CBA – Cinza de fundo de carvão (Coal Bottom Ash)

CC – Concreto Convencional

CNF – Nanofibra de carbono (Carbon Nanofiber)

CO₂ – Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPV ARI RS – Cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos

CSA – Cinza de talo de milho (Corn Stalk Ash)

DRX – Difração de Raios X

EN – European Norm (Norma Europeia)

Fe₂O₃ – Óxido de ferro

FRX – Fluorescência de Raios X

FS – Fator de superplastificante (implícito no contexto)

Gf - Energia de Fratura

GGBS – Escória de alto-forno moída (Ground Granulated Blast-furnace Slag)

HSC – High Strength Concrete (Concreto de Alta Resistência)

HSHDC – High Strength High Ductility Concrete (Concreto de Alta Resistência e Alta Ductilidade)

IT – Rejeito de ferro (Iron Tailings)

ITP – Pó de rejeito de ferro (Iron Tailings Powder)

ITS – Areia de rejeito de ferro (Iron Tailings Sand)

LOI – Loss on Ignition (Perda ao fogo)

KIC - Intensidade da tenacidade da Fratura

MAA – Modelo de Andreasen e Andersen Modificado

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MgO – Óxido de magnésio

MnO – Óxido de manganês

Na₂O – Óxido de sódio **NBR** – Norma Brasileira (ABNT)

NS – Nanossílica (Nano-SiO₂)

P₂O₅ – Pentóxido de fósforo

PCA – Policarboxilato (superplastificante)

PET – Polietileno Tereftalato

P_{max} - Força de Pico

PVA – Álcool Polivinílico

RSL – Revisão Sistemática de Literatura

SBA – Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (Sugarcane Bagasse Ash)

SF – Sílica ativa (Silica Fume)

SiO₂ – Dióxido de silício (quartzo)

SO₃ – Trióxido de enxofre

StArt – State of the Art through Systematic Review (ferramenta para revisão sistemática)

TGA – Termogravimetria

UFG – Universidade Federal de Goiás **UHPC** – Ultra-High Performance Concrete (Concreto de Ultra-Alto Desempenho)

UHPC-TS – Concreto de Ultra-Alto Desempenho com Areia de Mineração

UHPGC – Ultra-High Performance Green Concrete (Concreto Verde de Ultra-Alto Desempenho)

UHPRC – Ultra-High Performance Reinforced Concrete (Concreto Reforçado de Ultra-Alto Desempenho)

UHSC – Ultra-High Strength Concrete (Concreto de Ultra-Alta Resistência)

USP – Universidade de São Paulo

RESUMO

Este trabalho investiga o desenvolvimento e as propriedades do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) com a incorporação de areias provenientes de rejeitos de mineração, buscando aliar alta performance estrutural à sustentabilidade na construção civil. O primeiro capítulo consiste em uma revisão bibliográfica sistemática que analisa o estado da arte do UHPC, destacando o papel fundamental das adições minerais e das fibras metálicas na otimização da compactidade da matriz e na ductilidade do material. O segundo capítulo detalha a metodologia experimental e os materiais utilizados, com foco na substituição do agregado miúdo convencional por rejeitos de mineração, visando mitigar os impactos ambientais da extração de areia natural e reduzir o custo de produção. A análise da literatura sugere que a utilização de rejeitos de mineração é tecnicamente viável e uma lacuna a explorar. Os resultados obtidos indicam que, as propriedades mecânicas se mantêm superiores, com resistência à compressão acima de 120MPa, uma matriz densa e uma ITZ refinada mostrada por MEV e quando incorporado fibras metálicas alia alta energia de fratura, tenacidade e resistência a tração, fundamentais para aplicações em infraestruturas críticas.

Palavras-chave: uhpc; materiais compósitos; alto desempenho; ecoeficiência; elementos esbeltos; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study investigates the development and properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with sand incorporation from mining tailings, seeking to combine high structural performance with sustainability in civil construction. The first chapter presents a systematic literature review that analyzes the state of the art of UHPC, highlighting the fundamental role of mineral additions and metallic fibers in optimizing the compactness of the matrix and ductility of the material. The second chapter details the experimental methodology and the materials used, focusing on the substitution of conventional fine aggregates with mining tailings, aiming to mitigate the environmental impacts of natural sand extraction and reduce production costs. The literature review suggests that the use of mining tailings is technically feasible, and there is a gap to be explored. The results indicate that the mechanical properties remain superior, with a compressive strength above 120 MPa, a dense matrix, and a refined ITZ as shown by SEM. When metallic fibers are incorporated, they combine high fracture energy, toughness, and tensile strength, which are fundamental for applications in critical infrastructure.

Keywords: composite materials; high performance; eco-efficiency; slender elements; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) tem se destacado na engenharia civil por suas propriedades mecânicas superiores e alta durabilidade, permitindo a construção de elementos estruturais mais esbeltos e com menores cargas permanentes. Além das vantagens em termos de resistência e durabilidade, o UHPC proporciona benefícios como maior impermeabilidade e maior resistência a ambientes agressivos, sendo amplamente empregado em pontes, passarelas e elementos arquitetônicos sofisticados (Abbas *et al.*, 2016; Mishra e Singh, 2019). Contudo, o elevado custo e o impacto ambiental associados ao alto consumo de cimento e materiais finos tornam o UHPC um material cuja aplicação em larga escala ainda é desafiadora (Bajaber e Hakeem, 2021).

Diante da crescente preocupação ambiental e da necessidade de práticas construtivas mais sustentáveis, pesquisadores têm buscado alternativas que reduzam a pegada de carbono do UHPC, como a substituição parcial do cimento por subprodutos industriais e o uso de agregados provenientes de rejeitos de mineração (Shi *et al.*, 2024; Abbas *et al.*, 2016). Essa abordagem não só contribui para a mitigação do impacto ambiental associado ao descarte de rejeitos, como também reduz o consumo de recursos naturais, como a areia de rio, cujas reservas estão cada vez mais escassas (Mishra e Singh, 2019).

Além da preocupação ambiental, outro fator essencial para o desenvolvimento do UHPC é o aprimoramento da microestrutura e zona de transição interfacial (ITZ), que, mesmo em concretos de alta resistência, ainda pode representar um ponto fraco na matriz (Mishra e Singh, 2019; Abbas *et al.*, 2016). Para superar essa limitação, o uso de fibras metálicas vem sendo amplamente estudado, pois além de melhorar a aderência na interface fibra-matriz, contribui para o controle da fissuração e proporciona maior capacidade de redistribuição de tensões, conferindo ao material um comportamento pseudo-dúctil (Leite e de Castro, 2020; Wu *et al.*, 2019).

Portanto, o presente estudo busca desenvolver um UHPC que incorpore rejeitos de mineração e fibras metálicas, com o objetivo de atender às demandas de resistência e durabilidade, ao mesmo tempo que contribui para práticas construtivas mais sustentáveis. Para tanto, serão realizadas caracterizações dos rejeitos, estudos de dosagem e avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto no estado endurecido, incluindo a análise do impacto da adição de diferentes teores de fibras metálicas em seu comportamento estrutural. Essa pesquisa pretende oferecer uma alternativa técnica viável e ambientalmente responsável para aplicações de UHPC na construção civil.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um concreto de ultra-alto desempenho incorporando rejeitos de mineração e fibras metálicas.

1.2 **Objetivos Específicos**

- Caracterizar os rejeitos de mineração na forma de areias para concreto;
- Realizar um estudo de dosagem para um concreto de ultra-alto desempenho incorporando os rejeitos de mineração;
- Caracterizar as propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido desse concreto;
- Avaliar o impacto do teor de fibras metálicas no comportamento mecânico desse concreto.

1.3 **Justificativa**

Devido às propriedades mecânicas superiores do UHPC, a utilização do UHPC na engenharia tem recebido atenção crescente nos últimos anos. As vantagens de usar concreto de maior resistência em estruturas incluem a redução dos tamanhos dos elementos e das cargas mortas da construção, oferecendo uma alternativa atraente ao concreto tradicional (Huang *et al*, 2021).

No entanto, o UHPC não é um material de construção sustentável por causa das altas emissões de carbono e altos custos de matéria-prima. O grau de hidratação do cimento é de apenas 30 e 40% devido à baixa proporção água/aglutinante, e a parte restante do cimento no UHPC atua apenas como enchimento. A substituição do cimento não hidratado por outros subprodutos ou resíduos industriais pode reduzir o uso de cimento e, assim, reduzir as emissões de carbono no processo de produção de cimento. Além disso, a alta demanda por areia fina de rio ou areia de quartzo na produção de concreto (incluindo UHPC) aumenta o custo e o risco de escassez de recursos naturais. Muitos estudos relevantes foram realizados para o potencial de substituir parcialmente agregados finos tradicionais por areias de rejeitos de ferro (ITS) em misturas de concreto. Os rejeitos de ferro (IT) são os resíduos sólidos descarregados após a concentração de minério de ferro, que têm grande quantidade de capacidade de descarga, mas baixa taxa de reciclagem. A reserva de IT é de mais de 5 bilhões de toneladas, e a capacidade de descarga está aumentando rapidamente para mais de 300 milhões de toneladas por ano. O IT descarregado ocupa grande área de terra e polui os recursos hídricos próximos, causando altos custos de gestão e outras perdas econômicas. No Brasil, empresas como a Vale têm investido

em programas de mineração circular, visando recuperar minério de ferro a partir de rejeitos e estéreis. Em 2024, a Vale recuperou a cerca de 7 milhões de toneladas de minério de ferro por meio dessas iniciativas, resultando em economia de aproximadamente R\$ 100 milhões nos primeiros seis meses do ano, ao eliminar etapas de transporte de rejeitos para pilhas e barragens. Portanto, é crucial propor métodos apropriados para o consumo de IT. Deste modo, incluir essas areias ao UPHC contribui com a mineração circular e ajuda na sustentabilidade. (Shi *et al*, 2024).

Segundo Huang *et al.* (2021), apesar de o UHPC apresentar menor porosidade em comparação ao concreto tradicional, ele ainda possui uma zona de transição na interface (ITZ) que é relativamente vulnerável. Para aprimorar a aderência entre a fibra e a matriz, existem atualmente três abordagens principais: aumentar a densidade da matriz cimentícia, melhorar o atrito entre a fibra e a matriz e reforçar a ancoragem mecânica com o uso de fibras. Além disso, as fibras contribuem para melhor controle da distribuição das fissuras e limitam a abertura no Estado Limite de Serviço, reduzindo a exposição do concreto às ações do ambiente. O uso de fibras é especialmente indicado para estruturas que exigem elevada capacidade de redistribuição de tensões.

No caso de estruturas com tensões localizadas e tensões dispersas, podem ser utilizados simultaneamente reforços locais com barras de aço e fibras dispostas aleatoriamente no concreto. A principal contribuição das fibras ocorre no estado endurecido do concreto, após a ruptura da matriz cimentícia, fornecendo resistência residual ao compósito. As fibras agem como ponte de transferência de tensão, reduzindo a concentração de tensão nas extremidades das fissuras. Com isso, o concreto torna-se um material pseudo-dúctil, apresentando certa ductilidade (Leite e De Castro, 2020).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Propriedades do UHPC

Segundo Ban (2023), com o desenvolvimento da tecnologia de produção e da ciência dos materiais, o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) com resistência à compressão uniaxial maior que 120 MPa tem atraído cada vez mais atenção na prática da engenharia. Devido às excelentes características econômicas e ambientais do UHPC, é previsível que esse material seja amplamente utilizado no campo da engenharia civil. Entender sobre as propriedades mecânicas do UHPC é de grande importância para aproveitar ao máximo as excelentes características mecânicas e econômicas. O UHPC é um material muito denso com durabilidade

excepcional. Esses atributos são obtidos por melhorar o empacotamento de partículas, reduzir a relação água/ligante para menos de 0,3 e usar alta dosagem de redutor de água.

De acordo com a ASTM C1856, o UHPC é um concreto que atende a um nível estipulado de durabilidade, comportamento de ductilidade, padrões de tenacidade e resistência à compressão de pelo menos 120 MPa. A norma EN 206:2013 especifica que a resistência à compressão do UHPC deve ser maior que 100 MPa, tornando-o um material confiável e durável para a arquitetura inovadora de edifícios modernos dosagem de constituintes intensivos em energia, como cimento e areia de rio. Assim, desenvolver UHPC, utilizando componentes menos intensivos em energia e subprodutos industriais, ajudaria a expandir o uso do material. O UHPC tem ampla gama de aplicações potenciais devido ao alto desempenho em engenharia de pontes de longo vão, engenharia militar defensiva, estrutura de formato peculiar, engenharia de construção marítima e muitos outros (BAN *et al*, 2023).

Segundo Chu *et al* (2023), atualmente o UHPC tem resistência à compressão de aproximadamente 3 a 4 vezes e módulo de elasticidade de aproximadamente 1,5 vezes ao concreto comum. Para obter modelos constitutivos de materiais precisos, é essencial estudar o comportamento mecânico do UHPC sob estados fresco e endurecido, bem como sua microestrutura. O UHPC tem a microestrutura muito densa e uniforme devido a alguns efeitos fundamentais como a compactação de partículas sólidas, a hidratação e reações pozolânicas em materiais cimentícios, a melhoria da zona de transição interfacial entre agregados e o melhoramento da matriz. A microestrutura interna do UHPC é composta principalmente de partículas de clínquer de cimento não hidratadas, areia de quartzo e produtos de hidratação, como C–S–H. Baixo teor água/materiais secos resulta em baixa porosidade que restringe o espaço disponível para o crescimento de cristais de hidróxido de cálcio (CH). O C–S–H no UHPC tem alta densidade caracterizada por maior rigidez e dureza intrínsecas do que aquelas de baixa densidade C–S–H que dominam no concreto convencional (Shi *et al*, 2015).

A porosidade e a distribuição do tamanho dos poros podem ser efetivamente melhoradas pelo uso de superplastificante, pela incorporação de partículas muito finas, por misturas mineiras reativas e pelo empacotamento das matérias-primas, melhorando o desempenho do concreto. Muitos modelos de empacotamento compacto foram propostos, os quais podem ser classificados em modelos discretos e contínuos. Alguns modelos de empacotamento foram estabelecidos com base no sistema binário ou ternário e não eram adequados para o cálculo da densidade do UPHC. Muitos pesquisadores têm usado esses diferentes modelos de empacotamento como diretrizes de projeto de UHPC, após vários melhoramentos de modelos propostos, o mais usado seria baseado na investigação do modelo de empacotamento de partículas de Fuller e

Andreasen e Andersen por uma distribuição (ótima de tamanho de partícula (PSD) de todos os materiais de partículas aplicados na mistura (De Castro e Pandolfelli, 2009).

2.2 **Materiais**

Cimento Portland, agregados finos, agregados grossos, água e aditivos opcionais compõem os elementos básicos para um concreto convencional. Para fabricar UHPC, por outro lado, é preciso eliminar o agregado graúdo, substituir parte do cimento por materiais cimentícios suplementares e usar superplastificantes para obter baixas proporções de água para cimento. O valor recomendado da relação água/ligante varia de 0,18 a 0,22 (BAN *et al*, 2023).

2.2.1 *Sílica ativa*

Um dos materiais pozolânicos mais poderosos usados em RPC é a sílica ativa (SF) porque é um material à base de sílica. Aumentar o SF além de 25% não altera significativamente a resistência à compressão do UHPC. A sílica ativa, ou microssílica, é um material residual proveniente da fumaça do forno da produção de silício metálico e ligas de ferrossilício. As partículas arredondadas da sílica ativa têm um diâmetro de 0,15 µm em média, e a maioria das partículas tem menos de 1 µm. Assim, são as menores partículas na matriz UHPC, 100 vezes menores que as partículas de cimento. É por isso que é considerado excelente enchimento para preencher os vazios entre partículas maiores na matriz UHPC. O uso desse material ultrafino resulta em uma matriz densa que melhora as propriedades mecânicas e propriedades de durabilidade do concreto. No entanto, ao aumentar o teor de sílica ativa, a resistência à compressão é rapidamente aumentada. Uma das principais desvantagens deste material é que ele requer mais água por causa das partículas extremamente finas, mas com superplastificantes, o mesmo teor de água pode ser mantido (Bajaber e Hakeem, 2021).

2.2.2 *Superplastificantes*

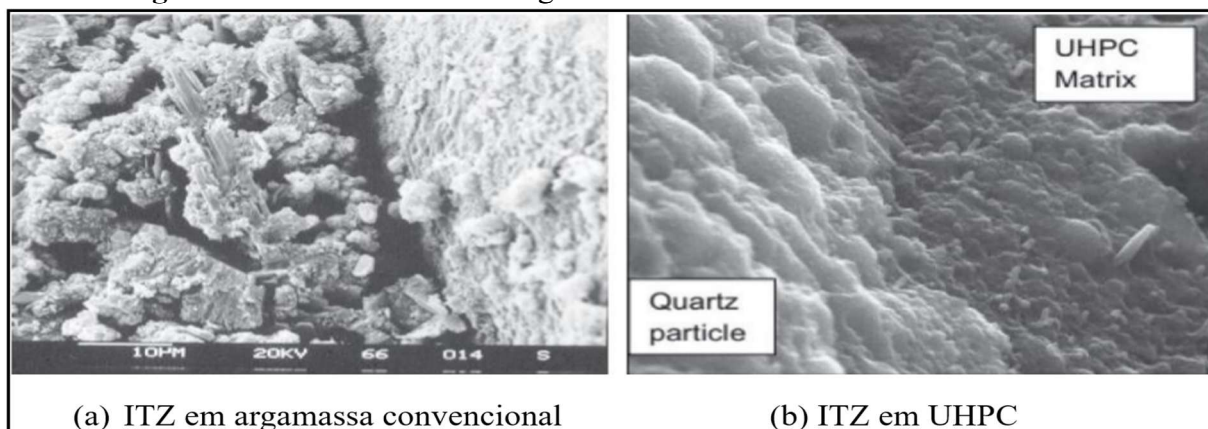
Para os superplastificantes uma dosagem apropriada deve ser especificada, caso contrário, um conflito químico e configuração tardia são observados. Superplastificantes de alto desempenho que contêm poliacarboxilato, e naftaleno sulfonato ou melamina sulfonato são adequados para desenvolver matriz uniforme. As dosagens ótimas de superplastificante normalmente são de 1–3,6%, em relação à massa de cimento, variando em função da relação água/ligante (Mayhoub *et al*, 2021). Na tecnologia UHPC, o uso de um superplastificante redutor de água de alto alcance ajuda a manter a trabalhabilidade sem a necessidade de excesso de água. Consequentemente, a relação a/l foi reduzida ao nível ótimo na faixa de 0,14 e 0,22. Isso leva

ao aumento da resistência à compressão e melhora todas as outras propriedades do concreto (Bajaber e Hakeem, 2021).

2.2.3 Agregados

Segundo Jonnalagadda e Chava (2023), um aspecto importante das misturas UHPC que requer atenção é a variabilidade na resistência e trabalhabilidade dessas misturas. As propriedades locais do material têm grandes impactos nesses aspectos. Portanto, atenção precisa ser dada à escolha e ao controle de qualidade dos materiais ingredientes. Composição do cimento, tamanho da areia, granulometria e tipo de areia podem causar grandes diferenças no produto de concreto. De acordo com Shi *et al* (2015), agregados em concreto convencional geralmente têm dureza maior do que pasta de cimento e agem como um esqueleto. No entanto, devido à diferença nas propriedades térmicas e mecânicas entre agregados e matriz de pasta, tensões de cisalhamento e tração podem ocorrer e resultar em microfissuras na zona de transição na interface (ITZ). O tamanho da fissura é proporcional ao tamanho dos agregados. Isso mostra que eliminar o agregado grosso diminui significativamente o tamanho das microfissuras no UHPC. A redução no tamanho do agregado diminui a probabilidade do próprio defeito, reduzindo a não homogeneidade do concreto.

Figura 1 - MEV de ITZ entre argamassa de cimento convencional e UHPC.



Fonte: Adaptado de Jonnalagadda e Chava (2023).

2.2.4 Areias de rejeitos de mineração

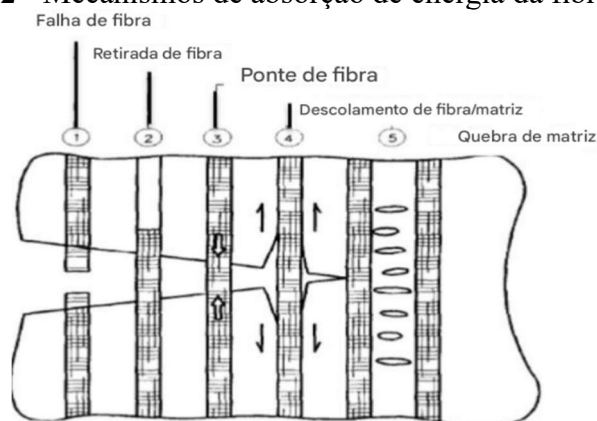
Muitos estudos relevantes foram realizados para o potencial de substituir parcialmente agregados finos tradicionais por areias de rejeitos de ferro (ITS) em misturas de concreto. Shi *et al* (2024) verificaram que concreto com taxa de substituição de ITS de 20% e 25%, tinha melhores propriedades mecânicas e menor retração de secagem. Além disso, como os principais constituintes químicos de IT são SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , areias de rejeito de ferro mais finas

podem ser utilizadas diretamente ou moídas como pó de rejeitos de ferro (ITP) e então usado para substituir parcialmente materiais cimentícios em misturas de concreto, para os quais os rejeitos exibem atividade pozolânica, após ativação mecânica para um pó fino. Portanto, de acordo com este estudo, como as conquistas na redução de custos e poluição pela utilização de ITS na produção de concreto foram comprovadas, é possível usar ITS no projeto de UHPC para melhorar a aplicabilidade do UHPC.

2.2.5 Fibras

De acordo Shi *et al* (2015), o concreto é um material frágil, com baixa resistência à tração, capacidade de deformação e tenacidade à fratura. A tenacidade é uma medida da capacidade de absorção de energia de um material e é usada para caracterizar a capacidade de resistir à fratura. A incorporação de fibras no concreto pode prevenir e controlar a iniciação, propagação ou coalescência de fissuras. Embora o custo das fibras de aço seja muito alto, ele pode melhorar significativamente a tenacidade do UHPC. Atualmente, a fibra usada no concreto inclui principalmente fibras de carbono e aço. Quando uma carga atua no concreto reforçado com fibras, as fibras não sustentam a carga diretamente, mas a matriz sim. A carga é transferida para as fibras através da interface entre as fibras e a matriz. A Figura 2 demonstra como as fibras absorvem energia e controlam o crescimento de fissuras. Começando pelo elemento de fibra mais à esquerda e prosseguindo ao longo da fissura em direção à direita na figura, eles representam a ruptura da fibra, o arrancamento, a formação de pontes por tensão através da fibra e a descolagem na interface fibra-matriz.

Figura 2 - Mecanismos de absorção de energia da fibra-matriz.



Fonte: Adaptado de Shi *et al* (2015).

A matriz cimentícia é um dos fatores que interfere no comportamento do concreto reforçado com fibras no estado endurecido. As propriedades da matriz afetam a aderência entre as fibras e a matriz, refletindo no desempenho do concreto pós-fissuração. Assim, dependendo

do tipo e do teor de fibra adicionada, e das propriedades da matriz cimentícia, o concreto reforçado com fibras pode manifestar comportamento *softening* ou *hardening*, após a fissuração. O comportamento *softening* é marcado por deformações localizadas em uma única fissura e pela redução da carga resistente pós-fissuração, enquanto no comportamento *hardening* ocorre a formação de múltiplas fissuras e aumento da capacidade resistente, após ruptura do concreto (Leite e De Castro, 2020).

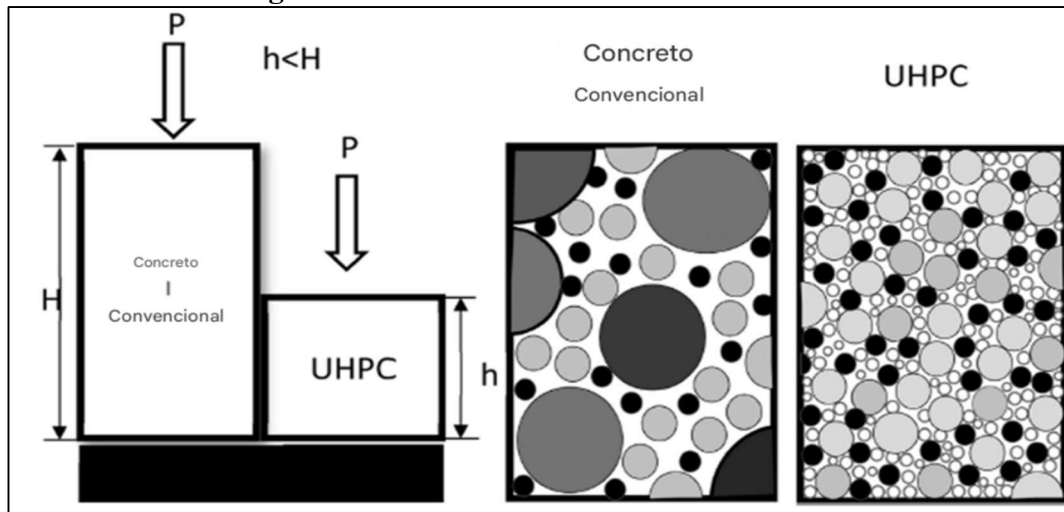
Em 2017, Lee *et al.* desenvolveram estudos de resistência à compressão e tração em elementos planos, testaram cilindros para dois tipos de mistura com e sem fibras, atingindo valores de 127,38 MPa sem fibras e 157,46 MPa com fibras. Hoang e Fehling (2017) determinaram que não há alterações significativas na resistência à compressão ou no módulo de elasticidade por causa da inclusão de fibras de aço em misturas de concreto, utilizando corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Eles atingiram 216,66 MPa e 211,69 MPa sem e com 1,5% de fibras. Kahanji *et al* (2017) atingiram 97,20 MPa utilizando 1% de fibra com cura em água a 20°C e 154,60 MPa com cura em água a 90°C, ambos por 7 dias, e posteriormente armazenados em câmara úmida até o dia do ensaio. Wu *et al* (2012) produziram uma mistura sem fibras e cinco com fibras para avaliar a resistência estática e propriedades dinâmicas do concreto submetido à compressão, atingindo 98,30 MPa e 143,6 MPa respectivamente. Alsalman *et al* (2021) atingiram 118,6 MPa sem fibras e sem tratamento térmico na cura, utilizando materiais comerciais locais (Aguero *et al*, 2019).

2.3 Empacotamento

O principal objetivo da aplicação de modelos de empacotamento de partículas é obter alta resistência mecânica e durabilidade superior, e pode ser alcançado pela incorporação de tamanhos e proporções adequados de pequenas partículas para empacotar os vazios maiores (Mayhoub *et al*, 2021).

Segundo Chu *et al* (2023), em particular, a condição de empacotamento de partículas das matérias-primas de UHPC pode ser melhorada pela otimização de seu projeto de mistura em variedade de modelos. Entre eles, o modelo de empacotamento compressível e o modelo Fuller são os modelos mais representativos. O modelo de empacotamento de partículas Andreasen e Andersen modificado (MAA), proposto por Funk e Dinger exatamente com base no modelo Fuller, é um modelo clássico de empacotamento contínuo de partículas diferente do modelo de empacotamento compressível, enquanto o modelo de empacotamento compressível é um tipo de modelo de partículas não contínuo.

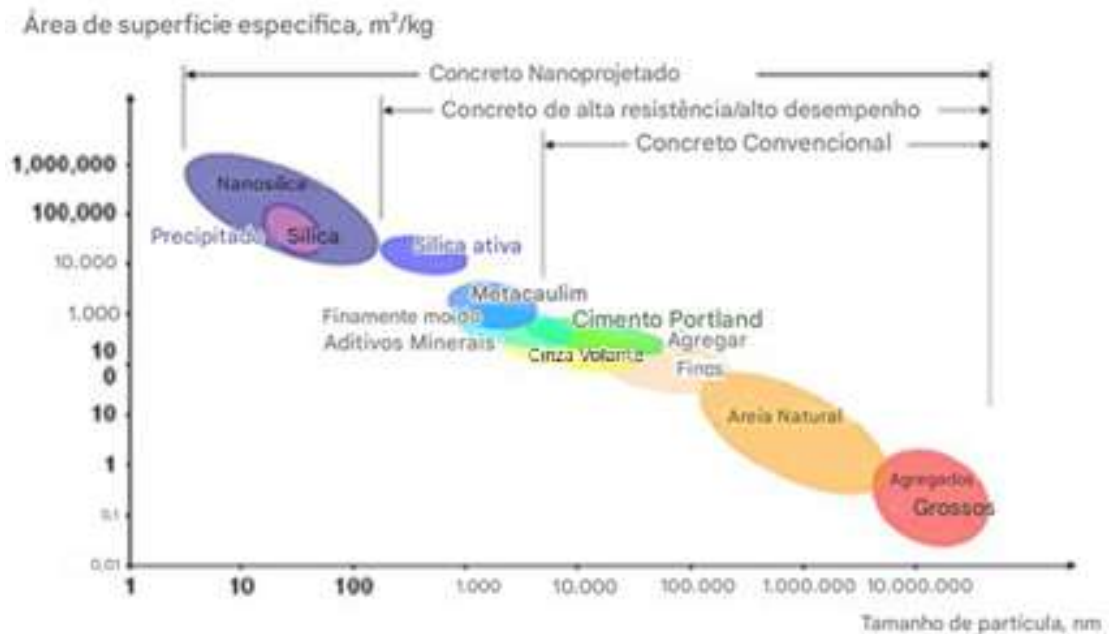
Figura 3 - Concreto tradicional versus UHPC.



Fonte: Adaptado de Kohail *et al* (2021).

Portanto, o projeto de mistura de UHPC é considerado capaz de beneficiar mais do modelo de empacotamento de partículas MAA. Sob a orientação deste modelo, Chu *et al.* (2023) produziram um UHPC que tem alta resistência mecânica com baixo teor de cimento.

Figura 4 - Comparação entre vários materiais do concreto.



Fonte: Adaptado de Chu (2023).

2.4 Projetos de Mistura

O projeto de mistura do UHPC difere do concreto tradicional por excluir agregados graúdos e usar areia fina. Inclui aditivos minerais que atuam como microenchimento,

preenchendo os pequenos vazios entre as partículas, melhorando a zona intersticial e reagindo com hidróxido de cálcio para aumentar a resistência final. O superplastificante é usado como aditivo químico para melhorar a trabalhabilidade e diminuir a relação a/b que geralmente é menor ou igual a 0,20. Na Tabela 1 é possível ver um resumo do projeto de mistura usado por alguns autores e comparar os valores de resistência à compressão obtidos com e sem o uso de fibras na mistura (Aguero *et al*, 2019).

Tabela 1 – Comparação entre projetos de mistura e resistência à compressão (28 dias).

Referência	(kg/m ³)						w/b	w/c	%fibers	MPa	
	Cimento	Escória de Alto Forno	Sílica Ativa	Microfibra	Quartzo	Areia				fck	fck*
Hassan	657	418	119	0	0	1051	0,15	0,28	2	151	121
Yu	875	0	44	0	0	1273	0,22	0,23	2,5	149	94
Habel	1050	0	275	0	0	730	0,14	0,18	6	168	-
Yang	657	430	119	0	0	1050	0,15	0,28	2	190	-
Bache	300	0	100	0	0	0	0,19	0,25	0	0	130
Larrad	1081	0	334	0	0	813	0,14	0,18	0	238	165
Rossi	1050	0	368	0	0	514	0,16	0,2	5	205	-
Lim	543	0	80	0	0	1242	0,21	0,24	1,5	121	-
Graybeal	710	0	230	0	210	1020	0,14	0,15	2	193	126
Thanh	657	657	119	0	0	1051	0,15	0,28	2,5	186	144
Toledo	1011	0	58	76	0	962	0,17	0,16	2	162	-
Wu	863	315	216	0	0	1079	0,18	0,21	2	-	118
Lampropoulos	657	418	119	0	0	1051	0,15	0,28	3	-	-
Hoang	795	0	169	0	198	971	0,16	0,24	1,5	212	217
Kahanji	967	0	251	0	0	675	0,2	0,25	1	155	-
Wu	472	315	262	0	0	1049	0,17	0,38	2	144	98

fck* : Resistência a Compressão sem o uso de fibras

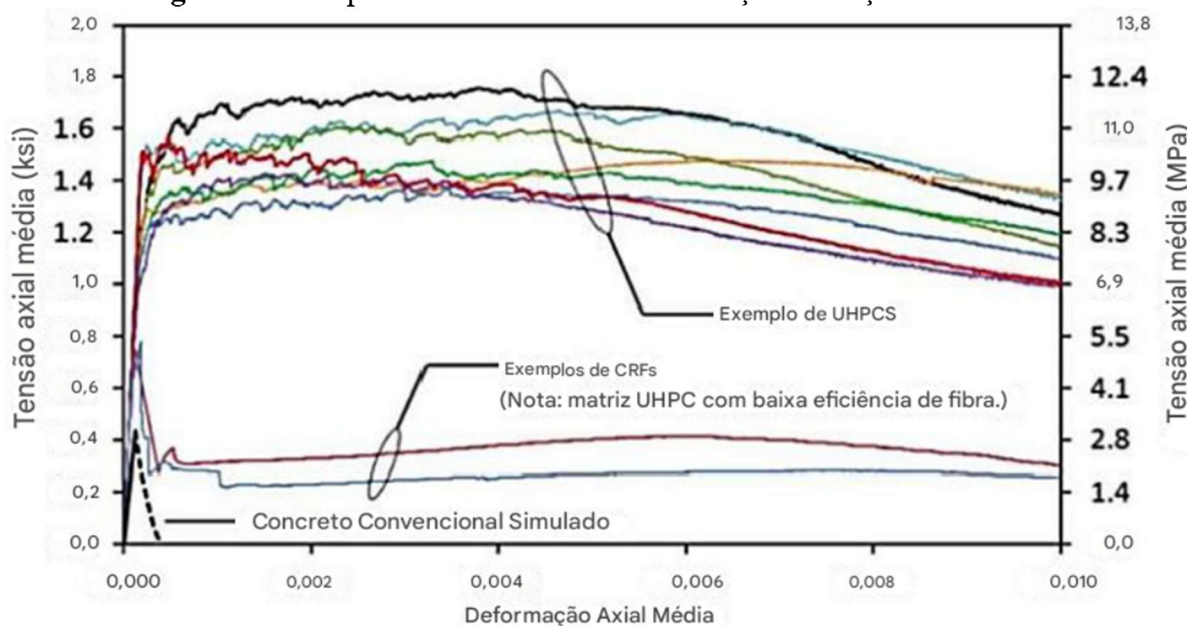
Fonte: Adaptado de Aguero *et al* (2019).

Ainda segundo Aguero *et al* (2019), para atingir concretos com ultra-alta resistência à compressão deve-se reduzir a relação a/l, usar a relação a/g entre 0,15-0,20 e aumentar o grau de compactação da mistura. O primeiro aspecto envolve aumento no calor de hidratação do cimento com possíveis consequências de fissuras por retração térmica. O segundo aspecto pode aumentar a quantidade de vazios entre as partículas de cimento e o agregado e, assim, produzir baixa resistência. O terceiro aspecto requer a densificação da matriz do concreto, ocupando os possíveis vazios com diferentes tamanhos de partículas e aplicando vibração mecânica. Por essas razões, o uso de aditivos minerais, como sílica ativa ou SF e escória de alto-forno ou GGBS, são incluídos na mistura. Ambos os minerais podem ser combinados com o cimento e reagir com a água para produzir o CSH durável, eles também podem controlar a quantidade de calor de hidratação e evitar rachaduras térmicas. O SF é composto de partículas muito finas que podem ocupar a zona intersticial e, juntamente com o GGBS, aumentar a densidade da mistura, com isso, a demanda de água também foi aumentada, portanto, a incorporação de um aditivo químico para melhorar a trabalhabilidade sem aumentar a relação a/b é necessária.

2.4.1 Comportamento a tração e flexão

O UHPC mostra um comportamento significativo de escoamento e dúctil, após a formação das primeiras fissuras em comparação ao concreto convencional. Esse comportamento é conhecido como endurecimento por deformação (Jonnalagadda e Chava, 2023).

Figura 5 - Comportamento da tensão-deformação de tração do UHPC.



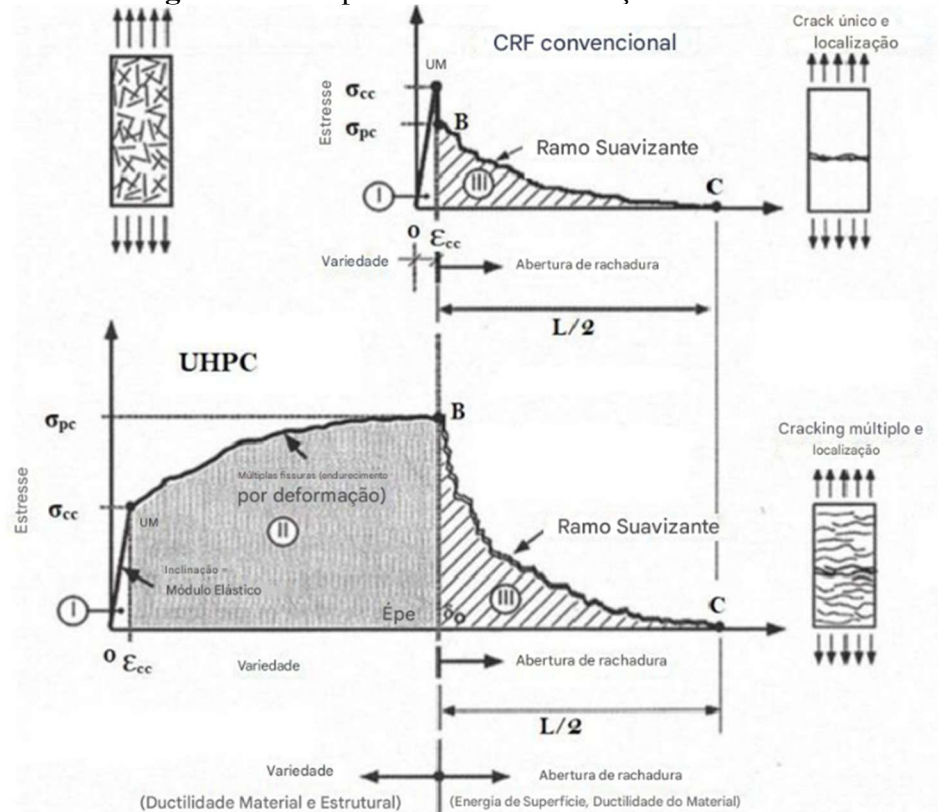
Fonte: Adaptado de ACI 239R (2018).

Após a formação de múltiplas fissuras e as tensões de fissuração serem atingidas, ocorre o amolecimento por deformação e a localização da fissura. Uma observação muito importante a ser feita na Figura 5 é que o UHPC está mostrando grandes níveis de escoamento, bem além da primeira fissura, sem exibir perda significativa de resistência. Mesmo em nível de deformação de 0,01, este concreto ainda está carregando com segurança uma tensão de tração de 7 MPa. Esta deformação é a cerca de 30 vezes maior do que a deformação máxima final em concreto convencional, um valor de 0,003, normalmente usados em todos os projetos de engenharia (Jonnalagadda e Chava, 2023).

De acordo com Jonnalagadda e Chava (2023), em métodos típicos de projeto de concreto convencional, a resistência à tração do concreto é completamente negligenciada. No entanto, devido à significativa resistência à tração do UHPC, é considerado e incluído no projeto de elementos de concreto UHPC. Na verdade, a resistência à tração é a principal vantagem do UHPC porque a quantidade de reforço (vergalhões de aço ou fios ou tendões de pré-esforço) em membros do UHPC é significativamente menor do que os projetos de concreto convencionais e, em algumas estruturas menores, esses membros podem não precisar de nenhum reforço.

Isso fornece uma oportunidade para fabricação e construção altamente econômicas de membros de concreto. Essa propriedade exclusiva do UHPC também pode mudar algumas das regras básicas de projeto em engenharia estrutural.

Figura 6 - Comportamento de fissuração do UHPC.



Fonte: Adaptado de ACI 239R (2018).

2.5 Aplicações

De acordo com Abbas *et al* (2016), as estruturas construídas com UHPC incluem muitas pontes de pedestres e algumas pontes rodoviárias. Devido à alta resistência e durabilidade, o UHPC é uma opção muito boa para a reabilitação e reparo de estoque de pontes antigas nos Estados Unidos. A alta resistência à tração e ao cisalhamento do UHPC torna o material certo para o reforço estrutural de elementos como colunas de pontes, vigas e componentes-chave de grandes estruturas de retenção de água, como barragens, cuja vida útil precisa ser estendida por longos períodos. O UHPC, em virtude da capacidade de absorver altos rendimentos de energia com grandes deformações além da primeira fissura, torna-se um ótimo candidato para aplicações sísmicas. O comportamento dúctil é muito procurado em projetos sísmicos. Projetos feitos de UHPC são adequados para juntas sísmicas de alta resistência em componentes estruturais, como chaves de cisalhamento em tabuleiros de pontes, colunas estruturais e paredes. Nos

Estados Unidos, muitas agências estaduais agora estão contando com chaves de cisalhamento UHPC em juntas de lajes e colunas pré-moldadas para métodos de construção acelerada de pontes. Aaleti e Sritharan (2014) desenvolveram diretrizes de projeto para sistemas de *decks waffled* usando conexões UHPC fundidas em campo entre a viga e a laje para comportamento composto. As chaves são geralmente as zonas de alto estresse e fadiga devido a cargas móveis e frequentemente são pesadelo de manutenção quando construídas com concreto convencional. As juntas UHPC são muito promissoras em termos de durabilidade e longevidade (Aguero *et al*, 2019).

REFERÊNCIAS

- AALETI, Sriram; SRITHARAN, Sri. Design of ultrahigh-performance concrete waffle deck for accelerated bridge construction. **Transportation Research Record**, v. 2406, n. 1, p. 12-22, 2014.
- ABBAS, A.; MOHAMED, A.; SHAHID, M. Ultra-high-performance concrete: mechanical properties and structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 1220-1231, 2016.
- AGUERO, A.; GETTU, R.; MOLINS, C. Ultra-high performance fibre reinforced concrete: mix design and properties. **Materials and Structures**, v. 52, p. 1-15, 2019.
- ALSALMAN, Ali *et al.* Energy and CO2 emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete. **Cleaner Environmental Systems**, v. 3, p. 100047, 2021.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 239R-18**: Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report. Farmington Hills, MI: ACI, 2018.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1856 / C1856M-17**: Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- BAJABER, M. A.; HAKEEM, I. Y. UHPC evolution, development and utilization in construction: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 10, p. 1058-1074, 2021.
- BAN, Y. *et al.* Research on the properties and application of ultra-high performance concrete (UHPC). **Journal of Building Materials**, v. 26, n. 2, p. 1-10, 2023.
- CHU, S.; ZHANG, Z.; LI, W. Mechanical properties and design of ultra-high performance concrete. **Journal of Civil Engineering**, v. 57, p. 22-34, 2023.
- DE CASTRO, V.; PANDOLFELLI, V. Empacotamento de partículas: fundamentos e aplicações em materiais refratários. **Cerâmica**, v. 55, n. 335, p. 18-28, 2009.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 206:2013**: Concrete - Specification, performance, production and conformity. Brussels: CEN, 2013.
- HOANG, T.; FEHLING, E. Influence of steel fibers on the behavior of ultra-high performance concrete. **Structural Concrete**, v. 16, n. 3, p. 123-132, 2017.
- HUANG, Huanghuang; GAO, Xiaojian; KHAYAT, Kamal H. Contribution of fiber alignment on flexural properties of UHPC and prediction using the Composite Theory. **Cement and Concrete Composites**, v. 118, p. 103971, 2021.
- JONNALAGADDA, K.; CHAVA, R. Influence of aggregate properties on ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 123, p. 104185, 2023.

KAHANJI, Charles; ALI, Faris; NADJAI, Ali. Structural performance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams. **Structural Concrete**, v. 18, n. 2, p. 249-258, 2017.

KOHAIL, M. *et al.* The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: a review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, p. 145-158, 2021.

LEE, Jong-Han; CHO, Baiksoon; CHOI, Eunsoo. Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 222-231, 2017.

LEITE, J. P. B.; DE CASTRO, V. Pontes de fibras em concretos de ultra alto desempenho. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 5, p. 1088-1110, 2020.

MAYHOUB, O. A. *et al.* The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: a review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, p. 145-158, 2021.

MISHRA, D.; SINGH, B. Ultra-high performance concrete: a review of constituents, properties and applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 6, p. 1-15, 2019.

SHI, C. *et al.* State-of-the-art review on use of iron ore tailings in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 123-456, 2024.

SHI, C. *et al.* Ultra-high performance concrete – a review of microstructural properties. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 37-52, 2015.

WU, Z.; SHI, C.; HE, W. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete with steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 324-338, 2012.

WU, Zemei; SHI, Caijun; KHAYAT, Kamal Henri. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 107021, 2019.

CAPÍTULO 1

CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO (UHPC) COM MATERIAIS SUPLEMENTARES – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Área: Tecnologia e Ciência dos Materiais

RESUMO

Concreto de ultra alto desempenho (UHPC) refere-se a materiais à base de cimento que apresentem resistência à compressão acima de 120MPa, alta ductilidade e durabilidade. Possui matriz densamente compactada, baixo fator água/ligante, uso de adições minerais, como sílica ativa, e fibras metálicas que melhoram significativamente a resistência à tração e à compressão, além da tenacidade e durabilidade. Para maior sustentabilidade o uso de materiais cimentícios suplementares e materiais de rejeito, como areias de mineração, em substituição aos aglomerantes, pode reduzir o custo sem sacrificar a resistência, além de torná-lo mais sustentável. Assim, o objetivo desse estudo foi realizar uma revisão sistemática de literatura (RSL) sobre o UHPC com a utilização de materiais suplementares e utilização de fibras, analisando o recente progresso e fornecendo dados e sugestões para futuras pesquisas e aplicações do UHPC. Para a RSL, foi utilizada a ferramenta *State of the Art through Systematic Review* (StArt), que oferece os passos de planejamento, execução e sumarização. Com a RSL foi possível identificar a evolução do UHPC nos quesitos de sustentabilidade, porosidade, microestrutura, homogeneidade e ganho de tenacidade.

Palavras-chave: materiais compósitos; alto desempenho; ecoeficiência; elementos esbeltos; sustentabilidade.

ABSTRACT

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is a cement-based material with a strength specification above 120 MPa, high ductility, and durability. It has a densely compacted matrix, low water-to-cement ratio, and the use of mineral additions, such as silica fume, and metallic fibers, which significantly improve its tensile strength, elasticity, toughness, and durability. For higher sustainability, the use of supplementary cementitious materials and waste materials, such as mining sands, as substitutes for binders can reduce costs without sacrificing strength, in addition to making it more sustainable. Thus, the objective of this study was to carry out a systematic literature review (SLR) on UHPC using supplementary materials and fibers, as well as to analyze recent progress, and provide data and suggestions for future research and UHPC applications. For the SLR, the State of the Art by Systematic Review (StArt) tool was used, which offers planning, execution, and summarization steps. With RSL, it was possible to identify the evolution of UHPC in terms of sustainability, porosity, microstructure, homogeneity, and gain in toughness.

Keywords: composite materials; high performance; eco-efficiency; slender elements; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, em razão da versatilidade, custo e propriedades adequadas para diversos usos. Diante desta característica, o setor da construção civil tem demonstrado uma tendência crescente para estruturas com formas e dimensões cada vez mais desafiadoras, o que tem resultado no desenvolvimento de novas composições cimentícias e melhorias dos concretos utilizados atualmente.

Segundo Petrucci (2005), o desenvolvimento de concretos mais duráveis cresce com o decorrer dos anos, tanto pelas solicitações e demandas do mercado, quanto pelo desenvolvimento de componentes que permitem intensificar e melhorar as características do concreto. Nesse aspecto, para explorar tais características, como resistência à compressão, fluidez, rigidez, tenacidade, é necessário a utilização de aditivos químicos e uma seleção criteriosa dos materiais empregados.

A adição de aditivos químicos e minerais enriquece as estruturas, potencializando as características do concreto no estado fresco e endurecido. É possível supor que os aditivos químicos de segunda e terceira geração e as adições minerais, como sílica ativa, metacaulim ou cinza de casca de arroz, são os principais responsáveis por esse desenvolvimento acelerado dos componentes nos últimos tempos. Desta maneira, a oferta de novas opções de materiais e o desenvolvimento de novas tecnologias permitiram a produção de concretos especiais, como o Concreto de Alta Resistência (CAR), o Concreto de Alto Desempenho (CAD) e o Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

O Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC), foi desenvolvido na busca de um concreto que fosse tão resistente quanto a rocha, porém, de fácil moldagem e consistência fluida. De acordo com Viana (2019), na maioria dos UHPC, não são utilizados agregados graúdos na composição o que minimiza o aumento da concentração de tensões e eventual falha da microestrutura do material. De acordo com Dias (2004), o concreto convencional (CC) pode resistir até 60 MPa, o CAD atinge resistências entre 60 MPa e 120 MPa, e o UHPC está numa faixa de resistência de 120 a 200 MPa de resistência à compressão, sendo que, sob tratamento de pressurização e tratamento térmico durante a cura, pode chegar entre 200 MPa e 800 Mpa.

O impacto ambiental ocorrido pela exploração dos recursos minerais com consequente geração de resíduos sólidos, como o rejeito de minério de ferro, tem motivado reflexões a respeito da sustentabilidade para solucionar o gerenciamento oneroso e complexo desses resíduos por meio da aplicação de novas tecnologias de materiais, como o reaproveitamento como agregado para a construção. A indústria da construção civil, como um dos grandes responsáveis pelo consumo dos recursos naturais não renováveis, também precisa adotar nas atividades

estratégias que sejam ambientalmente mais adequadas e produtos mais ecoeficientes. (Franco *et al*, 2014)

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão sistemática sobre o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), visando aspectos sustentáveis, utilização de rejeitos na composição e analisando o recente progresso, fornecendo dados e sugestões para futuras pesquisas e aplicações do UHPC. Esse estudo apontou buscas por trabalhos relacionado ao UHPC e as aplicações do período de 2010 até 2024 por meio da Revisão sistemática de literatura (RSL).

2 METODOLOGIA

A revisão sistemática da literatura (RSL) teve o auxílio para o mapeamento do software *State of the Art through Systematic Review* (StArt), com a versão 3.3 BETA 3. Para o desenvolvimento do mapeamento da revisão sistemática, a ferramenta StArt oferece os passos de planejamento, execução e sumarização.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

2.6 Planejamento

Na fase de planejamento, a ferramenta solicita como entrada de dados o preenchimento de um protocolo. Este protocolo é de grande importância para a revisão sistemática, é planejado antecipadamente para minimizar os erros na condução e investigação do estado da arte do objetivo da pesquisa. O protocolo é portanto estabelecido com alguns critérios para a seleção, com objetivo, pergunta de pesquisa, palavras chaves, idiomas, métodos de pesquisa, requisitos de qualidade, formulários de extração, bases de dados e padrões de aceitação e exclusão.

Desta maneira, foi cadastrado cinco bases de dados, sendo elas, *Engineering Village*, *Science Direct*, *Springer* (Springer Nature Group), *Scielo* (Scientific Electronic Library Online), *Web of Science*. As bases de dados são amplamente utilizadas, inclusive na área de engenharia, gerando maior número de trabalhos relacionado ao objetivo de pesquisa. Após a seleção das bases, foi determinado os *strings* de busca para cada uma delas, de acordo com o formato de entrada de cada uma, como apresentado na Tabela 1-1. Esses *strings* são relacionados ao objetivo da pesquisa, para facilitar e direcionar a busca da ferramenta StArt.

Tabela 1-1- Base de dados cadastradas e *strings* de busca utilizados na seleção

Base de dados	Strings de busca
SciELO	<i>("high strength" OR "mechanical high compressive strength") AND "high performance" AND concrete AND ("civil engineer" OR engineering) AND "slender elements" AND (sustainability OR "green concrete") AND toughness AND ("ultra high performance" OR "ultra high performance concrete")</i>
Engineering Village	<i>("high strength" OR "mechanical high compressive strength") WN ALL AND "high performance" WN ALL AND concrete WN ALL AND ("civil engineer" OR engineering) WN ALL AND "slender elements" WN ALL AND (sustainability OR "green concrete") WN ALL AND toughness WN ALL AND ("ultra high performance" OR "ultra high performance concrete") WN ALL</i>
Web of Science	<i>TS=("high strength" OR "mechanical high compressive strength") AND TS=("high performance") AND TS=(concrete) AND TS=("civil engineer" OR engineering) AND TS=("slender elements") AND TS=(sustainability OR "green concrete") AND TS=(toughness) AND TS=("ultra high performance" OR "ultra high performance concrete")</i>
ScienceDirect	<i>("high strength" OR "mechanical high compressive strength") AND "high performance" AND concrete AND ("civil engineer" OR engineering) AND "slender elements" AND (sustainability OR "green concrete") AND toughness AND ("ultra high performance" OR "ultra high performance concrete")</i>
Springer	<i>("high strength" OR "mechanical high compressive strength") AND "high performance" AND concrete AND ("civil engineer" OR engineering) AND "slender elements" AND (sustainability OR "green concrete") AND toughness AND ("ultra high performance" OR "ultra high performance concrete")</i>

Fonte: Autoria Própria, 2026.

2.7 Execução

A execução é responsável por identificar os estudos selecionados nas bases de dados, selecionar todos os trabalhos aceitos, duplicados e não classificados, extrair os trabalhos selecionados com leitura completa dos artigos. A execução é a segunda fase deste estudo e também contempla o software StArt. Para serem incluídos nos critérios de seleção, os artigos relacionados à tecnologia do cimento e concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) devem ser publicados, disponíveis na íntegra em bases de dados científicas pesquisáveis entre 2010 e 2024, ter título, resumo e palavras-chave, escritos de forma coerente e com coesão textual e por fim, com restrições linguísticas em português e inglês analisando os resumos de cada trabalho. Nesse momento, todos os artigos que não correspondem a esses critérios são considerados não classificados. Na Figura 2-1, é demonstrado os critérios de qualidade.

Figura 2-1- Formulário de qualidade da RSL para definição dos trabalhos.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

2.8 Extração

Nesta terceira e última etapa do desenvolvimento desta RSL, todos os dados do estudo são apresentados em gráficos de pizza com a classificação da seleção da fase anterior e reclassifica com total de aceitos e rejeitados. A sumarização apresenta também, nuvem de palavras mais citadas nos trabalhos, gráficos de referências e todos os dados extraídos. Na Figura 3-1, é demonstrado os critérios de extração, após leitura completa dos artigos.

Figura 3-1- Formulário de extração da RSL para definição dos trabalhos.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

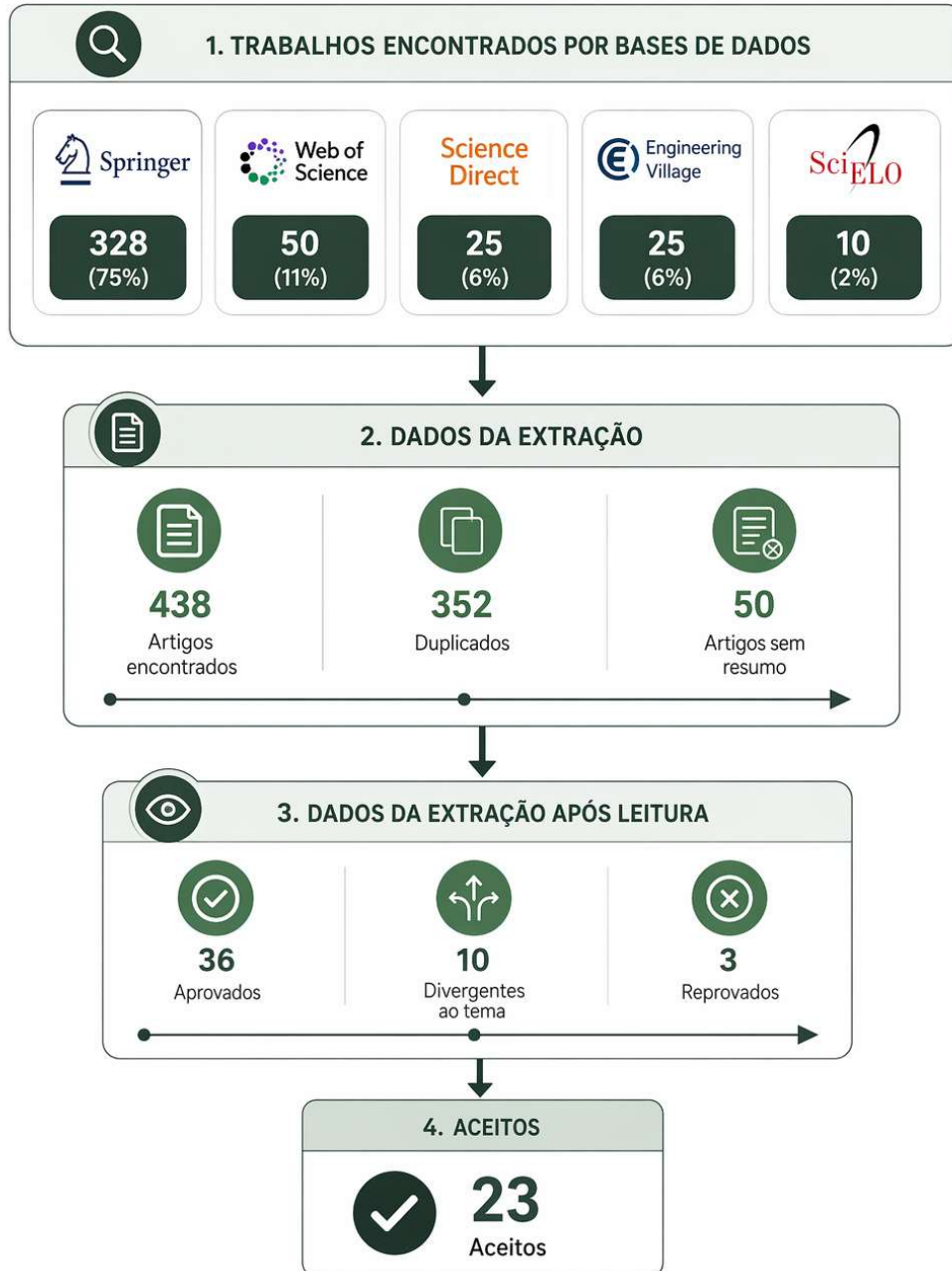
Ao final, foi realizado um breve comentário sobre cada um dos artigos e uma tabela resumo com análises quantitativas e qualitativas em relação à resistência à compressão, comportamento microestrutural e sustentabilidade, possibilitando uma visão ampla e consistente do objeto da pesquisa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que o trabalho fosse aceito ou rejeitado, o software dispõe de um formulário de extração e um formulário de qualidade previamente definido e planejado pela execução do protocolo na fase de planejamento. Esses formulários foram necessários para auxiliar as pesquisas relacionadas ao tema desta revisão sistemática de literatura e para determinar o estado atual da

arte. O fluxograma dado pela Figura 4-1 demonstra as fases de seleção e extração dos artigos.

Figura 4-1 - Fluxo de seleção e extração dos artigos.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

Para os trabalhos aceitos na extração da revisão sistemática conforme a Figura 6-1, foi relatado no Quadro 1-1 os marcos com o principal assunto de cada trabalho e os objetivos alcançados, com o ano da publicação, a revista em que foi publicado, título e autores.

Quadro 1-1 – Artigos selecionados pela RSL com autores, ano e revista.

Nº	Artigo	Marcos importantes do estudo	Autores	Ano	Revista
----	--------	------------------------------	---------	-----	---------

1	A potential review on the influence of nanomaterials on the mechanical properties of high strength concrete.	Benefícios mecânicos e de durabilidade do UHPC; nanomateriais aumentam densidade e resistência; revisão de efeitos, vantagens e limitações.	P Jagadesh, M Charai, E Mardenci, YO Özkılıç.	2022	Steel and Composite Structures.
2	Composite Properties of High-Strength, High Ductility Concrete.	Desenvolvimento de compósito HSHDC com alta resistência (166 MPa) e ductilidade (3,4%); combinação única de resistência e absorção de energia.	R Ranade, VC Li, MD Stults, WF Heard, TS Rushing.	2013	ACI Materials Journal.
3	Compressive behavior of ultra-high-performance-normal strength concrete (UHPC-NSC) column with the longitudinal grooved contact surface.	Estudo experimental com colunas UHPC-NSC; aumento da resistência com maior ranhura e resistência NSC; FEM valida modelo compressivo.	AIB Farouk, W Rong, J Zhu.	2023	Journal of Building Engineering.
4	Durability performance of a novel ultra-high-performance PET greenconcrete (UHPPGC).	UHPC verde com PET e cinza de palma; reduz consumo de cimento e poluição; foco em sustentabilidade e economia de energia.	AH Alani, NM Bunnori, AT Noaman, TA Majid.	2019	Construction and Building Materials.
5	Effect of FC3R on the properties of ultra-high-performance concrete with recycled glass.	Uso de FC3R e vidro reciclado substitui parcialmente o cimento; mantém alta resistência (~150 MPa); reduz reologia e impacto ambiental.	J Abellán-García, A Núñez-López, N Torres-Castellanos, J Fernández-Gómez.	2019	Dyna
6	Effect of the incorporation of PET fiber and ternary blended binder on the flexural and tensile behaviour of ultra-high performance greenconcrete.	UHPC verde com fibras PET e substituição parcial de cimento; melhora tenacidade e comportamento à tração/flexão.	AH Alani, MAM Johari, AT Noaman, NM Bunnori, TA Majid.	2022	Construction and Building Materials.

Continuação Quadro

7	Effects of recycled sand and nanomaterials on ultra-high performance concrete - Workability, compressive strength and microstructure.	UHPC com areia reciclada e nanomateriais; RS reduz resistência, mas nanomateriais compensam; ótimo desempenho com 25% RS e 1% NS.	Y Feng, B Zhang, J Xie, Z Xue, K Huang, J Tan.	2023	Construction and Building Materials.
8	Effects of the combined usage of nanomaterials and steel fibres on the workability, compressive strength, and microstructure of ultra-high performance concrete.	Interação entre fibras de aço e nanomateriais; CNF melhora mais o desempenho que NS/NC; NS reduz fluidez da mistura.	K Huang, J Xie, R Wang, Y Feng, R Rao.	2021	Nanotechnology Reviews.
9	Engineering properties of ultra-high strength concrete containing sugarcane bagasse and corn stalk ashes.	Substituição parcial de cimento por cinzas agrícolas (SBA, CSA); melhora resistência e reduz permeabilidade; 205 MPa em 28 dias.	AM Maglad, M Amin, AM Zeyad, BA Tayeh, IS Agwa.	2023	Journal of Materials Research and Technology.
10	Experimental study of concrete mixtures to produce UHPC using sustainable brazilian materials.	UHPC com materiais nacionais sustentáveis; resistência até 138 MPa; ANOVA identifica fatores críticos; mistura eficiente sugerida.	R. R. AGUERO, C. KORZENOWSKI, J. R. Y. AGUIRRE, A. CAMPOS FILHO, L. C. P. da SILVA FILHO, C. S. MALLMANN.	2019	Ibracon Structures and Materials Journal.
11	Experimental study on ultra-high performance concrete under triaxial compression	UHPC e UHSC sob compressão triaxial; confinamento retarda falha; aumento de resistência menor no UHPC que no UHSC.	YZ Wang, YB Wang, YZ Zhao, GQ Li, YF Lyu, H Li	2020	Construction and Building Materials
12	Feasibility of producing ultra-high performance concrete with high elastic modulus by steel chips An experimental study.	Adição de cavacos de aço aumenta módulo, resistência e densidade; teor ideal de 50%; melhora microestrutura e reduz porosidade.	H Chu, L Gao, J Qin, J Jiang, F Wang.	2023	Construction and Building Materials.

Continuação Quadro

13	From machine learning to semi-empirical formulas for estimating compressive strength of Ultra-High Performance Concrete.	Modelos de ML (Lasso, Autofeat) preveem resistência; 15 variáveis analisadas; fornece fórmulas semiempíricas precisas.	NH Nguyen, J Abellán-García, S Lee, TP Vo.	2024	Expert Systems with Applications.
14	Improved forecasting of the compressive strength of ultra-high performance concrete (UHPC) via the CatBoost model optimized with different algorithms.	CatBoost otimizado com PPSO, DMO, ASO prevê resistência do UHPC com alta precisão; DMO-CatBoost tem melhor desempenho.	M Katlav, F Er-gen.	2026	Structural Concrete.
15	Influence of alkaline and alkali-free accelerators on strength, hydration and microstructure characteristics of ultra-high performance concrete.	Aceleradores NA e AS reduzem tempo de pega e aumentam resistência inicial; dosagens ideais: 2% NA e 4% AS.	B Luo, Z Luo, D Wang, C Shen, M Xia.	2021	Journal of Materials Research and Technology.
18	Integrated effects of concrete samples size and fibers amount on compressive strength of high-and ultra-high strength concretes based on reactive powders.	Influência conjunta do tamanho dos corpos de prova e do teor de fibras altera significativamente a resistência à compressão do concreto (com coeficientes de correlação variando de 1,0–1,3 e, incluindo fibras, de 1,0–1,47).	J Siwiński, A Szcześniak, G Rutkowska, K Kubiak, A Stolarski.	2023	Structural Concrete.
17	Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP).	Pó fino reciclado acelera hidratação e efeito pozolânico; reduz retração autóloga; melhora interação fibra-matriz.	KQ Yu, WJ Zhu, Y Ding, ZD Lu, J Yu, JZ Xiao.	2019	Cement and Concrete Research.
16	Performance Assessment of Ultra-High Durability Concrete Produced From Recycled Ultra-High Durability Concrete.	Efeitos combinados de tamanho da amostra e fibras de aço (0-4%); ambos influenciam a resistência à compressão.	RP Borg, E Cuenca, R Garofalo, F Schillani, M Nasner, L Ferrara.	2021	Frontiers in Built Environment.

Continuação Quadro					
19	Properties of ultra-high performance concrete and conventional concrete with coal bottom ash as aggregate replacement and nanoadditives A review.	Revisão sobre CBA e nano-C-S-H; CBA substituí até 60% do agregado com +23% resistência; sustentabilidade do UHPC.	CC Ban, SY Kang, R Siddique, W Tangchirapat.	2023	Reviews on Advanced Materials Science.
20	Properties of Ultra-High Performance Concrete incorporating iron tailings powder and iron tailings sand.	Substituição de quartzo/cimento por rejeitos de ferro (ITP, ITS); 20% ITP e 50% ITS ideais; melhora microestrutura e reduz retração.	J Shi, W Pan, J Kang, Z Yu, G Sun, J Li, K Zheng, J Shen.	2024	Journal of Building Engineering.
21	The Compressive Strength of Ultra-high Performance Concrete at Elevated Temperatures.	UHPC com fibras PVA/PP evita lascamento a 500°C; estudo de resistência sob calor e carga simultâneos.	B MacDougall, H Hajiloo, S Sarhat, J Kabanda, M Green.	2022	Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference.
22	Ultra-High Performance Concrete Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges	Revisão abrangente do UHPC; alta resistência e durabilidade; principais fatores: dosagem de fibra e cura.	S Abbas, ML Nehdi, MA Saleem	2016	International Journal of Concrete Structures and Materials
23	Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A state-of-the-art review of material behavior, structural applications and future.	Revisão moderna do UHPC; comparação com concreto comum; aplicações estruturais e impacto futuro na engenharia.	S Jonnalagadda, S Chava.	2023	Electronic Journal of Structural Engineering.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Segundo BAN, Cheah Chee *et al.* (2023), as características principais de um UHPC estão associadas à altíssima resistência à compressão, baixa porosidade e permeabilidade e alta compactidade da matriz. Apesar disso, de acordo com ABBAS, S. M. L. N. *et al.* (2016), o UHPC não se mostra tão sustentável, devido ao alto consumo de aglomerantes, sendo necessário a busca de materiais complementares ou substitutos para a composição. O Quadro 2-1, mostra um comparativo entre os artigos aprovados baseado na Resistência à compressão, comportamento microestrutural e sustentabilidade ambiental.

Quadro 2-1 – Comparativos entre os artigos aprovados.

Nº	Artigo	Tipo de Concreto	Resistência à Compressão (MPa)	Comportamento Microestrutural	Sustentabilidade Ambiental
1	A potential review on the influence of nano-materials on the mechanical properties of high strength concrete	HSC (High Strength Concrete).	>150 MPa com nano-SiO ₂ e CNF.	ITZ mais densa, menos poros.	Substitui cimento; custo de nanomateriais é alto.
2	Composite Properties of High-Strength, High Ductility Concrete.	Concreto de Alta Resistência e Alta Ductilidade (HSHDC).	166	Alta densidade, ductilidade, fibras bem distribuídas.	Alta durabilidade, sem foco em resíduos.
3	Compressive behavior of ultra-high-performance-normal strength concrete (UHPC-NSC) column with the longitudinal grooved contact surface.	Concreto de Ultra-Alto Desempenho com Nanocompósito de Sílica (UHPC-NSC).	até +36,8% sobre NSC.	Aderência e confinamento por superfície ranhurada.	Maior desempenho, custo elevado.
4	Durability performance of a novel ultra-high-performance PET greenconcrete (UHPPGC).	Concreto de Ultra-Alto Desempenho com Polímero e Vidro (UHPPGC).	≈120	Porosidade reduzida com PET e pozolanas.	Reaproveita resíduos PET e POFA.
5	Effect of FC3R on the properties of ultra-high-performance concrete with recycled glass.	UHPC com Fibra de Cobre Reciclada Reforçada (UHPC-FC3R).	151	Boa hidratação com substituição parcial.	Vidro reciclado e catalisador industrial.
6	Effect of the incorporation of PET fiber and ternary blended binder on the flexural and tensile behaviour of ultra-high performance greenconcrete.	UHPC com Fibra Polimérica e Resíduo de Vidro (UHPPFRGC).	153	Boa interação fibra-matriz.	PET reciclado e cinzas de palma.
7	Effects of recycled sand and nanomaterials on ultra-high performance concrete - Workability, compressive strength and microstructure.	UHPC com Areia Reciclada (RSUHPC).	152	Melhora com NS, refinamento da matriz.	Uso de areia reciclada e nanossílica.

Continuação Quadro

8	Effects of the combined usage of nanomaterials and steel fibres on the workability, compressive strength, and microstructure of ultra-high performance concrete.	Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC).	até 160 MPa com CNF + fibras de aço.	MEV: menos fissuras, matriz densa.	Redução de cimento, mas fibras elevam custo.
9	Engineering properties of ultra-high strength concrete containing sugarcane bagasse and corn stalk ashes.	Concreto de Ultra-Alta Resistência com Cinza de Bagaço de Açúcar/Casca de Arroz (UHSC com SBA/LSA).	até 205	ITZ refinada, pozolanicidade com SBA e CSA.	Substitui até 24% do cimento por resíduos agrícolas.
10	Experimental study of concrete mixtures to produce UHPRC using sustainable brazilian materials.	Concreto Reativo de Ultra-Alto Desempenho (UHPRC).	138,1	Microestrutura densa sem fibras.	Materiais locais sustentáveis (GGBS).
11	Experimental study on ultra-high performance concrete under triaxial-compression.	UHPC com Matriz Híbrida (HMUHPC).	120–160	Aumento de resistência com confinamento e ação de fibras.	Desempenho alto, consumo intensivo de cimento.
12	Feasibility of producing ultra-high performance concrete with highelastic modulus by steel chips An experimental study.	Diversas formulações de UHPC (UHPC).	138	ITZ otimizada com adição moderada.	Reaproveitamento de cavacos de aço.
13	From machine learning to semi-empirical formulas for estimating compressive strength of Ultra-High Performance Concrete.	UHPC com Agregado de Cinza de Casca de Café (UHPC-ACC).	até 240	Modelos relacionam materiais com propriedades microestruturais.	Otimiza mistura, reduz desperdício.

14	Improved forecasting of the compressive strength of ultra-high-performance concrete (UHPC) via the Cat-Boost model optimized with different algorithms.	Concreto de Alta/Ultra-Alta Resistência com Pó Reativo (HSC/UHPC-RPC).	até 210	SHAP identifica influência de idade, cimento e fibras.	Reduz erro e uso excessivo de materiais.
15	Influence of alkaline and alkali-free accelerators on strength, hydration and microstructure characteristics of ultra-high performance concrete.	Compósito Cimentício de Ultra-Alto Desempenho com Fibras Plásticas Recicladas (UHP-ECC-RFP).	134	Formação acelerada de produtos de hidratação.	Cura sem calor, menor energia.
16	Performance Assessment of Ultra-High Durability Concrete Produced From Recycled Ultra-High Durability Concrete.	Concreto de Ultra-Alta Ductilidade com Materiais Reciclados (R-UHDC).	Cubos 40–150 mm: força aumenta com menor tamanho e mais fibras (coeficiente de correlação de 1,0–1,47).	Matriz auto-compactante refinada; fibras de aço densificam a estrutura.	Otimização do uso de cimento e fibras melhora desempenho, mas produção de RPC tem custo/energia elevados.
17	Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP).	UHPC com Cinza de Bauxita Calcificada + nanoestruturas de C-S-H (UHPC com CBA + nano-C-S-H).	140	Aumento da hidratação e ITZ mais densa.	Reutilização de pó fino de demolição.
18	Performance Assessment of Ultra-High Durability Concrete Produced From Recycled Ultra-High Durability Concrete.	UHPC com materiais italianos ou titânio (UHPC-IT).	130	Recuperação adequada da matriz.	Agregados de UHPC reciclado.
19	Properties of ultra-high performance concrete and conventional concrete with coal bottom ash as aggregate replacement and nanoadditives. A review.	Diversas formulações de UHPC (UHPC).	até -23% com CBA.	Porosidade aumentada por CBA, compensada com nano-C-S-H.	Aproveita resíduos industriais e reduz extração de areia.

20	Properties of Ultra-High Performance Concrete incorporating iron tailings powder and iron tailings sand.	UHPC-IT	145,6	Redução da porosidade de 97 para 27 nm.	Uso de resíduos de mineração (IT).
21	The Compressive Strength of Ultra-high Performance Concrete at Elevated Temperatures.	UHPC	A 25°C: ~156 MPa; a 300°C: ~124 MPa (≈ 79%), a 400°C: ~118 MPa (≈ 75%), a 500°C: ~83 MPa (≈ 53%). Queda de ~25% a 300°C (ainda > 100 MPa).	Fibras criam canais de vapor.	Durável em altas temperaturas, mas fibras sintéticas têm impacto.
22	Ultra-High Performance Concrete Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges	UHPC (diversos).	120–200	Alta compactação, fibras, partículas finas otimizadas.	Alta emissão de CO ₂ devido ao alto uso de cimento.
23	Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A state-of-the-art review of material behavior, structural applications and future.	UHPC	150–200 MPa com formulação otimizada.	Estrutura muito densa, baixa porosidade.	Alta durabilidade; produção com alto CO ₂ .

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Segundo Buttignol, T. E. T. *et al.* (2018), nas proporções da mistura, o aumento do teor de pó de UHPC admite boa hidratação através de aditivos, melhorando as propriedades do UHPC. A utilização de produtos químicos e aditivos de última geração, além de qualidades de durabilidade resultam no aumento da densidade e das qualidades mecânicas. De acordo com Huang, Kunhong *et al* (2021), as descobertas também demonstram que a utilização de nanomateriais e fibras de aço podem funcionar muito bem para melhorar o desempenho mecânico do UHPC. Além disso os resultados obtidos indicam que a quantidade de fibras de aço e o tamanho da amostra têm efeitos diferentes na resistência à compressão de concretos de alta e ultra-alta resistência. De acordo com Ban, *et al.* (2023), o UHPC pode ser um material viável no setor de construção devido às melhores características de engenharia, ainda assim, pode não ser sustentável em virtude da alta dosagem de constituintes intensivos em energia, como cimento e areia

de rio. Assim, desenvolver UHPC energeticamente eficiente e ecologicamente correto, utilizando componentes menos intensivos em energia e subprodutos industriais, além de materiais de rejeito ou reciclados, ajudaria a expandir o uso do material. Nota-se, portanto uma evolução nas pesquisas buscando a substituição dos agregados convencionais do UHPC. Dos arquivos selecionados, foi colocado no Quadro 3-1, os artigos que centralizam na substituição de agregados ou aglomerantes por materiais de rejeito ou reciclados.

Quadro 3-1 – Artigos que centralizam substituições de agregados e aglomerantes.

Nº	Material substituto	Tipo de substituição	Proporção ótima	Principais efeitos
1	Durability performance of a novel ultra-high-performance PET greenconcrete (UHPPGC).	Substituição parcial do cimento por cinza de palma ultrafina (UPOFA) + sílica ativa+ Garrafas PET recicladas (substituindo as fibras metálicas).	25% UPOFA + 20% SF + 1% PET.	↑ Ductilidade, ↑ resistência à tração (9,31 MPa) e flexão (30,1 MPa), comportamento menos frágil.
2	Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP).	Substituição parcial do cimento por poeira de resíduos de concreto e tijolo cerâmico (<150 µm)	Até 20% para melhor desempenho (até 50% viável).	Acelera hidratação, efeito pozolânico, ↓ retração autógena, ↑ desempenho mecânico e sustentabilidade.
3	Performance Assessment of Ultra-High Durability Concrete Produced From Recycled Ultra-High Durability Concrete.	Substituição parcial ou total do agregado natural por concreto de ultra-alta durabilidade demolido.	50% e 100% testados com bons resultados.	Mantém resistência e durabilidade (cloretos, sucção), promove economia circular.
4	Properties of Ultra-High Performance Concrete incorporating iron tailings powder and iron tailings sand.	Substituição do cimento por pó de ferro (ITP) e da areia de quartzo por areia de ferro (ITS).	20% ITP + 50% ITS.	↑ Resistência (145,6 MPa) e tenacidade, ↓ porosidade e retração, baixo impacto ambiental.
5	Experimental study on UHPC under triaxial compression.	Agregado reciclado (referência a estudos anteriores).	Agregado natural (coarse/fine).	Estudos citados mostram variação da resistência sob diferentes pressões de confinamento; efeito depende da resistência uniaxial do concreto original.
6	Properties of UHPC and conventional concrete with coal bottom ash as aggregate replacement	Areia por cinza pesada de carvão (CBA).	Até 60%	Substituição de até 60% da areia aumentou resistência em até 23%; CBA tem granulometria

Continuação Quadro

	and nano additives Are-view.			semelhante à areia; reduz impactos ambientais e custo; uso em UHPC ainda pouco explorado.
7	Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability.	Quartzo triturado, escória de alto-forno, cinzas volantes.	Quartzo triturado até 30%, escória até 36%, cinzas volantes até 40% (em volume de cimento).	Substituições mantêm resistência à compressão; melhoram empacotamento e durabilidade; reduzem consumo de cimento.
8	From machine learning to semi-empirical formulas for estimating compressive strength of UHPC.	Cinzas volantes, escória, pó de vidro, pó de quartzo, nano-sílica, calcário.	Percentuais variados no banco de dados (não padronizados).	Base de dados de 810 misturas mostra que SCMs e fillers alternativos afetam resistência; usados para otimizar custo e sustentabilidade.
9	Improved forecasting of the compressive strength of UHPC via CatBoost model optimized with different algorithms.	Aditivos minerais locais como substitutos de pó de quartzo e sílica ativa.	Percentuais variados.	Estratégia para reduzir custo e impacto ambiental; substituição pode manter resistência com materiais locais e de menor impacto.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

O artigo intitulado “Performance Assessment of Ultra-High Durability Concrete Produced From Recycled Ultra-High Durability Concrete” mostrou viabilidade usando 50 a 100% de areia reciclada (RA) no lugar da areia natural. A resistência atingida foi a cerca de 193 MPa aos 120 dias, valores muito superiores ao concreto comum. Esse artigo mostra que a durabilidade foi analisada através do ensaio RCPT (ensaio de penetração de cloretos) e ficou na faixa “very low”, revelando que não houve quase nenhuma penetração de íons cloreto, além do ensaio de coeficiente de migração, que ficou abaixo de 10^{-12} m²/s, mostrando um transporte iônico extremamente baixo, ou seja, o material é praticamente impermeável. Foi realizado ainda o teste de carbonatação acelerada dos agregados reciclados (para entender reações químicas e estabilidade). Um desafio observado nesse artigo foi a dificuldade em remover fibras metálicas, quando foi utilizado a separação magnética. Outro desafio foi a necessidade de ajustar a granulometria dos agregados reciclados. O artigo reconhece que ainda faltou análises ambientais e econômicas (LCA e LCC), e que o tema ainda é recente na literatura.

Já no artigo intitulado “Properties of Ultra-High Performance Concrete incorporating

iron tailings powder and iron tailings sand” foi realizada a substituição de parte do pó de quartzo e da areia por rejeitos de ferro, resultando em melhor compactação, maior resistência e melhores propriedades contra penetração iônica. Essas conclusões foram comprovadas por análises microestruturais (microscopia e testes físicos).

No artigo intitulado “Feasibility of producing ultra-high performance concrete with highelastic modulus by steel chips An experimental study”, é observado que os cavacos de aço ou *steel chips* são utilizados como fração fina no concreto (partículas metálicas). Essa utilização aumentou muito o módulo de elasticidade, obtendo um material mais rígido e resistente à deformação. Esse estudo apresentou dados de microestrutura e desempenho mecânico como método de comprovação.

A partir desses artigos foram verificadas algumas lacunas importantes que podem ser exploradas e pesquisadas, sugeridas pelos próprios artigos. O Quadro 4-1 mostra quais áreas ainda podem ser exploradas através dos temas e assuntos dos artigos selecionados e quão relevante seria aprofundar nesse tema.

Quadro 4-1 – Principais lacunas dos artigos selecionados na RSL.

Material / Agregado	O que esses artigos mostram	Principais lacunas e testes faltantes
Performance Assessment of Ultra-High Durability Concrete Produced From Recycled Ultra-High Durability Concrete.	Demonstram que é viável produzir novo UHDC usando agregado britado proveniente de UHDC; propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade (resistência à compressão, flexão, tenacidade, penetração/migração de cloreto, sucção capilar, resistividade) foram adequadas, validando a regeneração com agregado reciclado.	<ul style="list-style-type: none"> - Padronização do pré-tratamento (granulometria, carbonatação). - Reologia com alta substituição. - Durabilidade em sulfatos, gelo, degelo, abrasão. - Ensaios estruturais em escala real. - LCA/LCC completo.
Effect of FC3R on the properties of UHPC with recycled glass.	Substituição parcial de cimento por FC3R (11-15%) em combinação com pó de vidro reciclado mantém altas resistências compressivas (~150–151 MPa versus 158 MPa referência) sem tratamento térmico; reduz reologia do UHPC fresco e melhora o perfil ambiental/econômico.	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliar reação álcali-sílica (ASR) para várias granulometrias. - Definir limites seguros de substituição. - Durabilidade a longo prazo. - Influência na microestrutura e ITZ

Continuação Quadro

<p>Properties of UHPC incorporating iron tailings powder and iron tailings sand.</p>	<p>Utilização de ITP (pó) e ITS (areia) viável: 20% ITP e até 50% ITS apresentaram melhor desempenho (compressão máxima 145,6 MPa e alta tenacidade à flexão); efeitos pozolânico e de enchimento refinam poros, reduzem retração de secagem e melhoram microestrutura e durabilidade.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de retração - Aderência aço-concreto - Difusão multi-íon (Cl^-, SO_4^{2-}) - Ensaio estruturais (punção, flexão em lajes).
<p>Micro-structural and mechanical properties of UHP-ECC incorporation of recycled fine powder (RFP).</p>	<p>RFP acelera a hidratação e atua como pozolana, reduz fortemente a contração autógena, melhora microestrutura e influencia positivamente as propriedades mecânicas dos UHP-ECC até taxas de substituição elevadas (estudadas até 50%).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Desempenho em escala estrutural - Interação com diferentes fibras - LCA regional.
<p>Effect of PET fiber and ternary blended binder on flexural and tensile behaviour of UHP green concrete.</p>	<p>Incorporação de PET triturado ou em fibras e UPOFA (cinzas ultrafinas de palma) como substitutos parciais do cimento reduz consumo de cimento e impactos ambientais; fibras PET (1% v) aumentam tenacidade e alteram resistência/flexão; misturas ternárias com UPOFA e SF (10–20% SF; UPOFA 25–50%) mostraram desempenho estrutural e de durabilidade promissor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Durabilidade química e térmica. - Compatibilidade com outras fibras/SCMs. - Influência na trabalhabilidade e cura.
<p>Feasibility of producing UHPC with high elastic modulus by steel chips.</p>	<p>Adição de cavacos de aço aumenta módulo de elasticidade (9.65–21.73%), resistência à compressão (6.38–15.85%), resistência à flexão e densidade aparente; reduz porosidade e melhora distribuição de poros; teor ideal sugerido \approx50% em peso considerando trabalhabilidade e microestrutura.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosão em ambiente agressivo. - Efeito na tenacidade e fadiga. - Interação com fibras convencionais. - Análise de custo e logística.
<p>Effects of recycled sand and nanomaterials on UHPC.</p>	<p>Uso de areia reciclada (RS) reduz desempenho compressivo do UHPC, mas a adição de nanomateriais (ex.: nano-sílica) mitiga significativamente essa perda; combinação ótima sugerida 25% RS + 1% nano-sílica, alcançando \sim152 MPa aos 28 dias (+14% com 1% NS).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Testes de longo prazo. - Efeito com fibras e diferentes SP. - Durabilidade combinada (cloretos + cargas).

Continuação Quadro

<p>Mechanical, durability and microstructural properties of UHPC with coal bottom ash and nanoadditives: A review.</p>	<p>Revisão dedicada indica viabilidade como miúdo, efeito de empacotamento, porém com necessidade de mais aditivo devido à forma/textura e absorção; ganhos de resistência podem aparecer com cura prolongada; há consolidação de resultados em CC e indicações para UHPC.</p>	<p>A própria revisão aponta:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Escassez de estudos de UHPC com CBA como areia; -Falta definir evolução de resistência, transporte de fluidos (UPV, absorção, difusividade de cloretos) e microestrutura; - Necessidade de faixas ótimas de granulometria e teores; estudos em elementos estruturais.
<p>Feasibility of producing ultra-high performance concrete with high elastic modulus by steel chips: An experimental study.</p>	<p>A revisão cita estudo sobre uso “viável” da MSWI como agregado em UHPC, indicando potencial técnico, mas sem detalhamento amplo no seu corpus.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Protocolos de pré-tratamento, lixiviação, expansibilidade/álcalis e desempenho de longo prazo em UHPC; - Ensaios de durabilidade aco-plada (ciclos + cloretos/CO₂); validação em escala.
<p>Properties of UHPC incorporating iron tailings powder and iron tailings sand.</p>	<p>Estudo citado avalia rejeitos de quartzo em UHPC incluindo comportamento de lixiviação; sinaliza que o tema é tratável com controle de composição.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mapear janela ótima de finos/empacotamento em UHPC com rejeitos; - Trade-offs entre resistência inicial, retração e durabilidade; - Repetibilidade entre fontes; - Normas de lixiviação.

Fonte: Aatoria Própria, 2026.

Após verificadas as lacunas foi proposto no Quadro 5-1 algumas pesquisas para serem desenvolvidas, mostrando a grande abrangência da produção científica e a relevância dos assuntos abordados e pesquisados nessa Revisão Sistemática de Literatura (RSL), podendo ser amplamente explorado.

Quadro 5-1 – Propostas de pesquisa e desenvolvimento a partir de lacunas levantadas e observadas na RSL.

Lacuna	Proposta
Padronização do pré-tratamento e da granulometria do agregado reciclado.	Desenvolver uma matriz fatorial considerando tipo de britagem × distribuição 0/2 × estado de umidade × (sem/com) carbonatação, correlacionando com reologia e migração de cloretos.
Reologia sob alta substituição e interação com aditivos/fibras.	Elaborar uma curva de tolerância reológica (slump-flow, t_{500} , torque) em função da porcentagem de RA e da dosagem de SP, avaliando também orientação e segregação de fibras.
Durabilidade em cenários específicos pouco explorados.	Realizar campanha de degradação combinada (pH + cloreto + carga mecânica cíclica), com monitoramento por ultrassom (UPV) e resistividade elétrica <i>in situ</i> .
Reação álcali-sílica (ASR) e mitigação no uso de vidro reciclado.	Empregar método acelerado de ASR (ASTM C1260/C1567 adaptado ao UHPC), cruzando porcentagem de vidro × tipo de mitigador (FC3R vs. SCMs), medindo expansão, módulo dinâmico e microfissuração.
Interfaces múltiplas em sistemas com rejeitos de mineração.	Conduzir ensaios de ligação barra-concreto (pull-out), retração restrita e difusão multi-íon com modelagem baseada em Nernst-Planck.
Corrosão e estabilidade de partículas metálicas (steel chips).	Avaliar chips com e sem revestimento passivador, realizar medidas de potencial de corrosão e EIS, além de tomografia para observar trajetórias de fissuração e testes de fadiga em flexão.
Escala e logística de reciclagem de UHPC/UHDC.	Implementar planta piloto com balanço energético, análise de capex/opex e controle de qualidade granulométrico, utilizando cartas de controle para absorção e densidade.
Avaliação ambiental e econômica (LCA/LCC).	Realizar LCA conforme ISO 14040, com análise de sensibilidade na AVC, energia de moagem, aditivos e mitigadores de ASR, complementada por LCC com horizonte de 50–100 anos.
Comportamento estrutural e de serviço.	Ensaiai vigas esbeltas em UHPFRC com 0–100% de RA, empregando correlação digital de imagens (DIC) para mapeamento de fissuras, além de testes de punção em lajes delgadas.
Desempenho térmico (120–800°C) e pós-incêndio.	Aplicar protocolo ISO 834 adaptado, avaliando recuperação mecânica e autocura térmica ao longo de 28 dias.
Incorporação de rejeitos como agregados em UHPC sem comprometer desempenho mecânico e durabilidade.	Integrar rejeitos minerais como microagregados em UHPC, seguindo princípios de economia circular para reduzir impacto ambiental e substituir matérias-primas virgens.
Compatibilidade regional (exemplo: Brasil).	Realizar screening multimaterial (5–8 fontes locais) com otimização por empacotamento (modelo de Andreasen & Andersen, q-mod) e validação mecânico-durável.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão sistemática permitiu mapear o estado da arte do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC), consolidando-o como um compósito de alto valor agregado na construção civil, caracterizado por resistências à compressão superiores a 120 MPa e uma matriz cimentícia de elevada compacidade. Foram realizadas buscas em cinco bases de dados contendo artigos publicados em vários países com idioma inglês e português no período de 2010 a 2024. Foram utilizadas diversas *Strings* de busca, adequando-se com cada base de dados, selecionando então 438 para análise de critérios aceitação, exclusão e qualidade, conforme o protocolo previamente planejados antes do início da seleção, e com tais critérios foi possível chegar a trinta e seis estudos aprovados na revisão sistemática. Os trinta e seis trabalhos aprovados, passaram pela análise dos critérios de aceitação, qualidade e refinamento, obtendo vinte e três estudos aceitos depois de uma leitura completa.

Os comparativos realizados entre os 23 artigos selecionados demonstram que a evolução do UHPC não se restringe apenas ao ganho de resistência, mas trazem ampla visão geral na busca de melhorias com substituições convencionais, utilização de outros agregados como os nanomateriais e a visão ecológica de criar um produto mais sustentável, através do uso de rejeitos e subprodutos. Foi observado a contribuição das fibras e materiais como o PET na intenção de melhorar a resistência a tração desse material. Também foi verificado o uso da inteligência artificial para tentar prever as resistências e o comportamento desse material. Contudo, um dos empecilhos mais encontrados nos estudos foi a produção ser economicamente viável e de criar uma forma do fornecimento desse produto quando em grande escala. A análise criteriosa dos estudos que utilizam agregados reciclados e materiais suplementares revelou um movimento irreversível em direção à sustentabilidade. Pesquisas indicam que a substituição parcial do cimento por resíduos agrícolas ou pó de vidro reciclado permite manter resistências de 150 a 200 MPa, reduzindo significativamente o impacto ambiental e o custo de produção. Notadamente, a literatura aponta que o uso de areia reciclada e nanomateriais pode compensar perdas mecânicas, criando um concreto de alto desempenho mais sustentável.

Apesar dos avanços, identificam-se lacunas importantes, especialmente no que diz respeito ao comportamento de longo prazo desses novos compósitos e a padronização de misturas que utilizam rejeitos industriais específicos. As propostas para futuras pesquisas recaem sobre a otimização da interação fibra-matriz em matrizes ecoeficientes e a análise microestrutural profunda para entender a zona de transição interfacial (ITZ) em misturas com altos teores de resíduos. Um UHPC ecologicamente correto e economicamente viável pode ser produzido

pela substituição parcial de cimento e sílica ativa por resíduo de subprodutos industriais usados como materiais cimentícios suplementares, e por areias de rejeito e recicladas, demonstrando bons resultados com essas substituições. Para trabalhos futuros é importante o desenvolvimento de novas formulações com consumos de cimento cada vez mais baixos e a utilização de materiais que agridam menos o meio ambiente ou que contribuam com a descarbonização.

Dessa forma, este estudo conclui que a sustentabilidade no UHPC é tecnicamente viável. A proposta de utilizar areias de rejeito de minério de ferro surge como uma solução estratégica para o gerenciamento de resíduos sólidos da mineração. A incorporação dessas areias, não só podem garantir a manutenção dos requisitos de ultra-alto desempenho, mas podem promover a economia circular na construção civil, transformando passivos ambientais em elementos estruturais de alta eficiência e esbeltez.

REFERÊNCIAS

ABBAS, S. M. L. N.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, p. 271-295, 2016.

ABELLÁN-GARCÍA, Joaquín *et al.* Effect of FC3R on the properties of ultra-high-performance concrete with recycled glass. **Dyna** , v. 86, n. 211, p. 84-93, 2019.

AGUERO, R. R. *et al.* Experimental study of concrete mixtures to produce UHPRC using sustainable brazilians materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, p. 766-789, 2019.

ALANI, Aktham H. *et al.* Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC). **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 395-405, 2019.

ALANI, Aktham H. *et al.* Effect of incorporation of PET fiber and blended ternary binder on flexural and tensile behavior of ultra-high-performance green concrete. **Construction and Building Materials** , v. 331, p. 127306, 2022.

BAN, Cheah Chee *et al.* Properties of ultra-high performance concrete and conventional concrete with coal bottom ash as aggregate replacement and nanoadditives: A review. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 62, n. 1, p. 323, 2023.

BORG, Ruben Paul *et al.* Performance assessment of ultra-high durability concrete produced from recycled ultra-high durability concrete. **Frontiers in Built Environment**, v. 7, p. 648220, 2021.

BUTTIGNOL, T. E. T. *et al.* Aplicações do Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) em obras de reforço e recuperação de estruturas. In: **ANAIS DO 60o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. IBRACON, 2018. p 1-9. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328171582_Aplicacoes_do_concreto_de_Ultra_alto_Desempenho_UHPC_em_obras_de_reforco_e_recuperacao_de_estruturas. Acesso em: 17 de fevereiro de 2024.

CHU, Hongyan *et al.* Feasibility of producing ultra-high performance concrete with high elastic modulus by steel chips: An experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 375, p. 130964, 2023.

FAROUK, Abdulwarith Ibrahim Bibi; RONG, Wei; ZHU, Jinsong. Compressive behavior of ultra-high-performance-normal strength concrete (UHPC-NSC) column with the longitudinal grooved contact surface. **Journal of Building Engineering**, v. 68, p. 106074, 2023.

FENG, Yuan *et al.* Effects of recycled sand and nanomaterials on ultra-high performance concrete: workability, compressive strength and microstructure. **Construction and Building Materials** , v. 378, p. 131180, 2023.

FRANCO, Luiza Carvalho *et al.* Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**. 2014. p. 01-15.

HUANG, Kunhong *et al.* Effects of combined use of nanomaterials and steel fibers on

workability, compressive strength and microstructure of ultra-high performance concrete. **Nanotechnology Reviews**, v. 10, n. 1, p. 304-317, 2021.

ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo F. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Cap. v. 36, 2011.

JAGADESH, P. *et al.* A potential review on the influence of nanomaterials on the mechanical properties of high strength concrete. **Steel and composite structures**, v. 48, n. 6, p. 649-666, 2023.

JONNALAGADDA, Srimaruthi; CHAVA, Srinivas. Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A state-of-the-art review of material behavior, structural applications and future. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 23, n. 4, p. 25-30, 2023.

JUNGWIRTH, Jörg; MUTTONI, Aurelio. Structural behavior of tension members in Ultra High Performance Concrete. In: **International symposium on ultra high performance concrete**. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 2004.

LUO, Biao *et al.* Influence of alkaline and alkali-free accelerators on strength, hydration and microstructure characteristics of ultra-high performance concrete. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 3283-3295, 2021.

MACDOUGALL, Branna *et al.* The Compressive Strength of Ultra-high Performance Concrete at Elevated Temperatures. In: **Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. p. 895-906.

MAGLAD, Ahmed M. *et al.* Engineering properties of ultra-high strength concrete containing sugarcane bagasse and corn stalk ashes. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 23, p. 3196-3218, 2023.

NGUYEN, Ngoc-Hien *et al.* From machine learning to semi-empirical formulas for estimating compressive strength of Ultra-High Performance Concrete. **Expert Systems with Applications**, v. 237, p. 121456, 2024.

ORGASS, Marko; KLUG, Yvette. Fibre reinforced ultra-high strength concretes. In: **Proceedings of the international symposium on Ultra high performance concrete, Kassel, Germany**. 2004. p. 637-648.

PETRUCCI, Eladio GR. Concreto de cimento Portland–14ª edição. **São Paulo: Globo**, 2005.
RANADE, Ravi *et al.* Composite Properties of High-Strength, High-Ductility Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 110, n. 4, 2013.

SHI, Jun *et al.* Properties of Ultra-High Performance Concrete incorporating iron tailings powder and iron tailings sand. **Journal of Building Engineering**, v. 83, p. 108442, 2024.

SIWIŃSKI, Jarosław *et al.* Integrated effects of concrete samples size and fibers amount on compressive strength of high-and ultra-high strength concretes based on reactive powders. **Structural Concrete**, v. 24, n. 1, p. 1402-1414, 2023.

VANDERLEI, R. D. **Análise Experimental do Concreto de Pós Reativos: Dosagem e Propriedades Mecânicas**. 2004. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VIANA, Thiago Marques. **Avaliação do comportamento de Concretos de Pós Reativos com incorporação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas frente a elevadas temperaturas**. 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=2236233&key=0e5630a05bfb69e909f724aa6f196492>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2024.

WANG, Yuan-Zuo *et al.* Experimental study on ultra-high performance concrete under triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120225, 2020.

YU, Ke-Quan *et al.* Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP). **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105813, 2019.

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO DE CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO E FIBRAS METÁLICAS

Área: Tecnologia e Ciência dos Materiais

RESUMO

O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) representa evolução significativa na tecnologia dos materiais cimentícios, embora a sustentabilidade seja desafiada pelas elevadas emissões de CO₂ e pelo alto custo dos insumos. Como alternativa ecoeficiente, este estudo investiga a incorporação de areias provenientes de rejeitos de mineração de ferro (ITS) em substituição aos agregados finos convencionais. Assim, este trabalho consistiu em desenvolver e avaliar um concreto de ultra-alto desempenho incorporando rejeitos de mineração como agregado alternativo (UHPC-TS), com reforço de fibras metálicas. A otimização granulométrica realizada com base no modelo de Andreasen e Andersen modificado permitiu obter uma matriz altamente densificada. No estado fresco, os concretos desenvolvidos apresentaram índices de espalhamento entre 200 e 250 mm. No estado endurecido, as amostras apresentaram resistências à compressão médias superiores a 120 MPa aos 28 dias. A adição de fibras apresentou efeitos extremamente positivos nas propriedades relacionadas ao comportamento pós-fissuração, com energia de fratura média superior a 8000J/m² e tensão a tração acima de 13Mpa. Também foi verificado o impacto ambiental desse compósito, mostrando-se na faixa normal de sustentabilidade em comparativo com outros UHPCs. Por fim, pode-se concluir que o desenvolvimento do concreto de ultra-alto desempenho utilizando rejeitos de mineração como agregado alternativo mostrou-se tecnicamente viável e ambientalmente promissor.

Palavras-chaves: rejeitos de mineração; ultra-alta resistência; ecoeficiência; dosagem de concreto; empacotamento de partículas; economia circular.

ABSTRACT

Ultra-high-performance concrete (UHPC) represents a significant evolution in cementitious material technology, although its sustainability is challenged by high CO₂ emissions and the high cost of inputs. As an eco-efficient alternative, this study investigates the incorporation of iron ore tailings sand (ITS) as a substitute for conventional fine aggregates. Thus, this study developed and evaluated an ultra-high-performance concrete incorporating mining tailings as an alternative aggregate (UHPC-TS), reinforced with metallic fibers. Granulometric optimization performed based on the modified Andreasen and Andersen model allowed obtaining a highly densified matrix. In the fresh state, the developed concretes presented slump indices between 200 and 250 mm. In the hardened state, the samples presented average compressive strengths greater than 120 MPa after 28 d. The fibers addition showed extremely positive effects on the properties related to post-cracking behavior, with an average fracture energy greater than 8000 J/m² and a tensile stress above 13 MPa. The environmental impact of this composite was also verified, showing a normal range of sustainability compared to other UHPCs. Finally, it can be concluded that the development of ultra-high performance concrete using mining waste as an alternative aggregate is technically feasible and environmentally promising.

Keywords: tailings; ultra-high strength; eco-efficiency; mix design concrete; particle packing; circular economy.

1 INTRODUÇÃO

Um desenvolvimento avançado na indústria da construção foi alcançado pela aplicação da tecnologia de concreto de ultra-alto desempenho (UHPC). Esforços intensivos de pesquisa foram concentrados na construção para produzir níveis surpreendentes de qualidades com resistência maior que 150 MPa e alta durabilidade que nunca havia sido considerada possível antes. Com essa tecnologia, é possível construir estruturas além dos projetos usuais, mas com uso limitado na construção, uma vez que não é comercialmente viável substituir o concreto convencional na maioria das aplicações. Isso é atribuído ao alto custo dos materiais, à falta de disponibilidade, aos códigos de projeto limitados e às técnicas complicadas de fabricação e cura (Bajaber e Hakeem, 2021).

A gestão de resíduos sólidos é um desafio global impulsionado pelo crescimento industrial, urbanização e consumo excessivo, afetando diretamente o setor da construção civil, especialmente pela elevada emissão de CO₂ na produção do cimento Portland, responsável por 5% a 7% das emissões globais (Metha & Monteiro, 2014). Recentemente, pesquisadores tentaram usar alguns agregados reciclados ou de rejeito como material cimentício suplementar para substituir parcialmente o cimento devido ao efeito pozolânico. O mecanismo de hidratação da pasta adicionada de rejeitos revelou que a substituição do cimento pelo pó reciclado aceleraria a hidratação do cimento, enquanto reduziria a liberação de calor de hidratação (Yu, 2019).

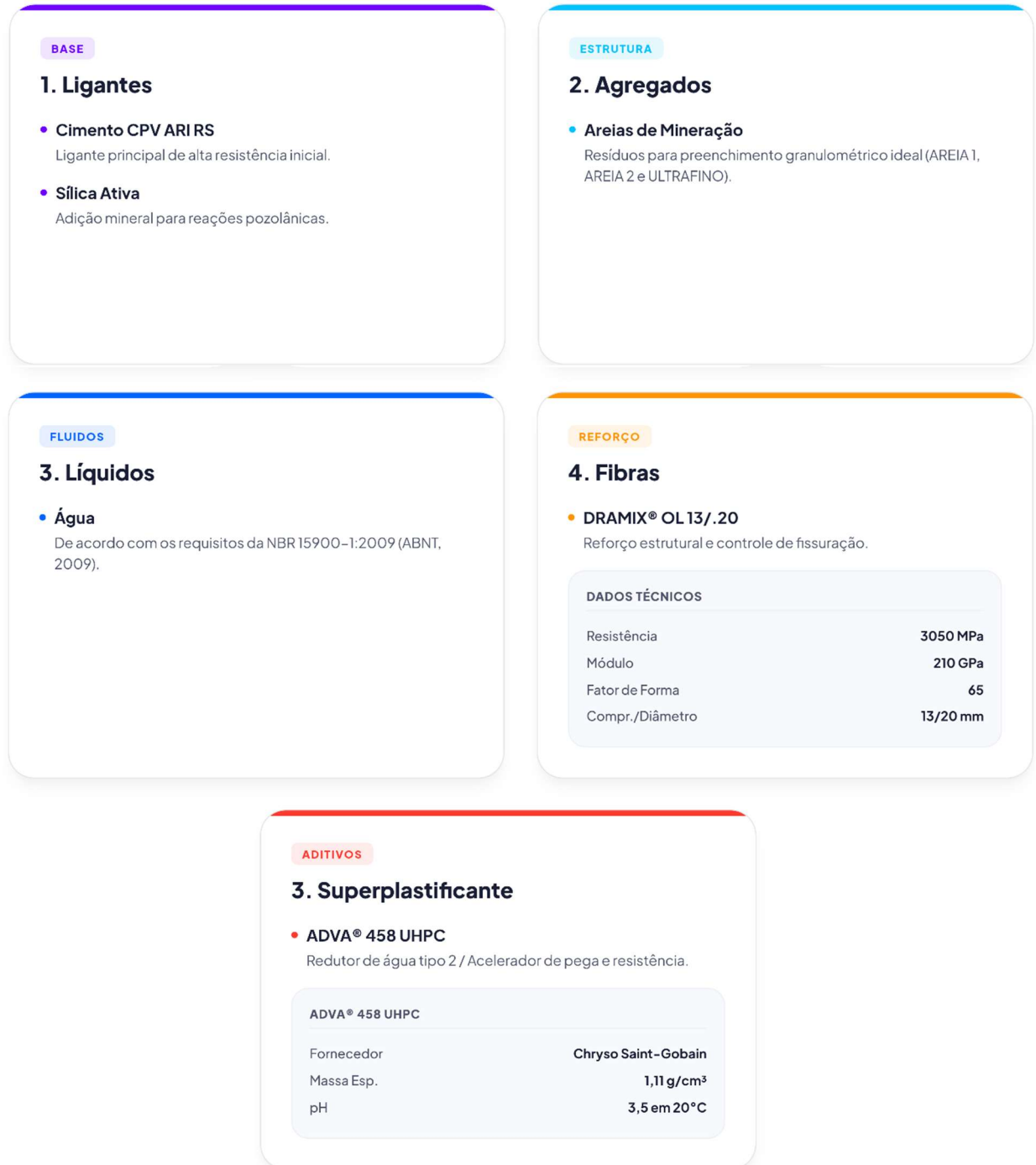
De acordo com Huang *et al* (2021), embora o UHPC seja menos poroso do que um concreto convencional, ainda existe uma zona de transição na interface (ITZ) relativamente fraca. Atualmente, existem três maneiras principais de melhorar a ligação na interface fibra-matriz, que seria a densificação da matriz cimentícia, a melhoria no atrito fibra-matriz e o aumento da ancoragem mecânica por meio do uso de fibras. As fibras, além disso, melhoram significativamente a distribuição das fissuras e limitam as aberturas destas no Estado Limite de Serviço, reduzindo a exposição do concreto ao ambiente. O reforço com fibras é apropriado para estruturas com alta capacidade de distribuição de tensões.

Diante disso, esse estudo visa desenvolver um concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) buscando uma ecoeficiência com incorporação de rejeitos de mineração e unindo propriedades com a adição de fibras metálicas, melhorando a zona de transição da interface, fornecendo resistência residual ao compósito. Esse estudo foi desenvolvido em quatro etapas, desde a caracterização dos materiais, estudo de dosagem do traço referência, propriedades do concreto no estado fresco com e sem fibras e propriedades do concreto no estado endurecido com e sem fibras.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo, foram utilizados os materiais mostrados pela Figura 1-2 e evidenciados pela Figura 2-2.

Figura 1-2 – Representação dos materiais constituintes.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

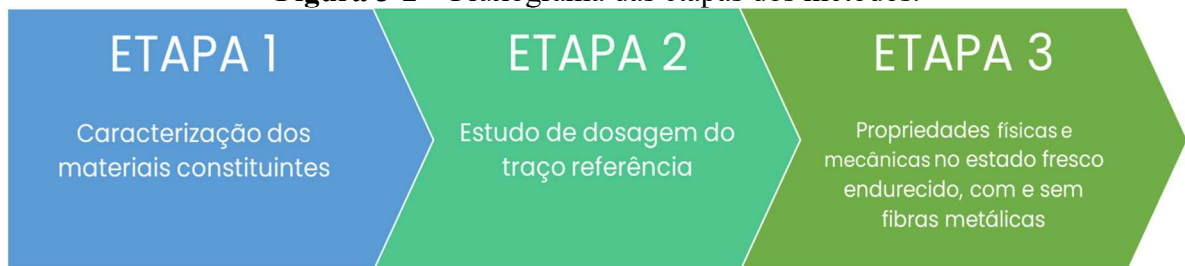
Figura 2-2 – (a) Materiais secos utilizados para composição do concreto; (b) Aditivo utilizado no desenvolvimento do estudo; (c) Fibras metálicas utilizadas no desenvolvimento do estudo.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

Para entender as etapas da metodologia foi realizado um fluxograma das etapas de cada método aplicado, demonstrado através da Figura 3-2.

Figura 3-2 – Fluxograma das etapas dos métodos.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

2.1 ETAPA 1 - Caracterização dos materiais constituintes:

Para entender as propriedades físicas e químicas dos materiais foi necessário a realização de ensaios como colocado no Quadro 1-2.

Quadro 1-2 – Especificações dos ensaios realizados para caracterização dos materiais.

ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO
Ensaio somente no cimento	Determinação da pasta de consistência normal – NBR 16606:2017 Determinação dos tempos de pega – NBR 16607:2018 Determinação do calor de hidratação por calorimetria – ASTM C 186:2019 Determinação do índice de finura – NBR 11579:2012 Determinação do Blaine – NBR 16372:2015.
Granulometria a laser	Os ensaios de Granulometria a laser seguiram a ISO 13320:2009, e o software usado calculou a dimensão da partícula para algumas porcentagens predefinidas em 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 85 e 95% de material passante.

Massa específica	A determinação da massa específica do cimento foi por ensaio com frasco de Le Chatelier, utilizando querosene, um líquido inerte ao cimento, ou seja, que não há reação química. A determinação foi feita a partir dos métodos estabelecidos pela NBR 16605:2017. Já os outros materiais foram feitos pelo ensaio no frasco de Chapman, estabelecidos pela ASTM C 1753:2021 e NBR NM 52:2009. Continuação Quadro
Massa unitária	O ensaio de massa unitária permite avaliar a densidade aparente do agregado e a influência nas propriedades do concreto. Foi aplicado nas areias de rejeito de mineração. A determinação foi feita a partir dos métodos estabelecidos pela NBR NBR 16972:2021, no estado solto. Continuação Quadro
Difração de Raio X (DRX)	A Análise de mineralogia por difração de raios X (DRX) foi aplicado nas areias de rejeito de mineração para verificar a composição mineralógica e a presença de componentes que podem auxiliar na resistência à compressão final do UHPC de acordo com a ASTM E975-13, com um difratômetro Bruker D8 Discover. Continuação Quadro
Termogravimetria (TGA)	A análise por termogravimetria (TGA) foi realizada de acordo com a ASTM E1131:2020 e ISO 11358:2014, a fim de entender os processos como decomposição térmica, oxidação e perda de voláteis em função da temperatura ou tempo nas areias de rejeito de mineração.
Fluorescência de Raio X (FRX)	A análise dos óxidos maiores e menores por fluorescência de raios X (FRX) segue a ISO 12677:2014 e foi aplicada para verificar os óxidos presentes nas areias de rejeito de mineração, medidas em um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

2.2 ETAPA 2: Estudo de dosagem do traço referência

Segundo Bajaber e Hakeem (2021), os principais fatores que controlam a permeabilidade são a microestrutura de densidade e a porosidade da matriz do concreto. A exclusão de agregados grossos, inclusão de partículas finas e ultrafinas, sílica ativa e a redução da proporção de água para ligante, juntamente com superplastificante diluído, trabalharão juntos para homogeneizar a mistura, diminuindo substancialmente os poros finos. Para isso, foi realizado o empacotamento baseado no modelo de Andreasen e Andersen Modificado. Em conformidade com Nato (2023), o modelo de Andreasen e Andersen Modificado é mais eficaz para concretos finos e ultra-finos (como o UHPC), pois considera o tamanho da menor partícula da mistura (D_{min}). A equação fundamental para determinar a porcentagem passante acumulada ($CPFT$) é:

$$P(D) = 100 \cdot \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right)$$

Em que:

D : Diâmetro da partícula em análise;

D_{max} : Diâmetro máximo dos agregados na mistura;

D_{min} : Diâmetro da menor partícula (geralmente a sílica ativa);

q (Fator Q): O expoente de distribuição que dita a "assinatura" da mistura

O valor de q determina se a mistura foi mais rica em finos ou em agregados graúdos;

$q < 0.25$: Indica excesso de partículas finas. Isso aumenta a trabalhabilidade e a coesão, mas exige mais superplastificante devido à alta área superficial;

$q > 0.36$: Indica uma mistura mais "pobre" em finos e mais rica em agregados graúdos.

Para sua definição foi utilizada a caracterização granulométrica a laser de todos os materiais e a utilização de uma planilha de otimização (Solver) no ajuste das proporções de cada material, de modo que a curva resultante da mistura obtida, aproxime-se o máximo possível da curva teórica de Andreasen para o q escolhido.

Foi utilizado superplastificante com capacidade alta de redução de água e alto poder de dispersão de partículas e desenvolvimento de um teor ótimo de materiais e ligantes através de testes com diversas proporções. O fator a/l foi determinado de acordo com os resultados das variações de 0,15 a 0,18.

A execução foi feita com misturador de argamassa e com o tempo de 15 min por mistura, sendo 4 minutos de mistura somente com o cimento e as partes líquidas (água e aditivos) para dispersão, 4 minutos para homogeneização com todos os materiais e 7 minutos com velocidade máxima do misturador. A moldagem foi feita com o auxílio de mesa vibratória. A sequência de processos de execução da mistura é demonstrada pela Figura 4-2.

Figura 4-2 – Sequência de mistura do traço ideal.

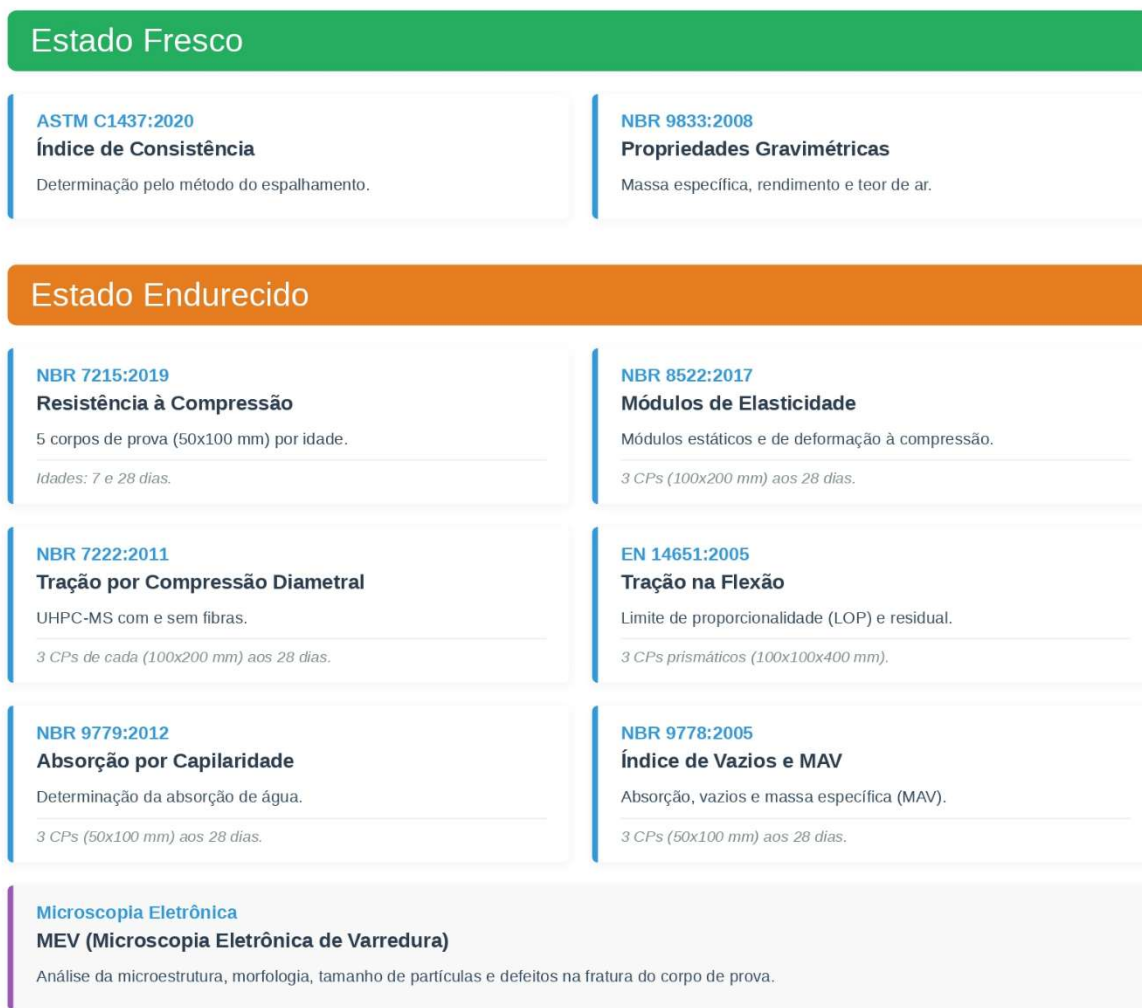


Fonte: Autoria Própria, 2026.

2.3 ETAPA 3: Propriedades físicas e mecânicas nos estados fresco e endurecido, com e sem fibras metálicas

Os ensaios realizados estão apresentados na Figura 5-2.

Figura 5-2 – Ensaio a ser realizados nos estados fresco e endurecido.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

A caracterização do concreto no estado fresco, pautada nos ensaios de índice de consistência e propriedades gravimétricas, determina a trabalhabilidade e a homogeneidade da mistura antes do processo de endurecimento. Segundo Sepulveda (2025), a análise do espalhamento e da massa específica não visa apenas o controle de qualidade operacional, mas busca assegurar que a reologia do material seja compatível com a densidade de armaduras e o método de lançamento. Sepulveda (2025) ainda mostra que, controle rigoroso nesta etapa previne a formação de vazios macroscópicos e a segregação de agregados, fatores que, podem comprometer a matriz cimentícia e os resultados de desempenho mecânico subsequentes.

No estado endurecido, de acordo com Shi *et al.* (2024), a avaliação da resistência à compressão atua como o indicador da compacidade da matriz, validando o empacotamento granular otimizado pelo uso dos rejeitos de mineração, além de ser o principal parâmetro para

concretos. No entanto, para o UHPC, a análise desloca-se também para o comportamento sob tração e a quantificação da tenacidade, propriedades que estão relacionadas a adição das fibras metálicas. De acordo com Khan *et al* (2017), esses ensaios são determinantes para a investigação do efeito de costura (bridging) exercido pelas fibras na microfissuração, para que o material apresente uma fase de pós-fissuração estável, evitando rupturas abruptas, comum em matrizes cimentícias de altíssima resistência. Nesse sentido, segundo Saraiva Filho (2019), investigar a energia de fratura permite compreender a capacidade de dissipação de energia do sistema, analisando não apenas o limite de proporcionalidade, mas o ganho de tenacidade conferido pela adição das fibras. A correlação entre esses dados e a microestrutura foram parâmetros para verificação do concreto desenvolvido, não se limitando ao desempenho em compressão axial, mas também a capacidade de suportar deformações significativas antes da falha final.

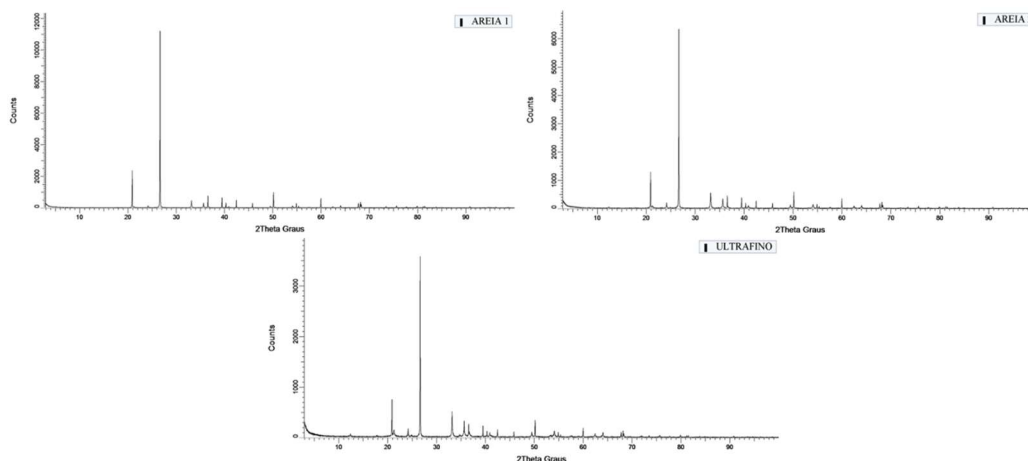
Com relação a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), segundo Bahmani e Mostofinejad (2022), o objetivo é confirmar se a microestrutura desenvolvida reflete o comportamento de ultra-alto desempenho esperado. A MEV atua como um diagnóstico da zona de transição e a interação entre a pasta cimentícia e o rejeito de mineração utilizado, justificando como a otimização em escala microscópica resulta nas propriedades macroscópicas de alta resistência e baixa permeabilidade, características esperadas neste estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades das areias de rejeito de mineração

Inicialmente foi necessário conhecer as areias de rejeitos de mineração utilizadas no estudo e, através da Difração de Raios X, termogravimetria, e fluorescência, mostrados nas Figuras 6-2, 7-2, e Tabelas 1-2 e 2-2, foi possível determinar a composição mineralógica das amostras, não verificando a presença de impurezas e materiais voláteis que pudessem prejudicar o desempenho e a durabilidade deste concreto. Essas análises possibilitaram ver ainda uma estabilidade térmica no material Ultrafino, sugerindo que pode conter resíduos minerais com capacidade pozolânica, como observado em estudos com metacaulim e sílica ativa, sugerindo a substituição parcial de aglomerantes, como prediz Mansa e Rou (2021).

Figura 6-2 – Gráficos da análise por difração de Raios X (DRX) das areias de rejeitos de mineração



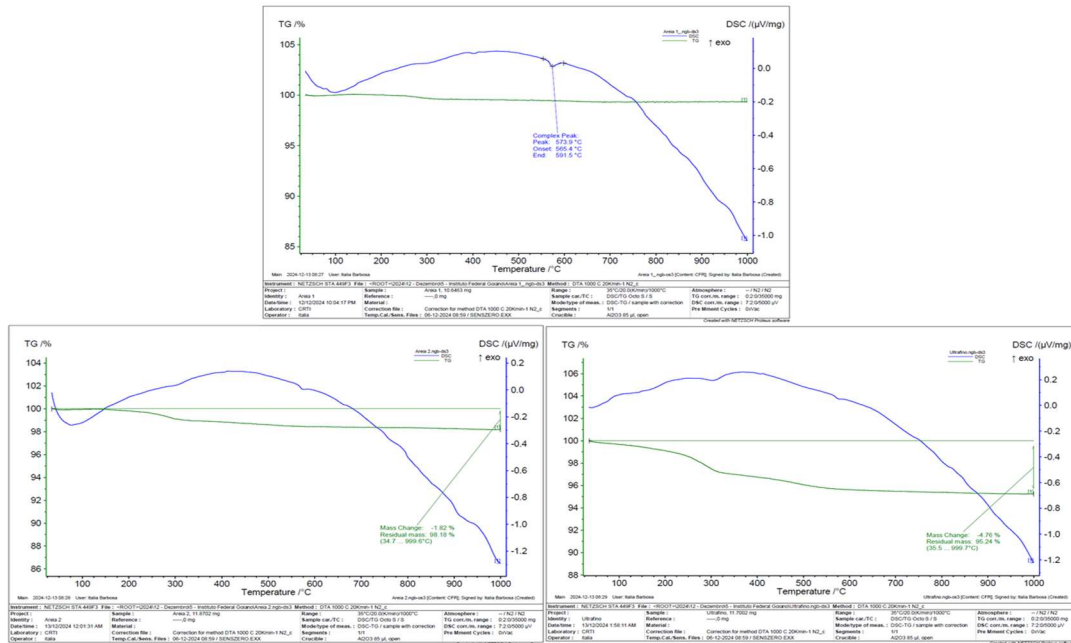
Fonte: Autoria Própria, 2026

Ao analisar os difratogramas, concebidos através da Difração de Raios X (DRX) e apresentados na Figura 5, é percebido que existe um pico principal intenso a aproximadamente $26,6^\circ$ 2θ . Esse é um pico característico, baseado em alguns estudos como, Gomes e Bezerra (2024) e Versieux *et al* (2024), é do quartzo (SiO_2), um dos minerais mais abundantes em areias naturais. O quartzo difrata fortemente nesta posição, confirmando que é o mineral predominante. Já os picos menores perto de 20° a 70° 2θ , indicam a presença de outras fases, possivelmente feldspatos, caulinita, mica (moscovita/biotita) ou traços de outros minerais argilosos.

Pode-se supor, de acordo com Gomes e Bezerra (2024) e Versieux *et al* (2024), que a composição mineralógica aproximada desses materiais com base em DRX e análise semiquantitativa, nos apresenta aproximadamente 68% de quartzo (SiO_2), como mineral predominante e 14% de micas (exemplos: moscovita ou caulinita), como possíveis finos ou fração argilosa. Ainda há a presença de feldspatos e outros acessórios, em aproximadamente 18%, que contribuem com resistência, mas podem afetar a trabalhabilidade de um concreto. É importante portanto notar que, são materiais similares se comparados na DRX, variando em outros aspectos e outras análises.

De acordo com Santos *et al* (2020), a termogravimetria (TGA) é uma técnica de análise térmica que mede a variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo, sob atmosfera controlada. Essa técnica é amplamente utilizada para estudar processos de decomposição térmica, oxidação, perda de solventes ou água, além da análise de estabilidade térmica de materiais. A TGA fornece informações valiosas sobre a composição, pureza e comportamento térmico de substâncias sólidas e líquidas.

Figura 7-2 – Gráficos da análise por termogravimetria das areias de rejeitos de mineração



Fonte: Autoria Própria, 2026

De acordo com as análises de TGA realizadas e com base em Mansa e Rou (2021) a ausência de perda de massa significativa sugere um comportamento inorgânico estável, típico de areias naturais silicosas. O pico térmico próximo a 573°C, observado na Areia 1, coincide com a transição de fase do quartzo $\alpha \rightarrow \beta$, uma mudança cristalina endo/exotérmica conhecida em sílica. Esse pico, apesar de não envolver perda de massa, é característico de areias ricas em quartzo. A Areia 2 também é bastante estável termicamente, com perda de massa um pouco maior que a Areia 1. Essa perda leve pode indicar presença de pequenas quantidades de matéria orgânica, umidade ou sais voláteis. Assim como a Areia 1, trata-se provavelmente de um material predominantemente silicoso. A estabilidade das curvas de TGA confirmam comportamento típico de materiais minerais não reagentes. Igual as outras areias, no Ultrafino, a baixa perda de massa indica um material predominantemente inorgânico, estável termicamente, com mínima presença de compostos voláteis ou orgânicos.

Para melhor compreender a composição desses materiais foi realizada a espectrometria de fluorescência de Raios X (FRX). De acordo com De Azevedo Padilha *et al* (2021), a espectroscopia de fluorescência de Raios X por dispersão de energia é uma técnica empregada para identificar os elementos químicos presentes em materiais orgânicos e industriais. Além disso, permite determinar a concentração de cada elemento detectado, diferenciando-os entre si. A radiação eletromagnética emitida pela interação entre ânodo e cátodo propaga-se em linha reta e passa por processos de absorção, difração e refração, o que possibilita a identificação dos elementos químicos na amostra analisada.

Tabela 1-2 – Análise por Fluorescência de Raio (FRX) dos óxidos maiores das areias de rejeitos de mineração.

ÓXIDOS ANALISADOS (%)	AREIA 1	AREIA 2	ULTRAFIN O
SiO ₂	82,79	68,53	52,93
TiO ₂	< LQ	< LQ	0,11
Al ₂ O ₃	0,47	1,72	4,58
Fe ₂ O ₃	15,3	28,35	37,29
MnO	< LQ	0,28	0,78
MgO	< LQ	< LQ	0,14
CaO	0,39	0,17	0,14
Na ₂ O	< LQ	< LQ	< LQ
K ₂ O	< LQ	< LQ	0,15
P ₂ O ₅	< LQ	< LQ	0,23
SO ₃	< LQ	< LQ	< LQ
LOI (%)	0,83	1,57	3,97
Soma (%)	99,77	100,62	100,33

(<LQ) = Abaixo do limite quantificável.)

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Tabela 2-2 – Análise por Fluorescência de Raio (FRX) dos óxidos menores das areias de rejeitos de mineração.

Limite de Detecção Mínimo (ppm)	Elementos Analisados (ppm)	AREIA 1	AREIA 2	ULTRA-FINO
5	Sc	< LQ	< LQ	5
15	V	< LQ	23	31
20	Cr	< LQ	26	51
10	Co	< LQ	< LQ	< LQ
10	Ni	16	20	35
15	Cu	15	24	32
20	Zn	< LQ	< LQ	25
5	Ga	< LQ	< LQ	< LQ
10	As	< LQ	10	21
10	Rb	< LQ	< LQ	16
20	Sr	< LQ	< LQ	22
15	Y	< LQ	< LQ	19
20	Zr	< LQ	< LQ	25
5	Nb	< LQ	< LQ	< LQ
20	Mo	< LQ	< LQ	< LQ
10	Cd	< LQ	< LQ	< LQ
10	Sn	< LQ	< LQ	< LQ
10	Sb	< LQ	< LQ	< LQ
50	Ba	36	103	264
15	La	< LQ	< LQ	< LQ
20	Ce	< LQ	< LQ	33
15	Pb	< LQ	< LQ	26
10	Th	< LQ	< LQ	< LQ
10	U	< LQ	< LQ	< LQ

(<LQ) = Abaixo do limite quantificável.)

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Observa-se a diminuição progressiva do teor de dióxido de silício (SiO_2) das frações mais grossas para a mais fina, indicando maior pureza silicosa na Areia 1. Em contrapartida, há um incremento significativo dos teores de óxidos de ferro (Fe_2O_3) e alumínio (Al_2O_3) na fração de Ultrafino, o que é compatível com a concentração de minerais pesados e argilominerais em partículas menores. O valor elevado de perda ao fogo (LOI) na fração de Ultrafino também indica a presença de material volátil ou matéria orgânica.

A concentração de metais pesados como cromo (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu), arsênio (As) e chumbo (Pb) é significativamente superior na fração de Ultrafino. A presença desses elementos em teores elevados levanta preocupações quanto à durabilidade do concreto, por possível interferência na hidratação dos compostos do cimento, bem como pelo potencial impacto ambiental em cenários de lixiviação. O bário (Ba), por exemplo, alcança valores de até 264 ppm na fração de Ultrafino.

A Areia 1 apresenta características compatíveis com uso convencional como agregado miúdo, dado o alto teor de sílica e baixa concentração de impurezas metálicas. A Areia 2 representa um intermediário entre a areia tradicional e o resíduo fino. Seu uso é tecnicamente viável, desde que avaliado quanto à influência na coloração, reatividade e possíveis interferências químicas. Já a fração de Ultrafino apresenta algumas limitações ao uso direto em concretos estruturais. Apesar do alto teor de óxidos metálicos, sugerindo certo potencial pozolânico, a presença de metais pesados em concentrações elevadas e o alto valor de Perda ao fogo (LOI) indicam a necessidade de análises complementares. Ensaio de atividade pozolânica (NBR 5752:2014), lixiviação (NBR 10005:2004), e estudo do comportamento físico-mecânico em matrizes cimentícias são estudos recomendados.

A análise por FRX demonstrou que a qualidade química dos materiais varia significativamente entre as frações. A Areia 1 é apropriada para uso como agregado convencional, enquanto a Areia 2 exige avaliações adicionais. O Ultrafino apresenta maior risco ambiental e técnico, devendo ser considerado como um material de potencial uso suplementar (filer ou adição mineral) apenas mediante validação experimental abrangente.

A empresa Agera, fornecedora das areias de rejeito apresentou relatórios com laudos e ensaios complementares, determinando que os resíduos originários das amostras das três areias (Areia 1, Areia 2 e Ultrafino) são classificados como Classe II B (Não Perigoso – Inerte), por não ter nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos

padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Esses relatórios estão em anexo a este estudo.

3.2 Teores ideais do traço e comportamento no estado fresco

No estado fresco, a trabalhabilidade do UHPC é regida pela teoria do empacotamento das partículas. Segundo Mesquita (2024), é importante destacar que, o empacotamento, quando eficiente, reduz drasticamente a necessidade de água do traço, pois há menos vazios para preencher, resultando em um UHPC no estado fresco, mais coeso e homogêneo. Como o UHPC-TS não possui agregados graúdos, a curva granulométrica foi pensada de forma a ser otimizada, para minimizar o volume de vazios. Isso foi realizado através do modelo de Andreasen e Andersen Modificado. Segundo Chu *et al* (2023), o modelo de Andreasen e Andersen Modificado, é um modelo clássico de empacotamento contínuo de partículas e por isso é considerado excelente para misturas de UHPC. Diversos pesquisadores produziram um UHPC com alta resistência mecânica através desse modelo.

A trabalhabilidade, também é dependente da dispersão eletrostática ou histórica gerada pelos superplastificantes, que neste estudo foi utilizado ADVA® 458 UHPC. A "dosagem de saturação" é o ponto crítico quando o superplastificante cobre a superfície das partículas, garantindo a dispersão máxima. Quando essa dosagem é ultrapassada, verifica-se a chamada "segregação da pasta", e a água separa-se do cimento, destruindo a coesão do material fresco. Outro fator determinante é a compatibilidade dos aglomerantes com esse aditivo, podendo interferir na eficiência do aditivo, alterando o tempo de trabalhabilidade. Por isso, foi necessário caracterizar o cimento utilizado para verificar as propriedades desse material, visto que hoje no mercado encontram-se diversos Cimentos Portland CPV-RS. A caracterização é apresentada pela Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Análise do cimento utilizado.

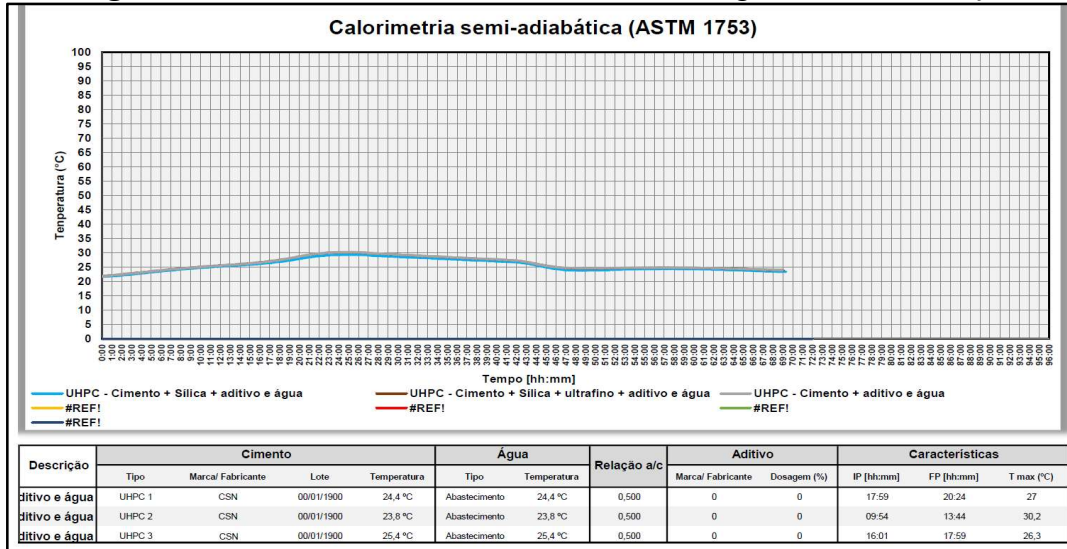
TIPO	R7	R28	PASTA	BLAINE
CPV RS	40,0 MPa	53,2 MPa	32,00%	4710 cm ² /g
FINURA (≤6,0%)	INÍCIO DE PEGA (≥60min)	INTERVALO DE PEGA	FIM DE PEGA(≤600min)	CALOR DE HIDRATAÇÃO
0,21%	332 min	70 min	402 min	48,1 °C

Fonte: Autoria Própria, 2026

Foi realizado a Calorimetria semiadiabática, de acordo com a ASTM 1753, para verificar a compatibilidade dos aglomerantes com o superplastificante ADVA® 458 UHPC. Essa calorimetria foi feita com saturação máxima do aditivo e com três misturas, mostradas na Figura 8-2, e foi observado que existe compatibilidade entre os aglomerantes e o aditivo, devido ao

comportamento ser semelhante nas três misturas, além da reação entre eles acontecer, mostrada pela manutenção da temperatura.

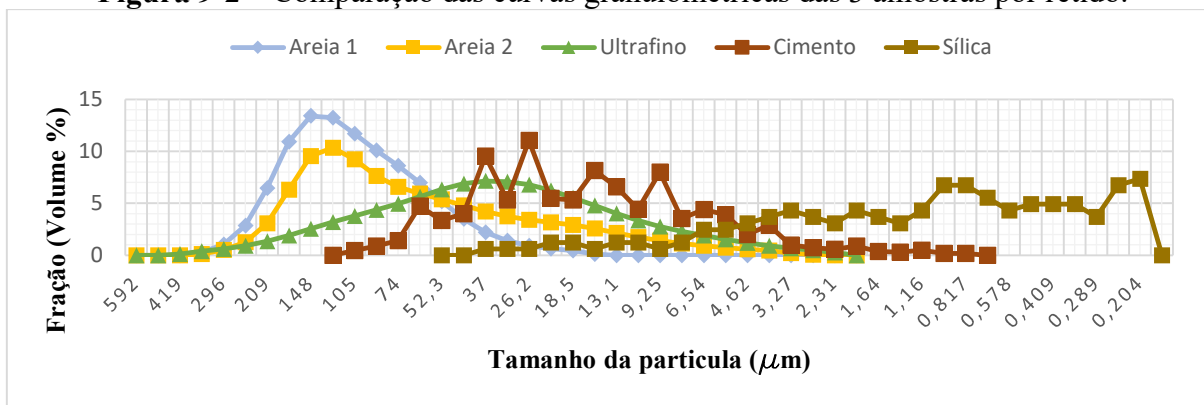
Figura 8-2 – Calorimetria semiadiabática com os aglomerantes do traço.



Fonte: Autoria Própria, 2026

A partir da granulometria a laser, mostrada na Figura 9-2, das massas específicas, dadas pela Tabela 4-2 e das massas unitárias, dadas pela Tabela 5-2, foi possível determinar um empacotamento através do modelo de Andreasen e Andersen Modificado, buscando a configuração ideal de traço com as proporções ideais.

Figura 9-2 – Comparação das curvas granulométricas das 3 amostras por retido.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

Tabela 4-2 – Massa específica dos materiais secos do estudo.

	Cimento	Sílica	Areia 1	Areia 2	Ultrafino
Ensaio A	3,10 g/cm³	Ensaio A 2,26 g/cm³	Ensaio A 2,91 g/cm³	Ensaio A 2,97 g/cm³	Ensaio A 3,20 g/cm³
Ensaio B	3,00 g/cm³	Ensaio B 2,18 g/cm³	Ensaio B 2,79 g/cm³	Ensaio B 2,96 g/cm³	Ensaio B 3,09 g/cm³
Média	3,05 g/cm³	Média 2,22 g/cm³	Média 2,85 g/cm³	Média 2,96 g/cm³	Média 3,15 g/cm³

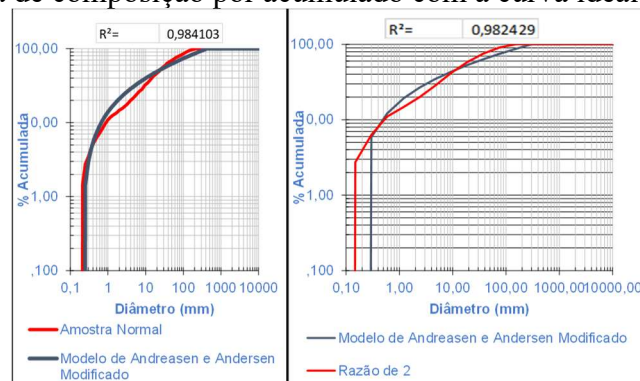
Fonte: Autoria Própria, 2026.

Tabela 5-2 – Massa unitária dos materiais secos do estudo.

Areia 1		Areia 2		Ultrafino	
Ensaio A	1,5	Ensaio A	1,4	Ensaio A	1,3
(g/cm³)	1	(g/cm³)	9	(g/cm³)	8
Ensaio B	1,5	Ensaio B	1,5	Ensaio B	1,3
(g/cm³)	1,5	(g/cm³)	1	(g/cm³)	7
Ensaio C	1,5	Ensaio C	1,4	Ensaio C	1,3
(g/cm³)	2	(g/cm³)	9	(g/cm³)	7
Média (g/cm³)	1,5	Média (g/cm³)	1,4	Média (g/cm³)	1,3
	1		9		7

Fonte: Autoria Própria, 2026.

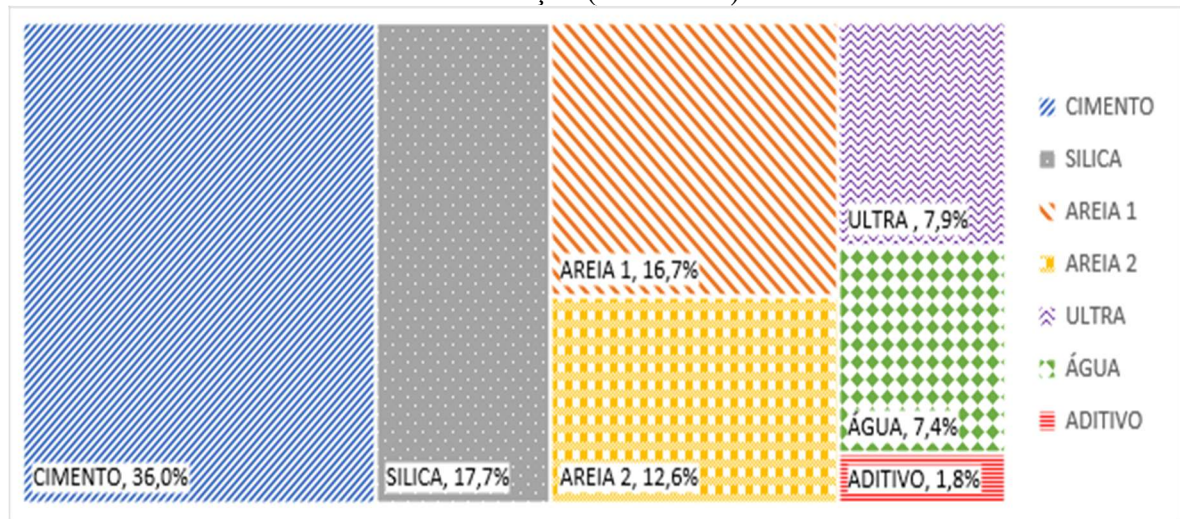
Nesse modelo de Andreasen e Andersen Modificado, o parâmetro “R²”, representa uma porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo. Ele é calculado como “1” menos a razão da soma dos quadrados dos erros (que é a variação que não é explicada pelo modelo) para a soma total dos quadrados, assim, quanto mais próximo de “1”, melhor é o ajuste da composição. Liu *et al* (2022), esclareceram os múltiplos efeitos do valor típico do parâmetro q, no desempenho do UHPC usando o modelo de empacotamento de partículas de Andreasen e Andersen Modificado, e descobriram que o valor de “q”, recomendado, considerando o desempenho do UHPC, deveria corresponder a menor ou igual a 0,23, o que favorece a presença de partículas mais finas e aumenta a densidade da matriz, reduzindo os vazios entre partículas. Na melhor composição verificada, dada pela Figura 8, foi apresentado o valor de 0,12 para o parâmetro “q” e o R² é detalhado pela Figura 10-2. Nessa Figura, foi exibido tanto a raiz quadrada, quanto a razão de dois, mostrando a similaridade das curvas, e foi utilizada a razão de dois, devido a distribuição ser mais refinada, apesar de numericamente, menos próximo que a raiz quadrada.

Figura 10-2 – Curva de composição por acumulado com a curva ideal e o R² da composição.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Foram testadas diversas proporções determinadas pelo modelo, mantendo um fator água/cimento (a/c) de 0,20 e fator água/ligante (a/l) de 0,14. O teor, água materiais secos (H) mais determinado foi de 8,10%. É importante ressaltar que não foi considerado na soma dessa água, a água presente no aditivo, sendo esse também uma solução aquosa. O traço com a melhor composição e teores ideais está demonstrado na Figura 11-2. A proporção de fibra utilizada foi de 0,2%, sendo realizados ensaios com e sem essa adição.

Figura 11-2 – Composição e teores ideais do traço de UHPC com areias de rejeito de mineração (UHPC-TS).



Fonte: Autoria Própria, 2026.

De acordo com Mesquita (2024), o UHPC é frequentemente classificado como um material que segue o modelo de Herschel-Bulkley ou, em simplificações de campo, um Fluido de Bingham Modificado. O objetivo do seu comportamento reológico é garantir o autoadensamento sem comprometer a estabilidade. Nesse aspecto, a tensão de escoamento, deve ser alta o suficiente para manter os constituintes, como agregados finos, sílica ativa e fibras, em suspensão, impedindo a segregação ou a exsudação. Ao mesmo tempo, não pode ser tão alta que impeça o fluxo auto gravitacional. Já a viscosidade plástica do UHPC, diferente dos concretos convencionais, tende a ser elevada. Isso é necessário para evitar a decantação das partículas de cimento e adições minerais ultrafinas, que possuem alta energia superficial. Para que isso fosse confirmado, exigia-se pesquisas e ensaios mais aprofundadas em reologia, podendo estes serem feitos em estudos posteriores, não sendo o foco neste estudo.

Porém, ainda segundo Mesquita (2024), um comportamento reológico intrínseco do UHPC (Ultra-High Performance Concrete) adequadamente dosado é a tixotropia. Esse fenômeno refere-se à capacidade do material de variar a viscosidade em função do histórico de

deformação ou do esforço aplicado ao longo do tempo. Em condições de repouso, ocorre a reorganização e formação de uma rede estruturada entre as partículas sólidas, o que resulta no aumento progressivo da viscosidade e da tensão de escoamento do material. Esse ganho estrutural confere maior estabilidade ao concreto fresco, reduzindo a tendência ao escoamento indesejado, característica particularmente vantajosa em moldagens envolvendo formas verticais ou geometrias complexas. Por outro lado, quando o material é submetido a vibração, cisalhamento ou movimento, essa rede particulada rompe temporariamente, promovendo a redução da viscosidade aparente. Como consequência, o material apresenta maior capacidade de fluxo e de preenchimento, permitindo a adequada ocupação de moldes com geometrias intrincadas. Após a cessação do esforço, a estrutura interna tende a restabelecer gradualmente, recuperando as propriedades reológicas iniciais. Por esses fatores foi definido que o espalhamento seria determinado através da “flow table” segundo ASTM C1437:2020. De acordo com a ASTM C1856:2020, um UHPC deve ter um espalhamento através da mesa de fluxo em um intervalo de 200 a 250mm. A Tabela 6-2 e a Figura 12-2, mostram que os concretos elaborados nesse estudo estão no parâmetro, com e sem fibra.

Tabela 6-2 – Índice de espalhamento segundo ASTM C1437:2020, com e sem fibra.

Índice de Espalhamento sem fibra		Índice de Espalhamento com fibra	
Medida 1 (mm)	235	Medida 1 (mm)	225
Medida 2 (mm)	240	Medida 2 (mm)	222
Medida 3 (mm)	230	Medida 3 (mm)	224
Média (mm)	235	Média (mm)	223,6

Figura 12-2 – Concreto após espalhamento segundo ASTM C1437:2020.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

Foi observado que a incorporação de fibras metálicas no UHPC-TS promoveu a redução na fluidez decorrente do aumento do atrito interno e da formação de uma estrutura esquelética que restringe o fluxo da pasta. De acordo com Sepulveda (2025) este comportamento é governado pela razão de aspecto das fibras e pela fração volumétrica adicionada. Segundo Sepulveda (2025) ainda, para mitigar a perda de trabalhabilidade associada à natureza angular dos agregados, nesse caso dos rejeitos de mineração e à rede de restrição formada pelas fibras metálicas, a estratégia de dosagem deve focar na saturação do aditivo. Ao adicionar as fibras metálicas neste estudo, também foi colocado a porcentagem de 12% de superplastificante a mais e isso fez com que mantivesse a trabalhabilidade e a fluidez do UHPC-TS.

Segundo Abbas, Nehdi e Saleem (2016), o teor de ar relatado em misturas de UHPC varia de 0,3 a 5,4% em volume, dependendo do projeto da mistura. Dosagens mais altas de água/ligante e sílica ativa tendem a aumentar o teor de ar em misturas de UHPC. Além disso, o teor total de ar é altamente dependente do tipo de misturador utilizado teor de ar (tipicamente 4,3%). A Tabela 7-2, mostra o teor de ar da mistura estudada em estado fresco sendo esse ar considerado adequado para melhor fluxo de espalhamento e propriedades aprimoradas de misturas de UHPC. A Tabela 7-2 também mostra a massa específica do UHPC, calculada utilizando as massas específicas da Tabela 4-2, o rendimento, o volume total e o índice de ar, dados pelo método gravimétrico (NBR 9833:2088).

Tabela 7-2 – Massa específica, rendimento e teor de ar por método gravimétrico - NBR 9833:2008.

Tipo de Concreto UHPC-TS	Massa (m)	Massa específica (ρ)	Rendimento (R)	Volume total (Vt)	Índice de ar (Ia)	Teor de ar (A)
Sem fibra	3,77 Kg	2,4 g/cm ³	1019,11 m ³	971,96 m ³	1,05	4,60%
Com fibra	3,85 Kg	2,45 g/cm ³	1027,87 m ³	1022,01 m ³	1,01	0,60%

Fonte: Aatoria Própria, 2026.

3.3 Propriedades mecânicas e físicas

3.3.1 Resistência a compressão, capilaridade e MAV

De acordo com a ASTM C1856, que determina práticas padrão para fabricação e testes de amostras de UHPC, um UHPC é definido como uma mistura cimentícia que possua no mínimo 120MPa. Observando a Tabela 8-2 e a Figura 13-2, é possível então por esse parâmetro considerar o concreto gerado como um UHPC, tanto com a adição das fibras metálicas, quando sem essa adição. É importante notar que para a cura, essa mesma norma, determina que, pode ser usado alguns tratamentos térmicos para obter melhor desempenho, porém no concreto do

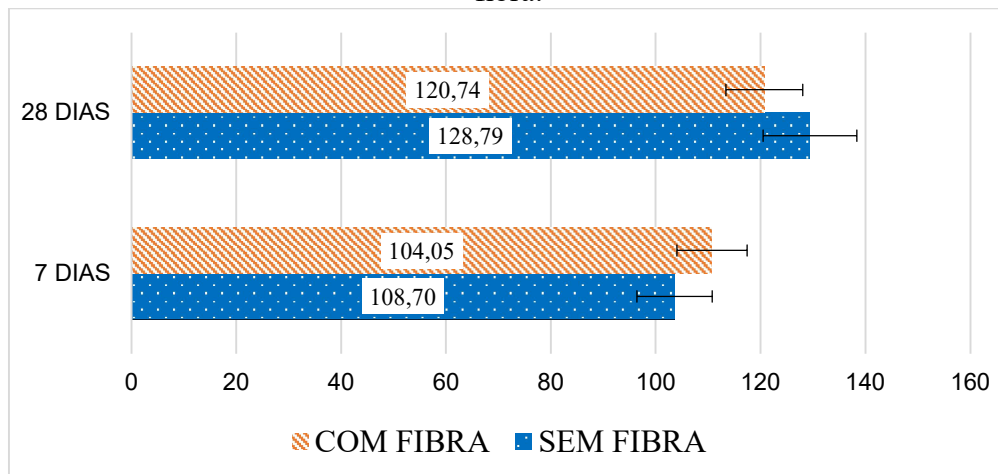
estudo, a cura foi feita, saturada, submersa em água e em temperatura ambiente (26°C), evidenciando a obtenção de resultados ainda mais satisfatórios se aplicado esses tratamentos.

Tabela 8-2 – Resistências à compressão com e sem fibra, em Mpa.

UHPC-TS - SEM FIBRA			UHPC-TS - COM FIBRA		
Nº CP	7 DIAS	28 DIAS	Nº CP	7 DIAS	28 DIAS
CP 1	99,67	119,16	CP 1	100,82	117,84
CP 2	103,06	124,92	CP 2	104,34	118,51
CP 3	103,6	129,39	CP 3	110,73	120,71
CP 4	106,88	134,67	CP 4	111,62	123,25
CP 5	107,04	135,79	CP 5	115,98	123,41
Média	104,05	128,79	Média	108,70	120,74

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Figura 13-2 – Evolução das resistências à compressão nas idades 7 e 28 dias, com e sem fibra.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

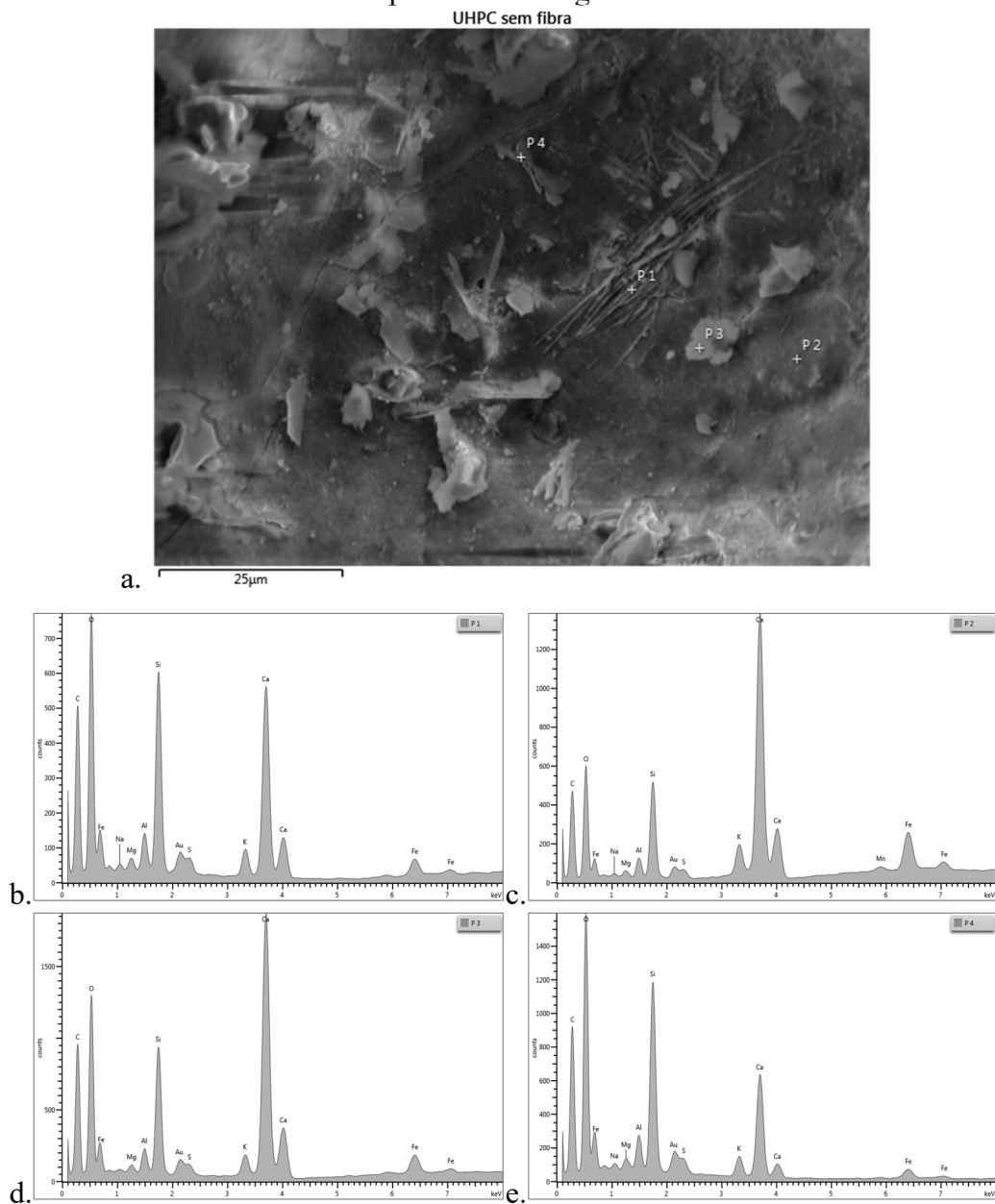
Figura 14-2 – Corpo de prova sem fibra após rompimento por compressão.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

Observando do ponto de vista microestrutural, através da imagem de Microscopia de Varredura Eletrônica com Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV/EDS) apresentada pela Figura 15-2, é notório uma matriz extremamente compacta, com baixa presença de vazios e predominância de produtos hidratados refinados. A distribuição heterogênea de regiões densas e zonas interfaciais refinadas explica a transição entre o regime elástico linear e o início da não linearidade na curva tensão–deformação.

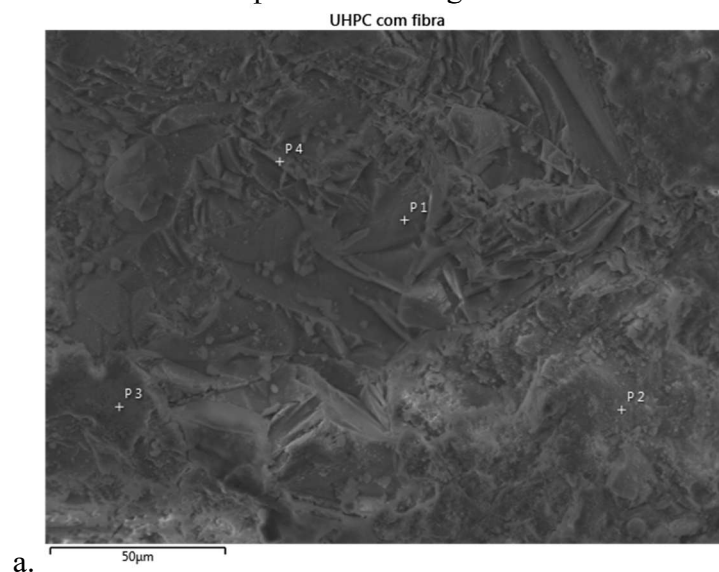
Figura 15-2 – (a) Imagem 1 de MEV do UHPC-TS sem fibra metálica; (b) EDS do ponto 1 da Imagem 1; (c) EDS do ponto 2 da Imagem 1; (d) EDS do ponto 3 da Imagem 1; (e) EDS do ponto 4 da Imagem 1.

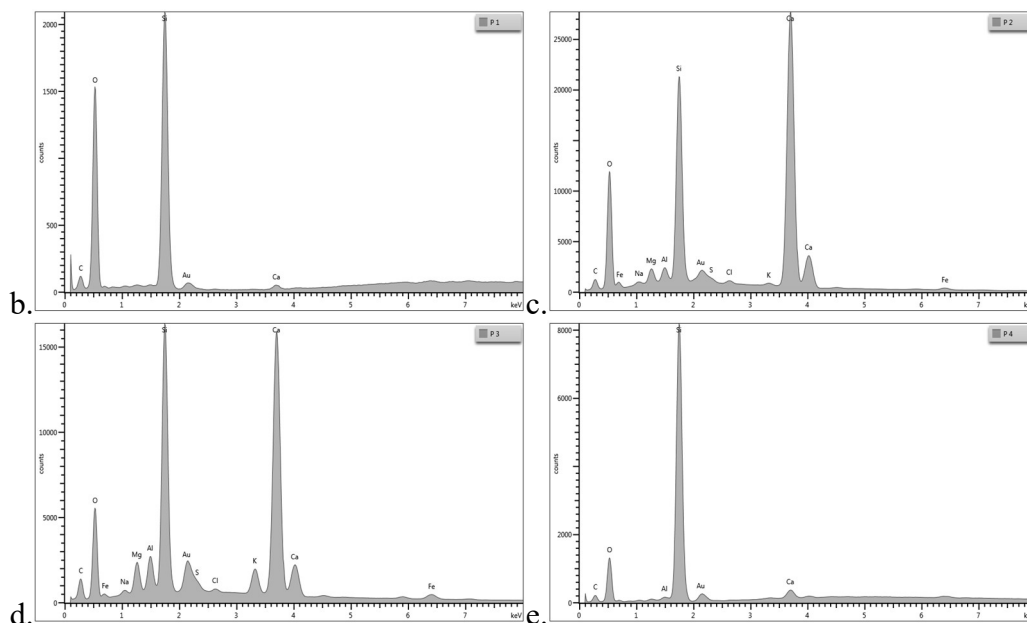


Fonte: Aatoria Própria, 2026.

De forma geral, observa-se uma matriz densa composta por produtos aciculares finos e interligados, característicos de géis de C-S-H altamente compactos. De acordo com Chu *et al.* (2022) essas configurações microestruturais reduzem significativamente a porosidade capilar e contribuem, do ponto de vista mecânico, como o principal elemento responsável pela alta resistência à compressão e pela baixa deformabilidade inicial do UHPC, garantindo elevada rigidez estrutural. Esse comportamento microestrutural explica os elevados valores de resistência à compressão obtidos aos 28 dias. A resistência mecânica em concretos de ultra-alto desempenho está diretamente associada à redução da porosidade total e ao refinamento da ITZ. Em conformidade com Shi *et al.* (2024), a presença de partículas finas oriundas das areias de rejeito contribuiu para o efeito de preenchimento, promovendo melhor acomodação granulométrica e redução dos vazios críticos. Além disso, a possível atividade pozolânica de frações mais finas do rejeito pode ter contribuído para a formação adicional de C-S-H secundário, aumentando a densificação da matriz e reduzindo regiões frágeis suscetíveis à nucleação de microfissuras sob carregamento compressivo. A presença de sílica ativa também é fator importante ao notar as reações secundárias com o hidróxido de cálcio, transformando-o em silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Nas imagens de MEV, isso se traduz em uma matriz mais "fechada", em que a ausência de cristais volumosos de portlandita indica reação química eficiente que fortalece a pasta.

Figura 16-2 – (a) Imagem 4 de MEV do UHPC-TS com fibra metálica; (b) EDS do ponto 1 da Imagem 4; (c) EDS do ponto 2 da Imagem 4; (d) EDS do ponto 3 da Imagem 4; (e) EDS do ponto 4 da Imagem 4.





Fonte: Autoria Própria, 2026.

Regiões observadas pela Figura 15-2, apresentam microestrutura relativamente mais aberta, com menor densidade de agulhas e presença de micro vazios, podendo ser interpretada como zona de transição interfacial (ITZ) altamente refinada, de acordo com Xiong *et al.* (2022), portanto, observa-se que diferentemente do concreto convencional, no UHPC essa ITZ é menos porosa e mais homogênea devido à intensa reação pozolânica e ao empacotamento granular otimizado. Em alguns pontos, identifica-se um emaranhado de produtos aciculares longos, com estrutura semelhante a um “feltro”, típico de C-S-H fibroso e possíveis remanescentes de etringita. Segundo Bahmani e Mostofinejad (2022), essas morfologias promovem maior estabilidade próxima ao pico de tensão.

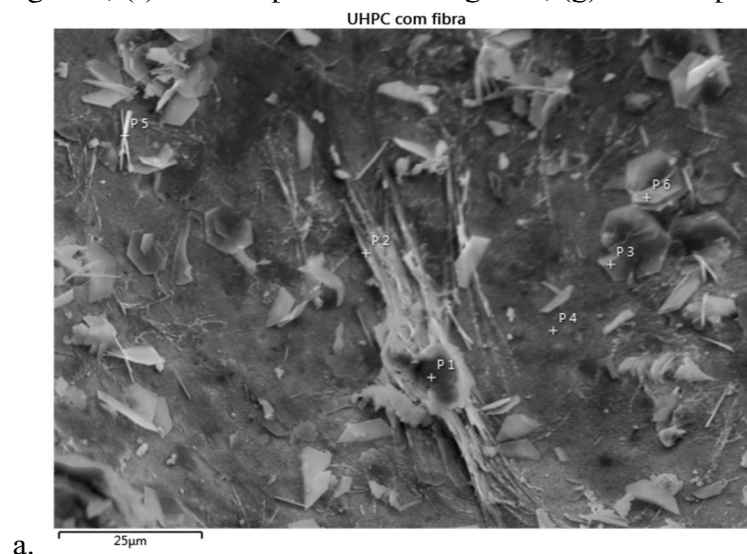
Os pontos demarcados na Figura 16-2, correspondem a partículas anidras ou parcialmente reagidas, identificadas pela morfologia angular e pelo contraste distinto em relação à matriz circundante. Chen *et al.* (2019) mostram que esses fragmentos podem representar um grão de cimento não completamente hidratado ou um resíduo silicoso proveniente de sílica ativa ou filler fino. Tais partículas atuam como núcleos rígidos dentro da matriz, contribuindo para o aumento da resistência máxima. Entretanto, quando mal ancoradas, podem comportar-se como potenciais concentradores de tensão, favorecendo o surgimento localizado de microfissuras sob carregamento elevado.

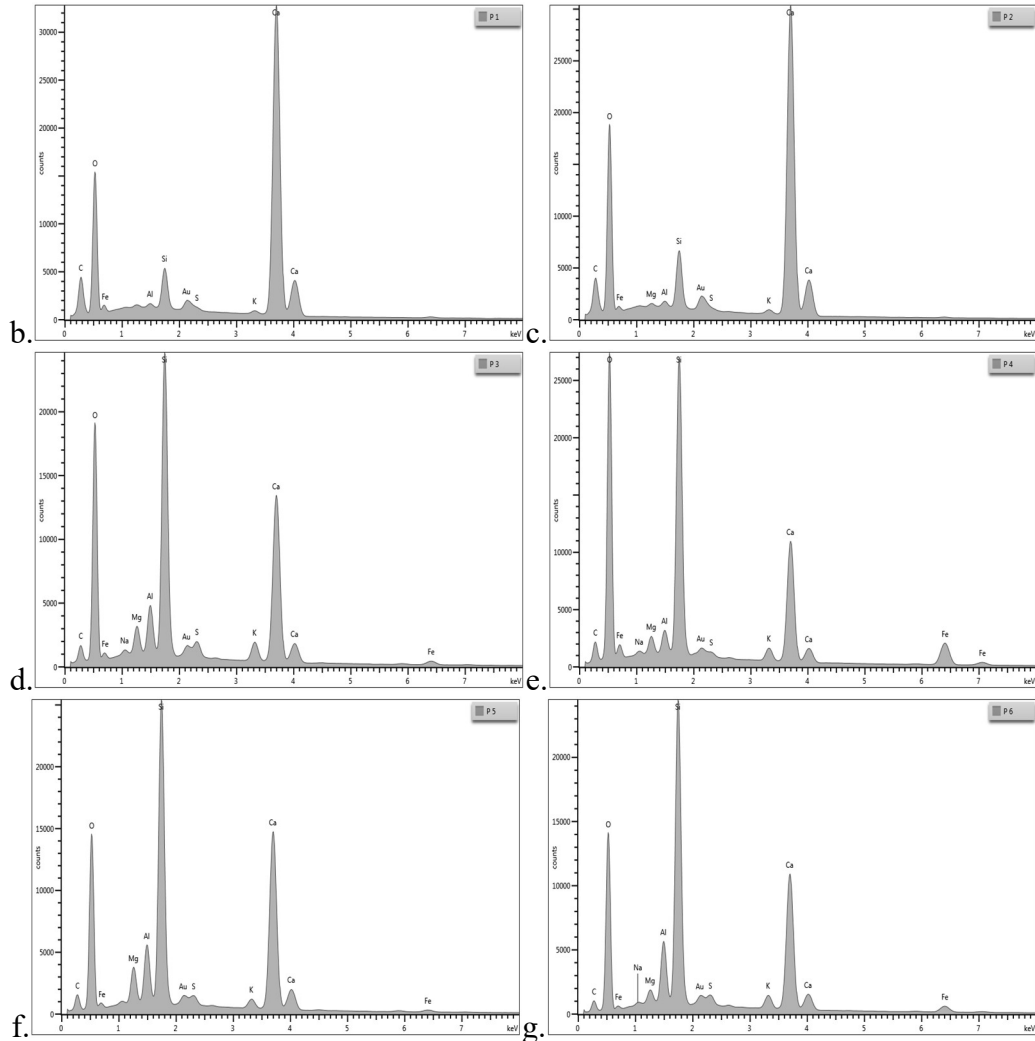
A interpretação dos espectros EDS reforça essas observações, em que combinações de Ca, Si, O e C indicam C-S-H como fase dominante, enquanto variações na razão Ca/Si permitem distinguir entre C-S-H mais cálcico, C-S-H silicoso (reação pozolânica intensa) e a

presença de C-A-S-H, fase particularmente estável em UHPC densificado. Assim, a microestrutura observada explica de forma consistente o elevado desempenho mecânico e a durabilidade aprimorada desses materiais. De forma geral, essa configuração reduz a porosidade, dificulta a propagação de microfissuras e garante elevada resistência à compressão, alto módulo elástico e maior durabilidade.

Ao observar em MEV pela Figura 17-2, sob a perspectiva de Bahmani e Mostofinejad (2022), é notável uma morfologia tipicamente dominada por produtos de hidratação finamente distribuídos, com estruturas aciculares e fibrosas interligadas, associadas principalmente ao gel C-S-H. Esse gel constitui a fase predominante na matriz cimentícia e é responsável pela densificação microestrutural e pela coesão interna do compósito. A presença de regiões extremamente densas, com baixa ocorrência de vazios, explica o elevado módulo elástico e o comportamento quase linear no regime inicial de carregamento, característico de materiais com alta rigidez. Mesmo em sistemas altamente densificados, é possível identificar heterogeneidades locais relacionadas a partículas anidras ou parcialmente reagidas. Esses remanescentes podem atuar como elementos rígidos dispersos, contribuindo para o aumento da resistência máxima, mas também representando potenciais pontos de concentração de tensões dependendo do grau de aderência com a matriz hidratada. Além disso, de acordo com Xiong *et al.* (2022), as zonas interfaciais mais refinadas que em concretos convencionais ainda podem existir, desempenhando papel importante no surgimento de microdanos e no início da resposta não linear antes do pico de tensão.

Figura 17-2 – (a) Imagem 5 de MEV do UHPC-TS com fibra metálica; (b) EDS do ponto 1 da Imagem 5; (c) EDS do ponto 2 da Imagem 5; (d) EDS do ponto 3 da Imagem 5; (e) EDS do ponto 4 da Imagem 5; (f) EDS do ponto 5 da Imagem 5; (g) EDS do ponto 6 da Imagem 5.





Fonte: Autoria Própria, 2026.

Com base em Chen *et al.* (2019), os espectros EDS reforçam a predominância de fases hidratadas ricas em cálcio e silício, cuja assinatura típica é composta por Ca, Si, O e C, correspondendo ao C-S-H como produto dominante. Variações na relação Ca/Si permitem distinguir entre géis mais cálcicos, associados a maior rigidez e possível fragilidade local, e géis mais silicosos, resultantes de reação pozolânica intensa, que tendem a apresentar maior estabilidade microestrutural e durabilidade aprimorada. Por outro lado, em conformidade com Chu *et al.* (2022), a presença de alumínio incorporado pode indicar a formação de C-A-S-H, fase ainda mais estável e comum em matrizes densificadas de UHPC.

É importante observar também que, assim como no estado fresco, há contribuição significativa com o uso em geral dos superplastificantes de alto desempenho. Nesse estudo, e em conformidade ao que prediz Das *et al.* (2026), o superplastificante usado, ADVA® 458 UHPC, possibilitou a dispersão eficiente das partículas cimentícias e permitiu a utilização de uma relação água/ligante extremamente baixa sem comprometer a trabalhabilidade da mistura. Essa

condição contribuiu para a formação de uma matriz mais homogênea e menos porosa, ao mesmo tempo que favoreceu a formação adicional de produtos de hidratação. Também, limitou a formação de canais capilares durante a evaporação da água, resultando na estrutura densa observada na MEV e confirmada pelo teste de capilaridade e pelo teste de MAV (Massa específica, absorção de água e índice de vazios), mostrado pelas Tabelas 9-2 e 10-2.

Tabela 9-2 – Resultados de MAV (Massa específica, absorção de água e índice de vazios) pela NBR 9778:2005.

Amostra	CP	m_s (g)	m_{sat} (g)	m_i (g)	A (%)	I_v (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{sat} (g/cm ³)	ρ_r (g/cm ³)
SEM FIBRA	1	447,7	450,9	262,4	0,7	1,7	2,38	2,39	2,42
	2	451,8	455,2	264,47	0,8	1,8	2,37	2,39	2,41
	3	460,4	464,4	268,19	0,9	2,0	2,35	2,37	2,40
Média					0,8	1,8	2,37	2,38	2,41
Desvio Padrão					0,1	0,2	0,02	0,01	0,01
Amostra	CP	m_s (g)	m_{sat} (g)	m_i (g)	A (%)	I_v (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{sat} (g/cm ³)	ρ_r (g/cm ³)
COM FIBRA	1F	434,8	438,2	255,29	0,8	1,9	2,38	2,40	2,42
	2F	448,6	451,7	264,94	0,7	1,7	2,40	2,42	2,44
	3F	445,7	449,9	263,36	0,9	2,3	2,39	2,41	2,44
Média					0,8	2,0	2,39	2,41	2,43
Desvio Padrão					0,1	0,3	0,01	0,01	0,01

Em que:

m_{sat} - Massa saturada após imersão e fervura;

m_i - Massa saturada imersa após fervura;

A - Absorção de água por imersão;

I_v - Índice de vazios;

ρ_s - Massa específica da amostra seca;

ρ_{sat} - Massa específica da amostra saturada;

ρ_r - Massa específica real.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Tabela 10-2 – Absorção de água por capilaridade pela NBR 9779:2012.

Amostra	CP	Diâmetro (mm)	Diâmetro (cm)	Área (cm ²)	Massa seca (g)	Variação da massa (g)					Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)				
						3h	6h	24h	48h	72h	3h	6h	24h	48h	72h
SEM FIBRA	1	50,0	5,0	19,6	452,1	452,5	452,6	453,0	453,1	453,4	0,02	0,03	0,05	0,05	0,07
	2	50,0	5,0	19,6	454,8	455,1	455,2	455,6	456,0	456,3	0,02	0,02	0,04	0,06	0,08
Média											0,02	0,03	0,05	0,06	0,08
Desvio Padrão											0,0000	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071
Amostra	CP	Diâmetro (mm)	Diâmetro (cm)	Área (cm ²)	Massa seca (g)	Variação da massa (g)					Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)				
COM FIBRA	1F	50,0	5,0	19,6	443,9	444,5	444,6	445,0	445,2	445,5	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08
	2F	50,0	5,0	19,6	448,2	448,7	448,9	449,2	449,8	450,0	0,03	0,04	0,05	0,08	0,09
Média											0,03	0,04	0,06	0,08	0,09
Desvio Padrão											0,0000	0,0000	0,0071	0,0071	0,0071

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Correlacionando com Mesquita (2024), a baixa capilaridade, absorção de água e índice de vazios observada do UHPC-TS também está diretamente relacionada, à otimização do empacotamento granulométrico dos constituintes da matriz cimentícia, que, como demonstrado neste estudo, combinou partículas de diferentes tamanhos, permitindo que partículas menores preencham os vazios entre partículas maiores, reduzindo a formação e a conectividade dos poros capilares e promovendo uma matriz com elevada compacidade. Como resultado, observa-se uma microestrutura mais refinada e com menor conectividade capilar, fator que explica a baixa absorção por capilaridade e o elevado desempenho de durabilidade característicos do UHPC. Parte superior do formulário Outro fator observado pelo ensaio de capilaridade dado pela Tabela 10-2 foi que a presença de fibras não aumentou significativamente a capilaridade, logo, a fibra não criou uma rede preferencial de transporte, sugerindo que a matriz está suficientemente densa para neutralizar o efeito da ITZ fibra-matriz. Isso está alinhado com Akça e Ipek (2022), indicando que, em matrizes densificadas, com baixo a/l ou presenças de filler e finos, o impacto da fibra na absorção global é marginal, também reforçando a similaridade dos resultados da resistência a compressão, tanto com fibra, quanto sem fibra.

3.3.1.1 Análise Estatística por *t* de student

Os dados da Tabela 11-2 comparam dois grupos, designados em “sem fibra” e “com fibra” e em duas idades, de sete dias e vinte e oito dias.

Tabela 11-2 - Resumo Estatístico Descritivo para resultados de resistência a compressão.

Idade	Comparação	Média (MPa)	Desvio Padrão	t	Grau de Liberdade	p-valor	Significância ($\alpha=0,05$)
7 dias	Sem fibra	104,05	3,05	-1,53	5,9	0,177	Não significativa.
7 dias	Com fibra	108,7	6,06				
28 dias	Sem fibra	128,79	6,92	2,44	5,1	0,058	Não significativa.
28 dias	Com fibra	120,74	2,59				

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Aos 7 dias, a adição de fibras não resultou em diferença estatisticamente significativa na resistência à compressão. Já aos 28 dias, observa-se diferença próxima do limiar de significância, indicando possível influência das fibras no comportamento mecânico, porém, estatisticamente, por esses dados, o UHPC-TS do grupo “sem fibra” não apresentou desempenho com diferença significativa ao grupo “com fibra”.

Tabela 12-2 – Valores de incremento (%) na evolução das idades dos resultados de resistência a compressão do UHPC-TS.

Grupo de UHPC -AM	Média 7 Dias (MPa)	Média 28 Dias (MPa)	Incremento (%)
SEM FIBRA	104,05	128,79	23,80%
COM FIBRA	108,7	120,74	11,10%

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Analisando por Intra-Grupo, pela Tabela 12-2, na evolução de sete para vinte e oito dias, é observado que o grupo “sem fibra”, apresentou $\alpha = 0,0001$, mostrando um ganho de resistência altamente significativo. Já o grupo “com fibra”, apresentou $\alpha = 0,0035$, também com ganho de resistência significativo, porém com taxa de crescimento menor que o grupo sem fibra. O Coeficiente de Variação (CV) abaixo de 6% em todos os grupos indica excelente precisão experimental e homogeneidade na moldagem dos corpos de prova (CPs), seguindo padrões rigorosos de controle de qualidade laboratorial. Nota-se que o grupo “com fibra” aos 28 dias foi o mais consistente (CV = 2,14%). Conforme verificado, a resistência do grupo “sem fibra”, de 128,79Mpa, superou o grupo com fibra (120,74MPa) aos 28 dias. De acordo com Leite e Castro (2020), isso pode ocorrer devido ao empacotamento da matriz, pois, em concretos de ultra-alto desempenho (UHPC), a fibra, se não estiver perfeitamente dispersa, pode criar pequenos vazios na interface fibra-matriz que, sob compressão pura, facilitam a ruptura precocemente em comparação a uma matriz pura e densa e por causa da trabalhabilidade, em que a adição de fibras reduz a fluidez, dificultando a moldagem e o adensamento das amostras.

Para os valores de capilaridade a Tabela 10-2, mostra que, em “3h”, houve diferença estatística, porém isso ocorre, porque os valores são constantes dentro dos grupos (baixa variabilidade). Em 6h e 24h, não há diferença estatisticamente significativa entre com e sem fibra, ou seja, a fibra não alterou de forma relevante o coeficiente de absorção capilar global. Já para os valores de absorção por imersão e índice de vazios, a Tabela 9-2 evidencia que a incorporação de fibras não alterou estatisticamente a porosidade total, não alterou a absorção por imersão e manteve praticamente a massa específica entre as amostras, indicando que a adição de fibra não modificou significativamente a estrutura porosa global.

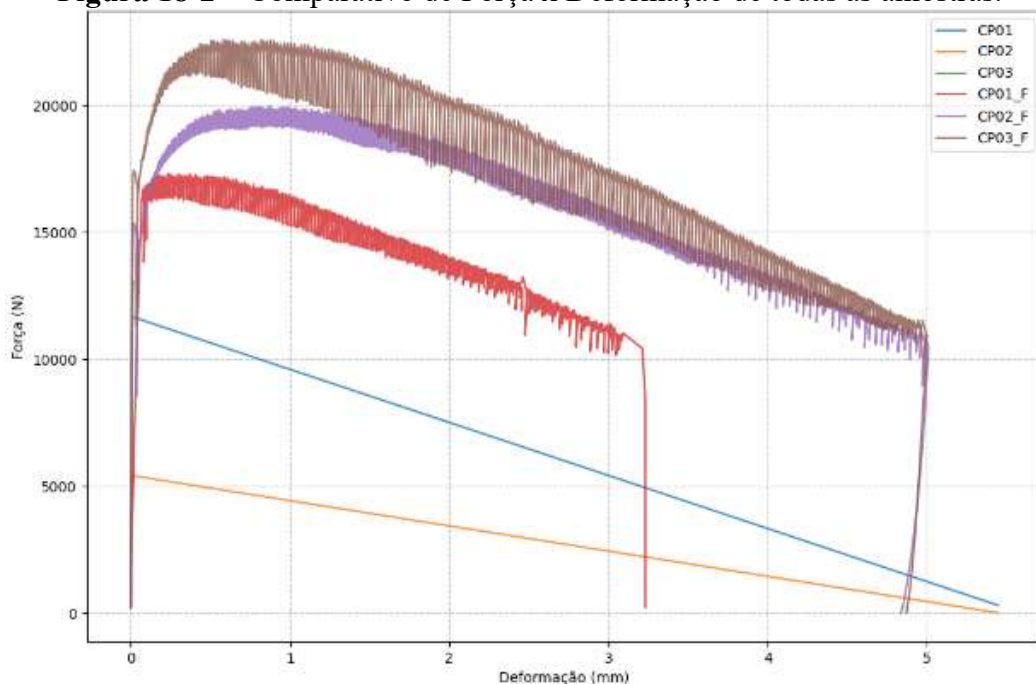
3.3.2 Energia de Fratura e Tenacidade

De acordo com Quinino (2015), a tenacidade de compósitos de concretos especiais como o UHPC, é a propriedade que define a capacidade de absorção de energia aplicada por uma carga quando o elemento está submetido a deformações estáticas ou dinâmicas, geralmente realizado no ensaio de flexão. A propriedade que melhor beneficia-se quando acrescentadas fibras na matriz é a tenacidade, visto que comparando com concretos sem fibras, possui ruptura

caracterizada após a fissuração, mantendo a integridade e coesão do material (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Para Arif (2014), existem alguns fatores que influenciam na tenacidade do UHPC reforçado com fibras, como tamanho e geometria do CP avaliado, pois quanto maiores são as dimensões da seção analisada, maior tende a ser a energia absorvida; resistência das fibras utilizadas, quando utilizadas fibras com alto módulo de elasticidade, tende-se a diminuir a fragilidade do elemento, tornando-o mais dúctil e assim absorvendo mais energia; orientação das fibras, em que se tem como preferência a redução do espaçamento entre as mesmas, aumentando a resistência a tração e a absorção de energia; entre outros.

Após a realização do ensaio de determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos, de acordo com a EN 14651:2005, que mede a resistência à tração na flexão com limite de proporcionalidade (LOP), residual, em três corpos de prova prismáticos de 100x100x400mm com entalhe de 10mm e, ao observar o gráfico gerado e apresentado pela Figura 18-2 e os resultados apresentados pela Tabela 13-2, pode-se observar que as amostras reforçadas com fibra apresentaram, em média, uma tenacidade significativamente superior, destacando a amostra CP03_F, que atingiu a maior absorção de energia, de 89,15 J. Também, verifica-se que a amostra CP03 teve uma tenacidade quase nula, de 0,124 J, uma hipótese seria porque o ensaio parou quase instantaneamente após o pico de carga - ruptura frágil a 0,016 mm-, enquanto as outras foram levadas até deformações maiores.

Figura 18-2 – Comparativo de Força x Deformação de todas as amostras.

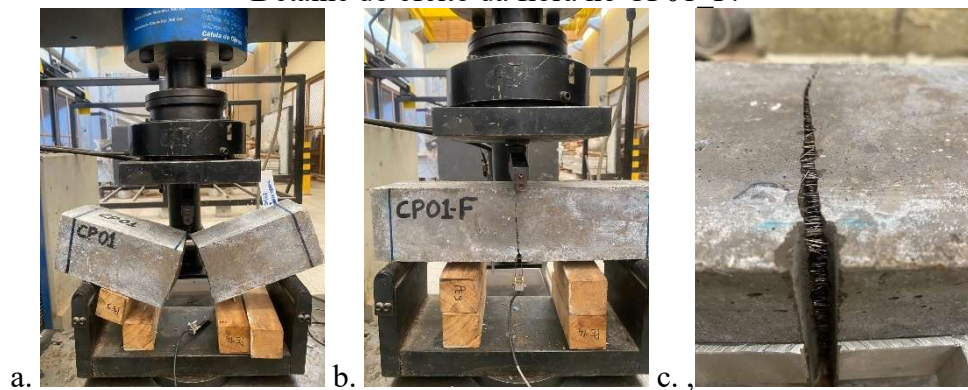


Fonte: Autoria Própria, 2026.

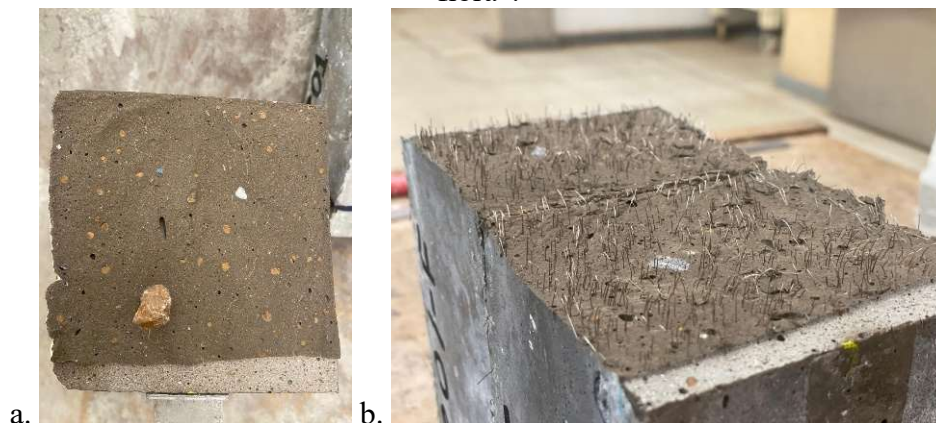
Tabela 13-2 – Valores de tenacidade e deformação por corpo de prova.

Amostra	Grupo de UHPC-TS	Força Máxima (KN)	Deformação Final (mm)	Tenacidade (J)
CP01	Sem Fibra	11,66	5,446	32,57
CP02	Sem Fibra	5,4	5,446	14,719
CP03	Sem Fibra	13,05	0,016	0,124
CP01_F	Com Fibra	17,31	3,232	46,412
CP02_F	Com Fibra	19,98	5,009	80,66
CP03_F	Com Fibra	22,59	4,999	89,15

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Figura 19-2 – (a) Ruptura do CP01 “sem fibra”; (b) Ruptura do CP01_F “com fibra”; (c) Detalhe do efeito da fibra no CP01_F.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Figura 20-2 – (a) Face rompida do CP01 “sem fibra”; (b) Face rompida do CP01_F “com fibra”.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

O grupo de UHPC-TS designado “Com Fibra” também apresentou forças de pico consistentemente mais elevadas, entre 17,3 KN e 22,6 KN, em comparação com o grupo sem fibra, registrando forças de pico de 5,4 KN a 13 KN. Verificou-se que a presença das fibras não só aumentou a carga suportada, mas garantiu que o material continuasse a absorver energia mesmo após a fissuração inicial, o que é evidenciado pelos altos valores de tenacidade. Isso vai de

acordo com Khan *et al* (2017) que prediz que a inclusão de fibras impede a propagação de trincas existentes e/ou iniciadas, melhorando a plasticidade na ponta da trinca, o que aumenta a tenacidade à fratura do compósito.

A norma CEB-FIP Model Code (2010) define a energia de fratura (G_f) como a quantidade de energia necessária para propagar uma fissura de tração em uma área unitária. É um parâmetro fundamental para descrever o comportamento pós-fissuração do concreto (amolecimento ou *softening*). Embora a EN 14651 forneça a curva de carga, segundo Saraiva Filho (2019), a conversão para energia de fratura (G_f), geralmente segue os princípios da Mecânica da Fratura Linear Elástica ou Não Linear, em que a área total sob a curva de carga até a ruptura completa ou até um CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement* - abertura da boca da fissura) limite, representa o trabalho de fratura (T). Ao dividir esse trabalho (T) pela área da seção transversal resistente (a área acima do entalhe), obtém-se a energia de fratura específica. A norma garante que a dissipação de energia ocorra majoritariamente de forma planar no entalhe, o que reduz a variabilidade dos resultados em comparação com ensaios em vigas sem entalhe. A Tabela 14-2 mostra os resultados a partir do ensaio da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos, realizado neste estudo.

Tabela 14-2 – Valores de energia de fratura (G_f) e intensidade de tensão crítica (KIC).

Amostra	Grupo	Força Máx (kN)	fct,L (MPa)	G_f (J/m ²)	KIC (MPa.m ⁰⁵)
CP01	Sem Fibra	11,66	6,48	3.618,84	0,933
CP02	Sem Fibra	5,4	3	1.635,41	0,432
CP03	Sem Fibra	13,05	7,25	13,83	1,043
Média	Sem Fibra	10,04	5,58	1.756,03	0,803
CP01_F	Com Fibra	17,31	9,62	5.156,86	1,384
CP02_F	Com Fibra	19,98	11,1	8.962,26	1,598
CP03_F	Com Fibra	22,59	12,55	9.905,57	1,806
Média	Com Fibra	19,96	11,09	8.008,23	1,596

Fonte: Autoria Própria, 2026.

De acordo com Gurusideswar *et al.* (2020), a tração por compressão diametral também é uma técnica fundamental para caracterizar a tenacidade e a capacidade de carga pós-fissuração para concretos reforçados com fibra e consiste na aplicação de uma carga de compressão linear ao longo de duas geratrizes opostas de um corpo de prova cilíndrico. Essa configuração induz tensões de tração transversais uniformes no plano diametral, provocando a ruptura do material de dentro para fora. No caso do UHPC reforçado com fibras metálicas, o ensaio não apenas mede o pico de resistência, mas monitora o deslocamento e a deformação para avaliar a

ductilidade do compósito. A Tabela 15-2, mostra os resultados obtidos no ensaio de resistência a tração por compressão diametral no UHPC-TS com e sem fibras.

Tabela 15-2– Resultados de resistência a tração por compressão diametral no UHPC-TS com e sem fibras.

Amostra	Força Máxima (kgf)	Tensão Máxima (MPa)	Diâmetro/ Altura (mm)
CP 1 - Com Fibra	34.339	11,05	100 / 194
CP 2 - Com Fibra	47.082	15,3	98 / 196
CP 3 - Com Fibra	40.069	13,22	97 / 195
CP 1 - Sem Fibra	25.650	8,05	100 / 199
CP 2 - Sem Fibra	17.420	5,6	98 / 198
CP 3 - Sem Fibra	27.434	8,67	100 / 197

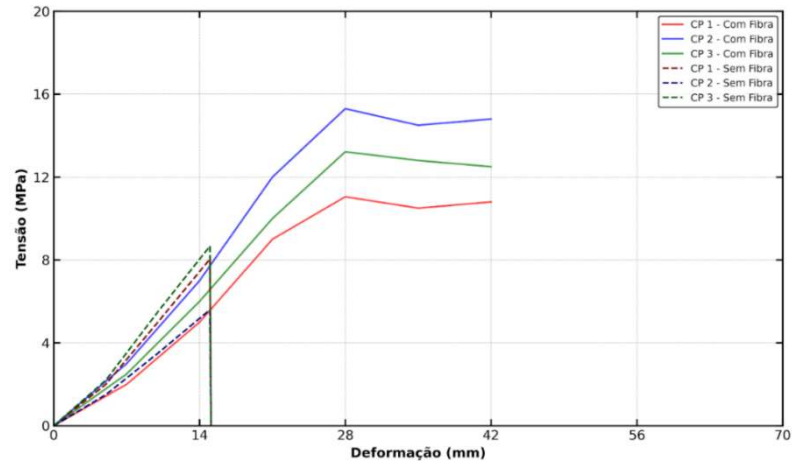
Fonte: Autoria Própria, 2026.

Tabela 16-2 – Verificação estatística de ganho dos grupos “Sem Fibra” e “Com fibra”.

Parâmetro	Sem Fibra	Com Fibra	Ganho/Diferença
Média Tensão Máxima	7,44 MPa	13,19 MPa	77,30%
Força Máxima Média	23.500 kgf	40.500 kgf	72,30%
Coef. de Variação	21,82%	16,12%	-26,1% (Melhor consistência)
Comportamento Pós-Pico	Frágil (Queda brusca)	Pseudo-dúctil (Residual)	Mudança de tenacidade

Fonte: Autoria Própria, 2026.

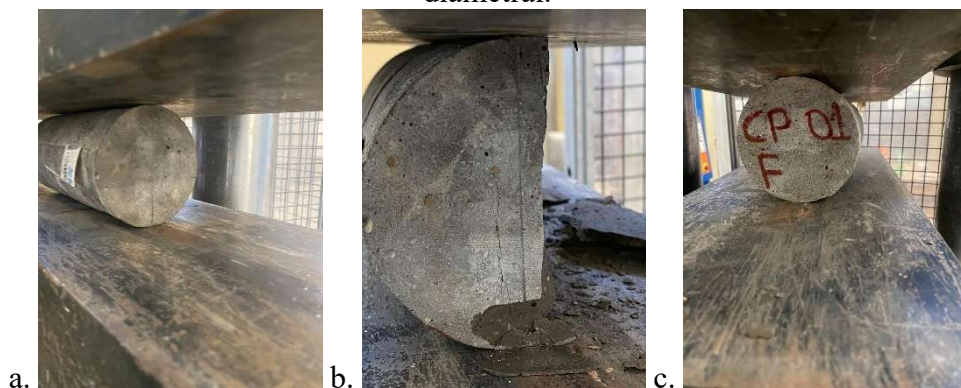
Figura 21-2 – Comparativo de Tensão x Deformação de todas as amostras no ensaio de tração por compressão diametral.

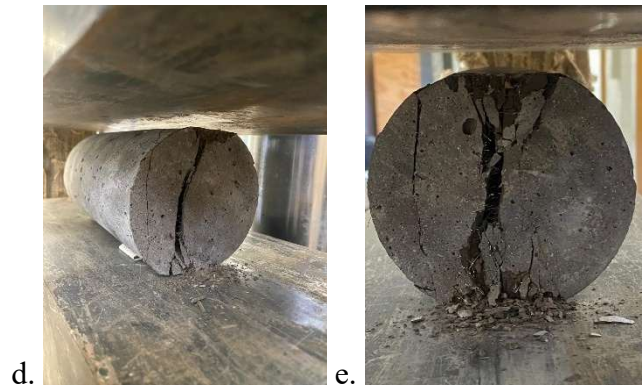


Fonte: Autoria Própria, 2026.

Os resultados evidenciam que a adição de fibras promoveu incremento substancial de aproximadamente 77% na resistência à tração na flexão, elevando a média de 7,44 MPa para 13,19 MPa. Conforme observado nos diagramas Tensão x Deformação, dados pela Figura 21-2, a série “sem fibras” apresentou uma ruptura tipicamente frágil, com perda total de capacidade de carga imediatamente após atingir o pico de tensão. Em contraste, a série “com fibras” demonstrou uma fase pós-fissuração estável, caracterizada por tensão residual significativa. Esse fenômeno é atribuído ao “efeito de ponte” exercido pelas fibras, impedindo a separação abrupta do corpo de prova e aumentando a energia de fratura do material.

Figura 22-2 – (a) CP1 “sem fibra” posicionado para ser ensaiado; (b) CP1 “sem fibra” após ruptura para a tração por compressão diametral; (c) CP1 “com fibra” posicionado para ser ensaiado. (d) CP1 “com fibra” após ruptura para a tração por compressão diametral. (e) Detalhe do efeito da fibra no CP1 “com fibra” após ruptura para a tração por compressão diametral.



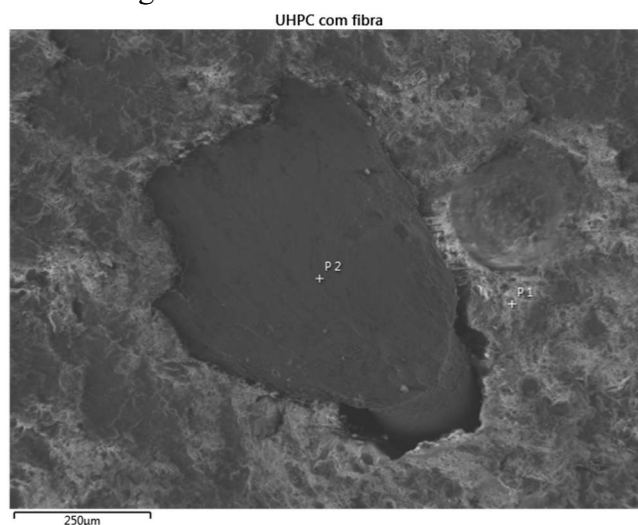


Fonte: Autorial Própria, 2026.

O aumento expressivo da energia de fratura não é apenas um subproduto da adição de fibras, mas o resultado da ativação do mecanismo de ponte de fissuras (*crack bridging*), em que as tensões de tração, que a matriz cimentícia não consegue mais suportar, após a primeira fissura, são integralmente transferidas para as fibras metálicas, evitando a propagação instável da fratura. No UHPC sem fibras, a propagação da fissura é instável e rápida, o que pode ser chamado de “falha frágil”. Isso é demonstrado pela ruptura tanto no ensaio de tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos, quanto no ensaio de tração por compressão diametral. Com a inclusão das fibras metálicas, quando a matriz cimentícia atinge a capacidade de tração e a primeira fissura surge, as fibras atravessam essa abertura, agindo como pontes que transferem as tensões entre as faces da fissura. Isso impede a abertura catastrófica da fenda e permite que o material continue suportando carga mesmo após a matriz ter falhado. A análise da tenacidade e da energia de fratura do UHPC desenvolvido revela uma transição clara de um comportamento frágil para um regime pseudodúctil.

Um ponto importante a observar é que, de acordo com An *et al* (2022), a energia de fratura é, essencialmente, a área sob a curva carga-deslocamento. O alto valor dessa energia está associado ao trabalho mecânico necessário para a delaminação e o destacamento da fibra da matriz densa criada no UHPC-TS. Na micrografia obtida por MEV, dado pela Figura 23-2, a fibra identificada como P2 desempenha o papel central nesse processo.

Figura 23-2 – Imagem 1 de MEV do UHPC-TS com fibra metálica.



Fonte: Autoria Própria, 2026.

É possível observar que a interface entre a fibra “P2” e a matriz de rejeitos de mineração é extremamente densa e não contém vazios significativos. Essa compacidade é fruto do efeito *filler* das areias de rejeito e da reação pozolânica da sílica ativa, que refinam a zona de transição interfacial (ITZ). A robustez da ITZ assegura que a dissipação da energia de fratura ocorra via *pull-out*, em vez de ruptura prematura da fibra. Para que a fibra seja extraída, é necessário vencer uma elevada força de fricção. À medida que a fissura abre, a fibra começa a deslizar, contudo a matriz densificada do UHPC, bem como a geometria angular das partículas dos agregados, neste caso, das areias de rejeito, atuam com um travamento mecânico adicional, elevando o coeficiente de atrito na interface. Este processo de escorregamento controlado consome grande quantidade de energia mecânica, que se transforma em calor e energia de deformação e resulta em um material com maior tenacidade. Esse processo de dissipação de energia é o que diferencia o UHPC-TS de concretos convencionais, permitindo que o compósito apresente uma energia de fratura significativamente superior, garantindo integridade estrutural mesmo sob grandes deslocamentos. A sinergia entre a matriz densa e a fibra metálica garante que o material suporte deformações plásticas sem perda catastrófica de integridade estrutural, elevando o nível de segurança e durabilidade do concreto de ultra-alto desempenho desenvolvido.

3.3.2.1 Análise Estatística por *t de student*

- **Com Fibra vs. Sem Fibra**

A análise estatística foi conduzida para avaliar o efeito da adição de fibras nos parâmetros mecânicos do UHPC. Para comparação entre os grupos “com fibra” e “sem fibra”, foi aplicado o teste *t de student*, cujos resultados estão apresentados na Tabela 17-2.

Tabela 17-2 – Análise de significância estatística.

Parâmetro	F-stat	α-valor	Significância ($\alpha=0.05$)
Força Máxima (Pmax)	12,54	0,024	Significativo
Tenacidade (Wf)	12,24	0,0249	Significativo
Energia de Fratura (Gf)	12,24	0,0249	Significativo
Fator KIC	12,54	0,024	Significativo

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Para todos os parâmetros, o valor de α é menor que 0,05. Isso comprova que a adição de fibras altera o material de forma estatisticamente relevante em todas as métricas de resistência e ductilidade.

- **Análise Intragrupo: Coeficiente de Variação (CV%)**

A Tabela 18-2 expõe o coeficiente de variação (CV%) medindo a dispersão dos resultados em um mesmo lote (repetibilidade).

Tabela 18-2 – Análise intragrupo por coeficiente de variação.

Grupo	CV% Pmax	CV% Wf/ Gf	CV% KIC	Diagnóstico
Com Fibra	13,22%	31,39%	13,22%	Moderado: Variação típica de compósitos.
Sem Fibra	40,59%	102,82%	40,59%	Crítico: Alta instabilidade na ruptura.

Fonte: Autoria Própria, 2026.

O grupo “com fibra”, apresentou uma variação de resistência (Pmax e KIC) de apenas 13,22%, indicando um processo de fabricação e ensaio controlado. A variação de 31,39% na tenacidade é esperada, visto que depende da distribuição aleatória das fibras na seção da trinca. O CV% de 102,82% na energia de fratura do concreto sem fibra expõe a natureza imprevisível da ruptura frágil como prediz Figueiredo (2011). Alguns CPs podem manter coesão, mas o CP03 mostra que existe uma falha total no instante do pico, gerando dados discrepantes. Podendo verificar então que a fibra não apenas aumenta os valores médios, mas também atua como elemento de estabilização do material, reduzindo a dispersão extrema observada no concreto do grupo “sem fibra”.

A análise mostra ainda que, embora o grupo “com fibra” apresente dispersão moderada (aproximadamente 31% em Gf), mostra-se superior nesses quesitos que o grupo “sem fibra”, que apresentou um CV de 102,8% na energia de fratura. Isto vai de acordo com Khan *et al* (2017), que observa a ação das fibras como pontes de transferência de carga, impedindo que a fissura se propague de forma instável, logo após o pico.

A análise nos resultados de tração por compressão diametral também, confirmou a significância estatística do reforço metálico na matriz de UHPC ($F=13,87$; $p < 0,05$). O α -valor de

0,0204 demonstra que o incremento de resistência observado não é fruto de variações aleatórias nas amostras, mas sim uma consequência direta da adição das fibras. Este resultado, corrobora com Mazer *et al.* (2021) sobre o controle de qualidade e desempenho superior de matrizes reforçadas. A Tabela 19-2, mostra os resultados detalhados da análise estatística.

Tabela 19-2 – Análise *t de student* para os resultados do ensaio de tração por compressão diametral.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F-calculado	α -valor
Entre Grupos	49,594	1	49,594	13,9	0,02
Dentro dos Grupos	14,303	4	3,576	-	-
Total	63,897	5	-	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2026.

3.3.3 Módulo de elasticidade

Segundo Chu *et al.* (2022), o módulo de elasticidade em Concretos de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) representa um parâmetro fundamental para o entendimento da estabilidade dimensional e rigidez estrutural, sendo governado por princípios que o distinguem significativamente dos concretos convencionais. Enquanto em concretos comuns a porosidade da pasta cimentícia e a zona de transição interfacial (ZTI) fragilizada limitam a rigidez, no UHPC, a eliminação de agregados graúdos e a otimização do empacotamento granular resultam em uma matriz extremamente densa. Segundo Xue *et al.* (2020), o módulo de elasticidade é uma propriedade intrinsecamente dependente da fração volumétrica dos agregados e da rigidez individual de seus componentes, uma vez que a fase sólida atua como o principal agente de restrição às deformações elásticas.

Chu *et al.* (2022) observam que, mesmo para concretos com resistências semelhantes, variações na microestrutura levam a diferenças significativas no módulo elástico, evidenciando que este parâmetro é mais sensível à rigidez da matriz do que à resistência última. Também enfatiza que, embora o UHPC possua resistências à compressão altíssimas, frequentemente acima de 120-150 MPa, seu módulo de elasticidade costuma ser desproporcionalmente baixo em relação a essa força, o que pode limitar a aplicação em estruturas que exigem alta rigidez para evitar deformações excessivas. No estudo de Xue *et al.* (2020), verifica-se que o módulo de elasticidade do UHPC tipicamente situa-se na faixa de 40 a 55 GPa, refletindo não apenas a alta resistência à compressão, mas sobretudo a continuidade física entre a pasta de cimento hidratada e os finos minerais. Além disso, a influência da relação água/ligante e o uso de adições

pozolânicas de alta reatividade promovem refinamento de poros que eleva o módulo de compressibilidade da matriz. Após ensaios apenas na matriz sem a utilização de fibras metálicas, este estudo obteve os resultados expostos na Tabela 20-2.

Tabela 20-2 – Resultados dos ensaios de Módulo de elasticidade em GPa com análise estatística descritiva.

Amostra	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Média (Gpa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (CV)
CP1	41,32	41,93	0,82	1,96%
CP2	41,63			
CP3	42,85			

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Tabela 21-2 – Comparativo entre grupos e dentro dos grupos.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F-calculado	α-valor
Entre Grupos	1,804	1	1,804	5,255	0,0836
Dentro dos Grupos	1,373	4	0,343	-	-
Total	3,177	5	-	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Tabela 22-2 – Comparativo por t de student entre grupos e dentro dos grupos, para resultados com adição de alumina.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F-calculado	α-valor
Entre Grupos	51,96	2	25,98	89,03	0,0000346
Dentro dos Grupos	1,75	6	0,29	-	-
Total	53,71	8	-	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Os resultados da Tabela 20-2, apresentam a média de 41,93 GPa, com valores individuais de 41,32 GPa, 41,63 GPa e 42,85 GPa. Para melhor observar, foi realizado uma análise estatística descritiva, mostrando excelente repetibilidade experimental, devido ao baixo coeficiente de variação (CV) e baixo desvio padrão. Esses valores se comparados ao que é dito por Chu *et al.* (2022), estão na média considerada aceitável para UHPC, quando se relaciona aos resultados de UHPC demonstrados, que estão perto de 43,03, apesar de, com as adições de alumina, o estudo de Chu *et al.* (2022) demonstrar módulos de elasticidade próximos de 47,7GPa. Isso é confirmado pela análise por t de student, realizados tanto para o comparativo

com a média de 43,03, evidenciado pela Tabela 21-2, quanto para os resultados com a adição de alumina, mostrados pela Tabela 22-2. Os resultados demonstram diferença estatística, quando α -valor é menor que 0,05.

De acordo com a investigação de Xue *et al.* (2020), o módulo de elasticidade do UHPC é uma propriedade governada primordialmente pela rigidez intrínseca dos componentes sólidos e pela fração volumétrica dos agregados, apresentando valores que tipicamente oscilam entre 42 GPa e 52 GPa para matrizes densas. Ao comparar a média deste estudo, de 41.93 MPa, com os dados reportados por Xue *et al.* (2020), observa-se que este resultado se apresenta no limiar inferior dessa faixa de referência, indicando que a rigidez da matriz desenvolvida ainda assim, é consistente com as previsões teóricas do estudo para concretos com baixo volume de vazios. Isso é evidenciado pelo comparativo apresentado na Tabela 23-2.

Tabela 23-2 – Comparativo por t de student entre literatura e resultados desta pesquisa.

Comparação	Média (GPa)	Desvio Padrão	t	Grau de Liberdade	p-valor	Significância ($\alpha=0,05$)
Módulo experimental	41,93	0,53	-2,3	8	0,053	Não significativa
Limiar inferior (Xue et al., 2020)	42,65	0,47				

Fonte: Autoria Própria, 2026.

3.4 Impacto ambiental

Para verificação ambiental deste estudo, foi realizado o cálculo da quantidade de kg de CO² equivalente para cada metro cúbico produzido, por ser esse um parâmetro de sustentabilidade. A partir das Declarações Ambientais de Produto (Environmental Product Declaration) – EPD, de cada material, em anexo a este estudo, pode-se extrair os indicadores de Potencial de aquecimento global (GWP). Foi utilizado somente o estágio do produto A1-A3, que corresponde à produção e processamento, para que o estudo pudesse abranger apenas os materiais, pois os demais fatores implicam em distâncias, veículos de carregamento e localização da fabricação e da utilização. Essas EPD's encontram-se em anexo a este estudo. Os valores de GWP adotados estão na **Tabela 24-2**.

Tabela 24-2 – Valores de GWP adotados, extraídos da EPD de cada material.

Materiais	EPD GWP-GHG [kg CO ₂ eq.] ²
cimento	0,478
areia	0,0127

areia 1	0,001164
areia 2	0,001164
ultrafino	0,001164
sílica	0,0232
areia de quartzo	0,00188
água	0
aditivo	1,5

Fonte: Aatoria Própria, 2026.

Para comparativo do estudo, foi utilizado dados coletados de Schmidt *et al.* (2004, 2012), Fehling *et al.* (2008) e Talebinejad *et al.* (2004), utilizados por Abbas *et al.* (2016), conforme Tabela 25-2.

Tabela 25-2 – Valores de consumo de misturas de UHPC para comparativo.

UHPC consti- tuintes	Faixa (% em peso)	
	cimento	27
areia	35	45
sílica	6	12
areia de quartzo	7	14
água	4	10
aditivo	0,5	3

Fonte: Adaptado de Abbas *et al.* (2016).

Foi realizado o cálculo de consumo de kg CO₂-eq / m³ dessa faixa, utilizando uma base de consumo de água de 180L, como mostra as Tabelas 26-2 e 27-2, e o cálculo do traço ideal desse estudo dado pela Tabela 28-2, com o mesmo consumo de água.

Tabela 26-2 - Limite inferior de consumo de kg de CO₂-eq / m³ de acordo com a faixa inferior da Tabela 23-2.

Materiais	EPD GWP-GHG [kg CO ₂ eq.] ²	Traço	Com o consumo de água a 180L	CONSUMO kg CO ₂ -eq / m ³
cimento	0,478	1,000	720	344,2
areia	0,0127	0,875	630	8,0
sílica	0,0232	0,150	108	2,5
areia de quartzo	0,00188	0,175	126	0,2
água	0	0,250	180	0,0
aditivo	1,5	0,075	54	81,0
Total kg CO₂-eq / m³				435,9

Fonte: Aatoria Própria, 2026.

Tabela 27-2 - Limite superior de consumo de kg de CO₂-eq / m³ de acordo com a faixa inferior da Tabela 23-2.

Materiais	EPD GWP-GHG [kg CO₂eq.]²	Traço	Com o consumo de água a 180L	CONSUMO kg CO₂-eq / m³
cimento	0,478	1,000	1215	580,8
areia	0,0127	1,667	2026	25,7
sílica	0,0232	0,444	540	12,5
areia de quartzo	0,00188	0,519	630	1,2
água	0	0,148	180	0,0
aditivo	1,5	0,019	23	33,8
Total kg CO₂-eq / m³				653,9

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Tabela 28-2 - Consumo de kg CO₂-eq / m³ do traço ideal do UHPC-TS deste estudo.

Materiais	EPD GWP-GHG [kg CO₂eq.]²	Traço	Com o consumo de água a 180L	CONSUMO kg CO₂-eq / m³
cimento	0,478	1,000	880	420,6
areia 1	0,001164	0,464	408	0,5
sílica	0,0232	0,491	432	10,0
areia 2	0,001164	0,350	308	0,4
ultrafino	0,001164	0,220	194	0,2
água	0	0,205	180	0,0
aditivo	1,5	0,050	44	66,0
Total kg CO₂-eq / m³				497,7

Fonte: Autoria Própria, 2026.

O resultado de 497,7kg CO₂-eq / m³, mostra que o cimento e o aditivo são os maiores contribuintes para tal consumo. Com esses dados verifica-se que o UHPC deste estudo encaixa-se na faixa normal de sustentabilidade comparado aos UHPCs convencionais, permanecendo próximo ao limite inferior de consumos.

O consumo elevado de cimento Portland quando comparado ao concreto convencional é um aspecto frequentemente questionado na utilização do UHPC (DANESHVAR *et al.*, 2022). Entretanto, Wu *et al.* (2025), ao analisar o volume total de concreto empregado para cada classe de resistência, observa que o consumo de cimento torna-se praticamente equivalente ao concreto convencional.

Tabela 29-2 – Índice de ligantes e índice de cimento do UHPC-TS deste estudo.

Consumo de ligantes por m³(Kg)	Consumo de cimento por m³(Kg)	Resistência a compressão média aos 28 dias (Mpa)	Índice de Ligantes (Kg/m³)	Índice de Cimento (Kg/m³)
1312,0	880,0	128,8	10,2	6,8

Fonte: Autoria Própria, 2026.

Nessa perspectiva, a Tabela 29-2 mostra o índice de ligantes e o índice de cimento do UHPC-TS desenvolvido neste estudo. O índice de cimento mostra-se inferior aos valores típicos de concretos convencionais, que variam entre 8 e 12 kg/MPa, segundo Daneshvar *et al.* (2022). O índice de ligantes obtido, embora semelhante ou até superior ao de concretos convencionais, ao comparado com o que relata Daneshvar *et al.* (2022), evidencia a elevada incorporação da sílica ativa, com consumo de kg CO₂-eq / m³ consideravelmente inferior ao do cimento, como mostrado nas Tabela 29-2. Dessa forma, o resultado indica adequada eficiência do sistema ligante, na qual o aumento do teor de ligantes não se traduz em maior impacto ambiental ou elevação da pegada de carbono e delibera melhoria significativa das propriedades mecânicas e da microestrutura do compósito como mostra este estudo.

Wu *et al.* (2025), pontua que a durabilidade também é fator determinante na avaliação da viabilidade do UHPC, uma vez que o aumento da vida útil das estruturas contribui para a redução da necessidade de manutenções e intervenções ao longo do tempo, especialmente em obras de infraestrutura. Sob a perspectiva do desempenho ao longo da vida útil, as emissões totais de CO₂ podem ser examinadas por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA). Nesse contexto, Dong (2018) analisou as emissões de CO₂ de duas pontes construídas com diferentes classes de concreto ao longo de sua vida útil. As emissões totais de CO₂ têm origem em volumes iniciais semelhantes para ambos os tipos de concreto; entretanto, ao longo da vida útil da estrutura, o concreto convencional passa a apresentar emissões a cerca de 48% superiores, em razão da maior demanda por reparos e intervenções de manutenção. Considerando que estruturas em UHPC podem alcançar uma vida útil média de aproximadamente 150 anos, seus custos e impactos ambientais tendem a ser diluídos ao longo do tempo.

Nessa perspectiva, o custo anual equivalente de uma ponte executada em UHPC torna-se inferior ao de uma estrutura em concreto convencional. Assim, decisões relacionadas à adoção do UHPC em obras de infraestrutura podem ser fundamentadas na vantagem de um menor custo no longo prazo (LI *et al.*, 2022). Contudo, no caso de edificações, a análise da durabilidade do UHPC deve ser feita com cautela, uma vez que a vida útil dessas construções é frequentemente condicionada por fatores sociais, como a funcionalidade e a obsolescência de uso, e não exclusivamente pela durabilidade estrutural, sendo o tema de durabilidade e ciclo de vida, uma relevância e lacuna para estudos posteriores a esse.

As areias, mesmo em somatório, contribuem muito pouco na fase A1–A3 segundo as EPDs apresentadas, sendo que, o seu impacto pode estar concentrado muitas vezes em A4, referente ao transporte, conforme o próprio EPD das areias explica. Realizando uma verificação

somente em utilização de agregados, pode-se notar que, o Limite superior dado pela Tabela 27-2, o somatório do consumo de kg de CO₂-eq / m³ dos agregados é de 26,9, já no limite inferior, dado pela Tabela 26-2, esse valor é de 8,2 kg de CO₂-eq / m³ e do UHPC-TS deste estudo, mostrado pela Tabela 28-2, seria de 1,25 kg de CO₂-eq / m³ produzido. Se a observação for em cima deste comparativo, é notório a redução efetiva na emissão de kg de CO₂.

Ademais, em conformidade com a Resolução CONAMA nº 500/2020 e a Lei nº 12.651/2012 (Código Florestal), é imperativo mitigar as externalidades negativas provenientes de operações minerárias inadequadas. Entre os principais impactos observados, destacam-se a supressão de vegetação em Áreas de Preservação Permanente (APP), a descaracterização morfológica pela deposição irregular de estéreis e sedimentos, e a instabilidade de taludes marginais decorrente de dragagens em zonas de restrição. Adicionalmente, a extração em profundidades excessivas pode alterar a hidrodinâmica fluvial, acelerando o escoamento, enquanto a manutenção deficiente de equipamentos eleva o risco de contaminação por hidrocarbonetos (óleos e graxas) e obstrução de canais por resíduos sólidos. Diante desse cenário, a integração de rejeitos de mineração como agregados alternativos configura-se como uma estratégia de simbiose industrial, promovendo a transição para modelos de economia circular e reduzindo a pressão sobre os ecossistemas ripários.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica, mecânica e ambiental do desenvolvimento de um concreto de ultra-alto desempenho com incorporação de areias (UHPC-TS) provenientes de rejeitos de mineração de ferro, associado ou não ao uso de fibras metálicas. A proposta central de aliar desempenho estrutural elevado à ecoeficiência foi plenamente atendida, evidenciando que resíduos minerais, quando devidamente caracterizados e dosados, podem desempenhar papel estratégico na formulação de materiais cimentícios avançados.

A caracterização física, química e mineralógica das areias de rejeito de mineração revelou que os materiais avaliados apresentam composição predominantemente silicosa, com estabilidade térmica elevada e ausência de fases deletérias capazes de comprometer a hidratação do cimento Portland. A predominância de quartzo, confirmada por DRX, aliada aos baixos teores de perda ao fogo nas frações mais grossas, indicou comportamento compatível com agregados naturais tradicionalmente empregados em concretos de alto desempenho. A análise por fluorescência de Raios X evidenciou diferenças relevantes entre as frações granulométricas estudadas, destacando-se o aumento progressivo dos teores de óxidos de ferro e alumínio na fração

ultrafina. Tal comportamento sugere potencial de uso dessa fração como material de preenchimento ou adição mineral, desde que acompanhado de avaliações complementares quanto à reatividade e aos aspectos ambientais, especialmente no que se refere à presença de elementos-traço. A classificação dos rejeitos como resíduos Classe II B, não perigosos e inertes, conforme laudos técnicos fornecidos, reforça a segurança ambiental da aplicação em matrizes cimentícias, ampliando o potencial de inserção desses materiais em estratégias de economia circular no setor da construção civil. O emprego do modelo de empacotamento de partículas de Andreasen e Andersen Modificado mostrou-se fundamental para a obtenção de uma matriz altamente densa, com excelente distribuição granulométrica e elevado grau de compactação. O valor reduzido do parâmetro q adotado favoreceu a presença de partículas finas e ultrafinas, contribuindo significativamente para a redução da porosidade e o aprimoramento da microestrutura do UHPC desenvolvido.

O comportamento do concreto no estado fresco atendeu plenamente aos requisitos normativos para UHPC, apresentando índices de espalhamento adequados mesmo com a incorporação de fibras metálicas. Observou-se, entretanto, a redução controlada da fluidez na presença das fibras, comportamento esperado e compatível com a literatura, sem prejuízo à trabalhabilidade ou à homogeneidade da mistura. Do ponto de vista microestrutural, a elevada densificação da matriz cimentícia, associada à boa aderência fibra-matriz, contribuiu para a formação de uma zona de transição interfacial mais eficiente, mitigando um dos principais pontos frágeis tradicionalmente associados aos concretos reforçados com fibras. No estado endurecido, os resultados de resistência à compressão confirmaram que todas as misturas avaliadas enquadraram-se na classificação de UHPC, superando o limite mínimo de 120 MPa aos 28 dias. A obtenção desses valores sem a aplicação de cura térmica evidencia a elevada eficiência do empacotamento e da dosagem adotada, ressaltando o potencial do material para aplicações práticas em condições usuais de obra. As análises estatísticas revelaram que a presença das fibras metálicas não promoveu incremento significativo na resistência à compressão aos sete dias, e que, aos 28 dias, o grupo sem fibras apresentou desempenho estatisticamente superior. Esse comportamento foi atribuído, principalmente, à possível interferência das fibras no empacotamento da matriz e à formação de micro vazios na interface fibra-matriz sob solicitação compressiva. Por outro lado, a incorporação de fibras metálicas mostrou-se extremamente eficaz na melhoria do comportamento pós-fissuração do UHPC. Os ensaios de flexão evidenciaram aumentos expressivos na força máxima suportada, na deformação última e, sobretudo, na tenacidade e na energia de fratura do compósito reforçado.

A análise da energia de fratura (G_f) e da intensidade de tensão crítica (KIC) indicou ganhos substanciais no desempenho à fratura do UHPC-TS reforçado, evidenciando a contribuição das fibras na dissipação de energia e no aumento da resistência à propagação de trincas. Esses resultados reforçam a adequação do material para aplicações em elementos estruturais esbeltos, pré-moldados e de alta exigência mecânica. Os elevados valores de energia absorvida observados nas amostras com fibras confirmam a atuação eficiente do mecanismo de ponteamto, responsável por restringir a propagação de fissuras e promover um comportamento mais dúctil e estável após o pico de carga. Esse aspecto é particularmente relevante para aplicações estruturais sujeitas a ações dinâmicas, impactos ou solicitações cíclicas.

Por fim, os resultados obtidos reforçam a importância de uma abordagem integrada entre caracterização de materiais, otimização granulométrica e análise estatística dos resultados, permitindo o desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados com elevado grau de confiabilidade experimental. A combinação entre desempenho mecânico elevado, durabilidade potencial aprimorada e incorporação de resíduos industriais posiciona o UHPC-TS desenvolvido como um material promissor para aplicações estruturais de alto desempenho alinhadas aos princípios da construção sustentável. Sob a ótica da sustentabilidade, o estudo demonstrou que a substituição de agregados naturais por rejeitos de mineração é uma alternativa técnica e ambientalmente viável, reduzindo a demanda por recursos naturais, minimizando passivos ambientais e contribuindo para a redução da pegada de carbono associada à produção de materiais cimentícios avançados. O desenvolvimento do UHPC-TS proposto também tem contribuição social ao responder simultaneamente a desafios estruturais, econômicos e ambientais da construção civil. Ao proporcionar elevados desempenhos, o material reduz significativamente a necessidade de manutenções e intervenções ao longo da vida útil das estruturas, implicando menor gasto de recursos públicos e menor impacto direto na rotina da população, sobretudo em obras de infraestrutura e saneamento. Além disso, a incorporação de resíduos de mineração como insumos promove o reaproveitamento de materiais, contribuindo com a economia circular e com os princípios do desenvolvimento sustentável. Como perspectivas futuras, recomenda-se a realização de estudos adicionais voltados à durabilidade a longo prazo, incluindo ensaios de penetração de cloretos, carbonatação, ataque químico e ciclos térmicos, bem como a avaliação do comportamento estrutural em escala real. Tais investigações permitirão consolidar o uso do UHPC com rejeitos de mineração como solução tecnológica robusta, sustentável e aplicável em larga escala na engenharia civil contemporânea.

REFERÊNCIAS

ABBAS, S. M. L. N.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, p. 271-295, 2016.

AGUERO, R. R. *et al.* Experimental study of concrete mixtures to produce UHPRC using sustainable Brazilian materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, p. 766-789, 2019.

AKÇA, Kutalmış Recep; İPEK, Metin. Effect of different fiber combinations and optimisation of an ultra-high performance concrete (UHPC) mix applicable in structural elements. **Construction and Building Materials**, v. 315, p. 125777, 2022.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 239R-18 – Report on 3D Printing with concrete**. Farmington Hills, MI, 2018.

AN, Dong et al. Estudo dos fatores que influenciam a curva de deslocamento de carga de um dispositivo de absorção de energia por meio de simulação de divisão de área. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 13492, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582, 2016. Cimento Portland – Determinação da expansibilidade por Le Chatelier. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15530: Madeira serrada de espécies de reflorestamento para uso estrutural – Classificação visual para resistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Ergonomia – Princípios de projeto aplicados a sistemas de trabalho. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16834:2020 – Gestão de riscos. Diretrizes para a avaliação de riscos organizacionais. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16887: Diretrizes para avaliação da segurança de máquinas – Princípios gerais de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: 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. NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estático de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9606: Soldagem - Ensaios de qualificação de soldadores – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: Embalagem plástica para transporte de produtos perigosos – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1753:2021 – Standard Guide for Building and Constructing Micropiles.** West Conshohocken, PA, 2021.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1856:2017 – Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Hydraulic Cement for Use in Determining the Properties of Hydraulic Cement.** West Conshohocken, PA, 2021.

BAHMANI, Hadi; MOSTOFINEJAD, Davood. Microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC)—a review study. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104118, 2022.

BAJABER, M. A.; HAKEEM, I. Y. UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 10, p. 1058-1074, 2021.

BAN, Cheah Chee *et al.* Properties of ultra-high performance concrete and conventional concrete with coal bottom ash as aggregate replacement and nanoadditives: A review. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 62, n. 1, 2023.

Brasil. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília: DOU de 28/5/2012.

CHEN, Xuan *et al.* Experimental studies and microstructure analysis for ultra high-performance reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116924, 2019.

CHU, Hongyan *et al.* Feasibility of producing ultra-high performance concrete with high elastic modulus by steel chips: An experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 375, p. 130964, 2023.

CHU, Hongyan *et al.* Mechanical properties and microstructure of ultra-high-performance concrete with high elastic modulus. **Construction and Building Materials**, v. 335, p. 127385, 2022.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 500 de 19 de outubro de 2020.** Brasília: DOU de 21/10/2020.

DAS, Souvik; LEE, Jonathan; WEI, Jianqiang. Tailoring Ultra-High Performance Concrete for Additive Manufacturing: Synergistic Roles of Superplasticizer and Viscosity-Modifying Admixture in Printability and Performance. **Journal of Building Engineering**, p. 115679, 2026.

DE AZEVEDO PADILHA, Natan *et al.* Identificação elementar de (cobre, zinco, ferro, rubídio) nos resíduos das cascas do cupuaçu (*theobroma grandiflorum*) pelo método de fluorescência de raio X. **Scientia Naturalis**, v. 3, n. 5, 2021.

DIOGO, Eduardo Nuno Campos Dias. **Análise do fator de intensidade de tensões em carregamentos multiaxiais**. 2024.

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

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GOMES, Kleber Cardoso; BEZERRA, Lucas Carvalho. **Análise do desempenho do concreto com areia industrial de mineração de ferro reforçado com fibras de aço**. 2024.

GURUSIDESWAR, S. *et al.* Tensile strength and failure of ultra-high performance concrete (UHPC) composition over a wide range of strain rates. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 119642, 2020.

HUANG, Kunhong *et al.* Effects of the combined usage of nanomaterials and steel fibres on the workability, compressive strength, and microstructure of ultra-high performance concrete. **Nanotechnology Reviews**, v. 10, n. 1, p. 304-317, 2021.

JONNALAGADDA, Srimaruthi; CHAVA, Srinivas. Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A state-of-the-art review of material behavior, structural applications and future. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 23, n. 4, p. 25-30, 2023.

KABIR, S.; AL-SHAYEB, A.; KHAN, I.M. Recycled Construction Debris as Concrete Aggregate for Sustainable Construction Materials. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 1518-1525, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.191>.

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

LEITE, Alex Macedo; CASTRO, AL de. Influence of the cementitious matrix on the behavior of fiber reinforced concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 03, p. 543-562, 2020.

LI, Yirui *et al.* A comparative study on mechanical properties and environmental impact of UHPC with belite cement and portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p. 135003, 2022.

LIU, Kangning *et al.* Multiple effects of particle size distribution modulus (q) and maximum aggregate size (D_{max}) on the characteristics of Ultra-High Performance concrete (UHPC): Experiments and modeling. **Cement and Concrete Composites**, v. 133, p. 104709, 2022.

MANSA, Rola; ZOU, Shan. Thermogravimetric analysis of microplastics: A mini review. **Environmental Advances**, v. 5, p. 100117, 2021.

MAYHOUB, Ola A. *et al.* The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 145-158, 2021.

MAYHOUB, Ola A. *et al.* The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 145-158, 2021.

MAZER, Wellington *et al.* Análise de reforço estrutural com Concreto de ultra alto desempenho Analysis of structural reinforcement with ultra high performance concrete. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 7, p. 74164-74183, 2021.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**, 2ª ed., São Paulo, IBRACON, 2014.

MESQUITA, José Augusto Ferreira Sales de. **Ultra-high Performance Concrete (UHPC) ecoeficiente: estratégias para minimizar a energia de mistura e o consumo de ligantes**. 2024. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NAEIMI, Negar; MOUSTAFA, Mohamed A. Compressive behavior and stress–strain relationships of confined and unconfined UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121844, 2021.

NATO, Chrystian Tavares. **Dosagem de concretos pela teoria do empacotamento de partículas e método IPT-EPUSP**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.

NOBRE FILHO, Pedro Aguiar *et al.* **Impactos ambientais da extração de areia no canal ativo do Rio Canindé**, Paramoti, Ceará. 2011.

OUYANG, Xue *et al.* Experimental investigation and prediction of elastic modulus of ultra-high performance concrete (UHPC) based on its composition. **Cement and Concrete Research**, v. 138, p. 106241, 2020.

SALVADOR, Renan Pícolo. Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras. **São Paulo**, v. 178, 2013.

SANTOS, J. L.; SILVA, F. R.; OLIVEIRA, M. F. **Análise Térmica Aplicada a Materiais: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2021. ISBN: 978-65-501-2343-1.

SARAIVA FILHO, Kleber Rocha. **Estudo da análise do mecanismo de falha no concreto baseada na mecânica da fratura**. 2019.

SEPULVEDA, Deymer Yesid Paez. **Simulação numérica em mesoescala do comportamento à flexão do UHPFRC: influência da razão de aspecto, fração volumétrica e orientação das fibras**. 2025. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SHI, Caijun *et al.* A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741-751, 2015.

SHI, Jun *et al.* Properties of Ultra-High Performance Concrete incorporating iron tailings powder and iron tailings sand. **Journal of Building Engineering**, v. 83, p. 108442, 2024.

SUESCUM-MORALES, David *et al.* Effect of moderate temperatures on compressive strength of ultra-high-performance concrete: A microstructural analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 140, p. 106303, 2021.

VERSIEUX, Juniara L. *et al.* **USO DE RESÍDUO DA MINERAÇÃO DE AREIA PARA SORÇÃO DE CÉSIO**. 2024.

WANG, Yuan-Zuo *et al.* Experimental study on ultra-high performance concrete under triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120225, 2020.

WU, Cai *et al.* Assessing the carbon reduction potential of high-performance concrete in urban construction. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 47, p. 102170, 2025.

XIONG, Xing *et al.* Performance and microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC) with silica fume replaced by inert mineral powders. **Construction and Building Materials**, v. 327, p. 126996, 2022.

YU, Ke-Quan *et al.* Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP). **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105813, 2019.

CONCLUSÃO GERAL

A presente pesquisa evidencia que o desenvolvimento do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) com a incorporação de rejeitos de mineração constitui uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente estratégica para a engenharia contemporânea. A utilização de resíduos industriais em matrizes cimentícias de alto desempenho não apenas contribui para a mitigação de passivos ambientais, mas também potencializa propriedades mecânicas e de durabilidade do material.

A partir da Revisão Sistemática de Literatura (RSL), apoiada por ferramentas como o StArt, foi possível consolidar o estado da arte por meio da análise de 23 estudos selecionados. A literatura analisada demonstra, de forma consistente, que é tecnicamente viável produzir UHPC com a incorporação de materiais reciclados e rejeitos industriais, apresentando níveis de evidência que variam de médios a altos, especialmente no que se refere à resistência mecânica, durabilidade e comportamento microestrutural. Estudos indicam que agregados reciclados, como concreto de ultra-alta durabilidade triturado, podem manter propriedades adequadas de compressão, flexão, tenacidade e resistência à penetração de agentes agressivos. Substituições parciais de cimento por materiais como FC3R, pó de vidro, cinzas ultrafinas de palma (UPOFA) e sílica ativa mostraram-se eficazes, contribuindo para a redução do impacto ambiental sem prejuízo significativo das propriedades mecânicas. Além disso, a incorporação de fibras e o uso de nanomateriais têm papel relevante na melhoria da ductilidade, resistência à tração e mitigação de perdas de desempenho, reforçando o potencial do UHPC como material sustentável e de alto desempenho.

Por outro lado, a revisão evidencia lacunas importantes que ainda limitam a consolidação dessas tecnologias em larga escala. Entre os principais desafios estão a ausência de padronização nos processos de pré-tratamento dos resíduos, a necessidade de estudos mais aprofundados sobre durabilidade em ambientes agressivos (como sulfatos, ciclos gelo-degelo e exposição prolongada), e a avaliação de reações deletérias, como a reação álcali-sílica (ASR). Também há carência de investigações sobre comportamento reológico em altos teores de substituição, desempenho em escala estrutural, interação entre diferentes tipos de fibras e análise da zona de transição interfacial (ZTI). Aspectos práticos, como custo, logística, trabalhabilidade, cura e compatibilidade entre materiais, ainda demandam maior exploração, assim como estudos de longo prazo e validação normativa. A utilização de rejeitos de mineração, como pós e areias de ferro (ITP e ITS), revelou desempenho promissor, com melhorias na microestrutura, redução de porosidade e ganhos de resistência e tenacidade.

A etapa experimental da pesquisa foi estruturada com base nesses fundamentos teóricos, adotando um programa rigoroso que permitiu a realização de um estudo de dosagem e a comparação traços e misturas com diferentes teores de substituição, utilizando areias de rejeito de mineração. A metodologia contemplou controle de variáveis como relação água/cimento (inferior a 0,20), teor de fibras e uso de superplastificantes, além de procedimentos de mistura de alta energia para garantir homogeneidade.

O estudo demonstrou, de forma consistente, a viabilidade técnica, mecânica e ambiental do desenvolvimento de um Concreto de Ultra-Alto Desempenho com incorporação de areias de rejeitos de mineração de ferro (UHPC-TS), com e sem o uso de fibras metálicas. A proposta de aliar elevado desempenho estrutural à ecoeficiência foi atendida, evidenciando que resíduos minerais, quando adequadamente caracterizados e dosados, podem atuar de forma estratégica em matrizes cimentícias avançadas. A caracterização físico-química e mineralógica dos rejeitos de mineração, indicou predominância de quartzo, estabilidade térmica e ausência de fases deletérias, com comportamento compatível ao de agregados naturais, possibilitando seu uso como areias para o UHPC desenvolvido. Observou-se ainda que frações ultrafinas apresentam maior teor de óxidos de ferro e alumínio, sugerindo potencial como material de preenchimento, desde que avaliadas quanto à reatividade e aspectos ambientais. A aplicação do modelo de empacotamento de Andreasen e Andersen Modificado foi determinante para a obtenção de uma matriz altamente densa, com baixa porosidade e microestrutura refinada.

No estado fresco, a mistura apresentou adequada trabalhabilidade, mesmo com a presença de fibras, enquanto no estado endurecido atingiram resistências superiores a 120 MPa aos 28 dias, mesmo sem cura térmica, evidenciando a eficiência da dosagem adotada. A análise estatística indicou que as fibras metálicas não contribuíram significativamente para o aumento da resistência à compressão, podendo inclusive interferir no empacotamento da matriz, por outro lado, foram determinantes para a melhoria do comportamento pós-fissuração. Ensaios de flexão demonstraram ganhos expressivos em tenacidade, deformação última e energia de fratura, com aumento da resistência à propagação de fissuras devido ao mecanismo de ponteamto. Os parâmetros de energia de fratura e intensidade de tensão crítica (G_f e K_{IC}) confirmaram o desempenho superior do compósito reforçado, destacando a adequação para aplicações estruturais esbeltas e submetidas a ações severas. Em síntese, os resultados reforçam que a integração entre caracterização de materiais, otimização granulométrica e análise estatística permite o desenvolvimento de compósitos cimentícios de alta confiabilidade.

O resultado de 497,7 kg CO_2 -eq/m³ indica que o cimento Portland e o aditivo são os principais responsáveis pelas emissões do UHPC analisado, posicionando-o na faixa

considerada usual para concretos dessa classe, porém próximo ao limite inferior de impacto ambiental. Embora o elevado consumo de cimento seja frequentemente apontado como limitação, quando analisado em função do desempenho estrutural e da redução de volume de material empregado, como mostrado neste estudo, esse índice tende a equiparar-se ou apresentar valores inferiores a obtidos em concretos convencionais. No que se refere aos agregados, observa-se que sua contribuição nas emissões totais é reduzida, especialmente na fase de produção (A1–A3), sendo mais relevante no transporte (A4); ainda assim, o uso de rejeitos de mineração resultou em emissões significativamente inferiores ($1,25 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$) quando comparadas aos limites convencionais. Nesse contexto, a incorporação desses materiais configura-se como uma estratégia eficaz de economia circular, alinhada às diretrizes ambientais vigentes, ao mitigar impactos associados à mineração, como degradação de áreas de preservação, instabilidade geomorfológica e contaminação ambiental, ao mesmo tempo em que reduz a demanda por recursos naturais e a pressão sobre ecossistemas sensíveis.

Por fim, destaca-se a necessidade de ampliar a base de dados experimentais, melhorar a reprodutibilidade entre diferentes fontes de resíduos e estabelecer diretrizes mais claras para aplicação em engenharia. Como continuidade a este estudo, recomenda-se a ampliação dos estudos de durabilidade a longo prazo. Se validada, a durabilidade superior do UHPC, pode contribuir significativamente para a redução das emissões ao longo do ciclo de vida, uma vez que diminui a necessidade de manutenções e intervenções, podendo resultar em impactos até 48% menores em comparação ao concreto convencional. Sob essa perspectiva, análises de custo ao longo do tempo também indicam vantagens econômicas em aplicações de infraestrutura, embora, no caso de edificações, a durabilidade deva ser analisada com cautela devido a fatores de obsolescência funcional. Também é necessário validações em escala estrutural, a fim de consolidar o UHPC-TS como uma solução tecnicamente robusta e aplicável em larga escala na construção civil, utilizando modelos em tamanho real e testes em estruturas com submissão de cargas elevadas. Como perspectiva de avanço deste estudo ainda, existe a necessidade de investigação do comportamento do UHPC em situações de incêndio, uma vez que a elevada densidade e baixa porosidade podem influenciar diretamente na resposta térmica. Em condições de altas temperaturas, o material pode estar suscetível a fenômenos como o *spalling* explosivo, decorrente da pressão interna de vapor, o que compromete a integridade estrutural. Assim, estudos futuros devem contemplar ensaios experimentais e modelagens numéricas que avaliem a resistência residual, a perda de propriedades mecânicas e a eficácia de estratégias mitigadoras, como a incorporação de fibras sintéticas.