



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Civil

AMANDA APARECIDA SOUZA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEOR E DO
COMPRIMENTO DE FIBRAS DE CARBONO
E DO CONSUMO DE CIMENTO NAS
PROPRIEDADES DE CONCRETOS DE ULTRA-
ALTO DESEMPENHO**

UBERLÂNDIA

2026

AMANDA APARECIDA SOUZA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEOR E DO
COMPRIMENTO DE FIBRAS DE CARBONO
E DO CONSUMO DE CIMENTO NAS
PROPRIEDADES DE CONCRETOS DE ULTRA-
ALTO DESEMPENHO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia Civil da Universidade Federal de
Uberlândia para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil,
Estruturas e Geotecnia.

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. LEILA APARECIDA DE CASTRO MOTTA

UBERLÂNDIA
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S729a
2026 Souza, Amanda Aparecida, 1996-
Análise da influência do teor e do comprimento de fibras de carbono e do consumo de cimento nas propriedades de concretos de ultra-alto desempenho [recurso eletrônico] / Amanda Aparecida Souza. - 2026.

Orientadora: Leila Aparecida de Castro Motta.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.5044>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia Civil. I. Motta, Leila Aparecida de Castro, 1970-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Nelson Marcos Ferreira
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 330, PPGEC				
Data:	06 de fevereiro de 2026	Hora de início:	09 h	Hora de encerramento:	12h
Matrícula do Discente:	12322ECV001				
Nome do Discente:	Amanda Aparecida Souza				
Título do Trabalho:	Análise da influência do teor e do comprimento de fibras de carbono e do consumo de cimento nas propriedades de concretos de ultra-alto desempenho				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Construção Civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Inovação em materiais de construção civil				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Doutores: Karyne Ferreira dos Santos - C5LAB, Prof.^a Eliane Betânia Carvalho Costa - UFU e Prof.^a Leila Aparecida de Castro Motta, orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Leila Aparecida de Castro Motta, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

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

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Karyne Ferreira dos Santos, Usuário Externo**, em 12/02/2026, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eliane Betânia Carvalho Costa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/02/2026, às 09:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leila Aparecida de Castro Motta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/02/2026, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7060123** e o código CRC **331FE65A**.

Referência: Processo nº 23117.006435/2026-01

SEI nº 7060123

*Dedico este trabalho a meus pais Andrea e Simão.
Ao meu amado esposo Kenji Okada.
Aos meus irmãos Gabriel e Andreza.*

O conhecimento é um bem que, por mais que seja armazenado, jamais toma qualquer espaço. As boas leituras enriquecem a mente, acalmam o coração, estimulam o progresso.

“Joanna de Ângelis”

Agradecimentos

A gratidão nos ensina a valorizar as pequenas e grandes bênçãos da vida. Por isso, expresso meu profundo agradecimento ao meu marido, Kenji Fabiano Ávila Okada, por tornar nosso lar um ambiente seguro e acolhedor para os estudos. Sua presença e dedicação são minha maior inspiração para trilhar o caminho do profissionalismo acadêmico.

À minha família, especialmente aos meus pais e irmãos, sogros e cunhados, por todo o suporte e encorajamento sempre que precisei. Vocês são minha base e minha motivação constante.

Expresso também minha imensa gratidão e admiração à minha orientadora, Leila Aparecida de Castro Motta, uma mulher forte, inteligente e inspiradora. Como mãe e profissional, ela é um espelho para mim, refletindo aquilo que almejo ser em minha carreira. Sua orientação e apoio foram essenciais para a realização deste trabalho.

Com apreço, agradeço a Daniel Hayne Firmo pelo apoio à minha decisão de conciliar o trabalho com o mestrado. Sua compreensão e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse conduzir essa etapa de forma segura e alinhada aos meus objetivos profissionais e pessoais.

Serei sempre grata à aluna de iniciação científica Andressa de Lima Oliveira, bem como aos demais colegas que colaboraram de forma direta na confecção das misturas, inclusive em períodos não regulares de trabalho. A dedicação, o comprometimento e o espírito colaborativo de todos foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Minha gratidão ao Mateus P. Otto pela elaboração do aplicativo de otimização de empacotamento de grãos, que proporciona aplicar o método de Andreassen e Andersen de forma rápida e automatizada, o que facilita muito em determinadas etapas da pesquisa.

Estendo meu reconhecimento aos parceiros que forneceram materiais indispensáveis para a pesquisa: à Ciplan Cimento Planalto S/A, pelo donativo do cimento CPV; à Liasa, pela doação da sílica não densificada; e à Brasmix Engenharia de Concreto Ltda., pelo fornecimento dos agregados utilizados no estudo de otimização.

Agradeço ao professor e amigo Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, pela constante ajuda na resolução de problemas relacionados às máquinas de ensaio e à soluções desenvolvidas por impressão 3D.

Registro minha gratidão aos técnicos administrativos da Rede de Laboratórios Multiusuários (RELAM) e do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LabMat) da Universidade Federal de Uberlândia e ao grupo de pesquisa de Durabilidade e Avaliação Estrutural (DurAE). Sua colaboração foi fundamental para a realização dos ensaios e para o avanço dos estudos. Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e pela concessão da bolsa de estudos, indispensáveis para o desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo

O Ultra-high Performance Concrete (UHPC) é caracterizado por elevadas resistências mecânicas, baixa porosidade e alta durabilidade. Entretanto, na ausência de fibras, apresenta resposta frágil sob carregamento, o que torna necessária a incorporação de reforços fibrosos para a melhoria da ductilidade e da capacidade de absorção de energia. Assim, este trabalho avaliou a interação de fibras de carbono com a matriz de UHPC e sua influência nas propriedades mecânicas, tenacidade e propriedades elétricas do compósito, considerando uma relação água/materiais cimentícios fixa de 0,23 em todas as misturas. A pesquisa compreendeu a caracterização física e química dos materiais constituintes, seguida de um delineamento composto central rotacional para o planejamento estatístico dos experimentos. Na sequência, realizou-se a otimização da compacidade dos materiais finos por meio do método de empacotamento de grãos de Andreassen e Andersen modificado. As misturas otimizadas foram produzidas e avaliadas no estado fresco e endurecido. As propriedades do compósito foram investigadas em diferentes idades de cura, de acordo com a adequação de cada ensaio. Aos 28 dias, foram avaliadas a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão, a porosidade por absorção total e a resistividade elétrica. Aos 56 dias, determinaram-se a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão, a resistividade elétrica e o módulo de elasticidade. Os resultados do planejamento experimental possibilitaram a obtenção de superfícies de resposta e a identificação das variáveis estatisticamente significativas, evidenciando o consumo de cimento como o principal fator governante das propriedades mecânicas no domínio estudado. Destaca-se que os resultados obtidos demonstram que é possível produzir concretos de ultra alto desempenho com baixo consumo de cimento (500 e 550 kg/m³), contribuindo para o avanço no conhecimento de dosagem de UHPC. Misturas complementares com maiores teores de fibras de carbono indicaram que o aumento do teor de fibras promoveu melhorias significativas na resistência à tração e na tenacidade do compósito. A mistura com 3,7% de fibras de carbono apresentou desempenho global destacado, combinando alta resistência mecânica e maior capacidade de absorção de energia, o que evidencia o potencial da utilização de fibras de carbono na produção de UHPC com propriedades mecânicas aprimoradas.

Palavras-chave: UHPC–Fibras de carbono-Propriedades Mecânicas-Resistividade Elétrica.

Abstract

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is characterized by high mechanical strength, low porosity, and enhanced durability. However, in the absence of fibers, it exhibits a brittle response under loading, making the incorporation of fibrous reinforcement necessary to improve ductility and energy absorption capacity. Thus, this study evaluated the interaction between carbon fibers and the UHPC matrix, as well as their influence on the mechanical properties, toughness, and electrical properties of the composite, considering a constant water-to-binder ratio of 0.23 for all mixtures. The research comprised the physical and chemical characterization of the constituent materials, followed by the definition of a central composite rotatable design for statistical experimental planning. Subsequently, the packing density of fine materials was optimized using the modified Andreassen and Andersen particle packing model. The optimized mixtures were produced and evaluated in both fresh and hardened states. The composite properties were investigated at different curing ages, according to the requirements of each test. At 28 days, compressive strength, flexural tensile strength, total porosity by absorption, and electrical resistivity were evaluated. At 56 days, compressive strength, flexural tensile strength, electrical resistivity, and modulus of elasticity were determined. The results of the experimental design enabled the development of response surfaces and the identification of statistically significant variables, highlighting cement content as the main governing factor for the mechanical properties within the studied domain. The results demonstrate that it is possible to produce ultra-high-performance concrete with low cement consumption (500 and 550 kg/m³), contributing to the advancement of knowledge on UHPC mixture design. Complementary mixtures with higher carbon fiber content indicated that increasing the fiber content significantly improves the tensile strength and toughness of the composite. The mixture containing 3.7% carbon fibers exhibited outstanding overall performance, combining high mechanical strength with enhanced energy absorption capacity, demonstrating the potential of carbon fibers to produce UHPC with improved mechanical properties.

Keywords: UHCP – Carbon Fibers - Mechanical Properties – Electrical Resistivity.

Lista de Figuras

1.1	Diferentes tipos de concretos especiais resultam em um UHPC.....	19
2.1	Linha do tempo da evolução do concreto	27
2.2	Comparação da resistência à compressão com a densidade do material.....	34
2.3	Diagrama tensão-deformação para o concreto de alto desempenho sem fibras, sob ensaio de compressão uniaxial.....	35
2.4	Curvas tensão de flexão-deformação com diferentes teores de fibras de aço e carbono	36
2.5	Efeito de ponteameto de nanotubo de carbono entre as superfícies de fissuração.....	39
2.6	Resposta à tração de compósitos cimentícios reforçados com fibras.....	39
2.7	Curvas de carga-deslocamento no ponto de aplicação obtidas para placas circulares de concreto reforçado com fibras de carbono sob carregamento.....	41
2.8	Distribuição dos valores de Módulo de Elasticidade no UHPC obtidos por Rompa e Gidrão (2020) por levantamento bibliográfico	42
3.1	Empacotamento granular como solução de dosagem.....	46
3.2	Arranjo atômico de partículas na compacidade virtual de empacotamento.....	46
3.3	Faixa de distribuição das dimensões das partículas	47
3.4	Efeito de parede exercido pelo grão maior sobre o grão de menor diâmetro.....	48
3.5	Efeito de afastamento exercido pelo grão menor sobre o grão de diâmetro maior.	48
3.6	Mecanismo de ação dos superplastificantes nas partículas do UHPC.....	53

4.1	Fluxograma para o procedimento experimental da pesquisa.....	59
4.2	Quarteamento - (a) Cimento CPV e (b) pó de quartzo - Quarteamento de amostra.....	60
4.3	Amostras - (a) Sílica ativa e (b) pó de pedra	61
4.4	Feixes de fibras de carbono em diferentes comprimentos.....	62
4.5	Planejamento composto central em duas e três dimensões	66
4.6	Curvas de ajuste de empacotamento granular ótimo	70
4.7	Processo de dispersão das fibras de carbono.....	73
4.8	Materiais utilizados na preparação das misturas	74
4.9	Ensaio de índice de consistência.....	77
4.10	Suporte de corpo de prova cilíndrico para retífica.....	78
4.11	Ensaio de flexão a quatro pontos com extensômetro para medida de flecha.....	79
4.12	Ultrassom para concreto Proceq.....	80
4.13	Resistividade volumétrica do concreto.....	84
5.1	Curvas granulométricas dos materiais granulares	87
5.2	Imagens geradas pelo MEV das fibras de carbono	88
5.3	Variáveis significativas para resistência à compressão aos 56 dias	96
5.4	Superfícies de respostas para resistência à compressão aos 56 dias.....	97
5.5	Região ótima para resistência à compressão aos 56 dias.....	98

5.6	Relação entre resistência à tração e tenacidade	101
5.7	Comparação entre picos de resistência à tração de todos os experimentos realizados aos 56 dias.....	103
5.8	Variável significativa para resistência à tração aos 56 dias.....	105
5.9	Superfícies de respostas para resistência à tração aos 56 dias	106
5.10	Variável significativa para a tenacidade aos 56 dias	107
5.11	Superfícies de respostas para tenacidade aos 56 dias	108
5.12	Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a densidade aparente do UHPC.....	110
5.13	Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e consumo de cimento.....	110
5.14	Variáveis significativas para o módulo de elasticidade aos 56 dias	112
5.15	Superfícies de resposta para o módulo de elasticidade aos 56 dias	113
5.16	Região ótima para módulo de elasticidade aos 56 dias	113
5.17	Relação entre o volume de poros e a resistência à compressão aos 28 dias	115
5.18	Variáveis significativas para volume de poros aos 28 dias	116
5.19	Superfícies de respostas para volume de poros aos 28 dias.....	117
5.20	Correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão aos 56 dias.....	119
5.21	Variáveis significativas para resistividade volumétrica a) aos 28 dias b) aos 56 dias.....	120
5.22	Superfícies de respostas para a resistividade aos 56 dias	121
5.23	Região ótima para a resistividade elétrica	122
5.24	Macroporos no UHPC com fibras de carbono – E1- 0,2%F5 aos 28 dias.....	124

5.25	Formação de produtos hidratados a) aos 28 dias b) aos 56 dias	124
5.26	Dispersão das fibras de carbono	125
5.27	Aderência das fibras de carbono na matriz do concreto	126
5.28	Efeito de arrancamento das fibras na fissuração	127
5.29	Efeito de ponteameto das fibras de carbono nas fissuras do concreto	127
5.30	Volume de fibras adicionado à mistura EC-3,7%F13-850	130

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades típicas físicas e mecânicas das fibras.....	29
4.1	Limite inferior e superior das variáveis independentes	67
4.2	Matriz de Planejamento Composto Central Rotacional com três variáveis.....	68
4.3	Método de mistura realizado.....	75
4.4	Procedimentos de moldagem e vibração dos corpos de prova	76
5.1	Diâmetros equivalentes dos materiais granulares em micrômetros.....	87
5.2	Resultado da análise da composição química do cimento CPV e da sílica ativa	89
5.3	Composição das misturas produzidas.....	91
5.4	Propriedades das misturas no estado fresco.....	92
5.5	Resistência à compressão aos 28 e 56 dias.....	94
5.6	Resistência à tração na flexão e tenacidade aos 28 e 56 dias.....	99
5.7	Módulo de elasticidade dinâmico e densidade de massa aparente das diferentes formulações estudadas.....	109
5.8	Média de volume de poros obtida por ensaio de absorção total aos 28 dias....	114
5.9	Resistividade volumétrica medida nos experimentos aos 28 e 56 dias.....	118
5.10	Propriedades das misturas complementares no estado fresco	129
5.11	Propriedades no estado endurecido das misturas complementares aos 28 e 56 dias.....	131

Lista de Abreviaturas e Siglas

A/C Relação água/cimento

A&A Andreassen e Andersen

A&A_{MOD} Andreassen e Andersen Modificado

ACI American Concrete Institute

Al₂O₃ Óxido de Alumínio

ASAP Analisador de Área Superficial e Porosidade

BSF Fibras de Aço

C₃A Aluminato Tricálcico

C₃S Alita

C-S-H Silicato de Cálcio Hidratado

Ca(OH)₂ Hidróxido de Cálcio

CAA Concretos Autodensáveis

CAD Concreto de Alto Desempenho

CaO Óxido de Cálcio

CAPES Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CAR Concreto de Alta Resistência

CC Concreto Convencional

CCC Cúbico de Corpo Centrado

CF Fibras de Carbono

CFC Cúbico de Face Centrada

CIC Concentração crítica de incorporação

CNFs Nanofibras de carbono

CO₂ Dióxido de Carbono

CP Cimento Portland

CPR Concreto de Pós Reativos

CPV ARI Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CRF Concretos Reforçados com Fibras

CS Cúbico Simples

DCCR Delineamento Composto Central Rotacional

DMA Analisador Dinâmico-Mecânico

EDS Energia Dispersiva por Raio-X

EMI Interferência Eletromagnética

FRC Fiber Reinforced Concrete

FRX Fluorescência de Raios-X

GPa Giga Pascals

HPC High Performance Concrete

HRWR Aditivo Redutor de Água

HSC Concreto de Alta Resistência

MCS Materiais Cimentícios Suplementares

ME Módulo de Elasticidade

MEC Ministério da Educação

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

MgO Óxido de Magnésio

MOR Módulo de Ruptura

MPa Mega Pascals

MSR Método da Superfície de Respostas

MWNTs Nanotubos de carbono de paredes múltiplas

NBC Nanocarbono negro

PCE Policarboxilato à base de éter

R_e Resistividade Elétrica Volumétrica

RCF Fibras de Carbono Recicladas

RELAM Laboratórios Multiusuários da Universidade Federal de Uberlândia

RPC Reactive Powder Concrete – Concreto de Pós Reativos

SCC Self-compacting concrete

SiO₂ Dióxido de Silício

SO₃ Trióxido de Enxofre

TGA Analisador Termogravimétrico

UHPC Ultra-high Performance Concrete

VCF Fibras de Carbono Virgem

Sumário

1 Introdução	19
1.1 Justificativa	21
1.2 Objetivos.....	23
1.2.1 Objetivo geral	23
1.2.2 Objetivos específicos	23
2 Revisão bibliográfica	24
2.1 Histórico e definições	24
2.2 Fibras de carbono como reforço em matrizes cimentícias.....	28
2.3 Princípios básicos do UHPC.....	32
2.3.1 Homogeneidade.....	32
2.3.2 Densidade	33
2.3.3 Ductilidade e tenacidade adquirida com adição de fibras	34
2.4 Propriedades do UHPC.....	36
2.4.1 Propriedades mecânicas	36
2.4.1.1 Resistência à compressão	36
2.4.1.2 Resistência à tração.....	38
2.4.1.3 Módulo de Elasticidade	41
2.4.2 Propriedades Intrínsecas ao UHPC.....	42
2.4.2.1 Durabilidade	42
2.4.2.2 Desempenho	44
3 Dosagem do UHPC	45

3.1	Modelo teórico de empacotamento de grãos	45
3.2	Materiais constituintes do UHPC e suas propriedades	48
3.2.1	Água	49
3.2.2	Agregados.....	49
3.2.3	Ligantes	50
3.2.4	Fillers.....	52
3.2.5	Aditivos químicos	53
3.2.6	Fibras	54
3.2.7	Procedimento de mistura.....	55
3.3	Dosagem de UHPC com modelo de empacotamento de grãos de Andreassen e Andersen Modificado	56
4	Materiais e métodos.....	58
4.1	Programa experimental	58
4.2	Etapa 1: caracterização dos materiais	60
4.2.1	Ensaio físico.....	62
4.2.1.1	Composição granulométrica	63
4.2.1.2	Massa específica	63
4.2.1.3	Resistência a compressão do cimento.....	64
4.2.1.4	Superfície específica B.E.T	64
4.2.1.5	Microscopia Eletrônica de Varredura	64
4.2.2	Ensaio químico.....	65
4.2.2.1	Fluorescência de Raios-X.....	65
4.2.2.2	Perda ao fogo	65
4.3	Delineamento composto central rotacional	66
4.4	Dosagem dos materiais sólidos segundo o modelo de empacotamento de grãos de Andreassen e Andersen modificado	69
4.5	Superfícies de respostas	71

4.6	Etapa 3: Produção e caracterização das formulações de estudo	72
4.6.1	Dispersão das fibras	72
4.6.2	Mistura, moldagem e cura	74
4.6.3	Ensaio no estado fresco	76
4.6.4	Ensaio no estado endurecido	77
4.6.4.1	Resistência à compressão	78
4.6.4.2	Resistência à tração na flexão	78
4.6.4.3	Módulo de elasticidade	80
4.6.4.4	Volume de poros por absorção total	82
4.6.4.5	Resistividade elétrica	83
4.6.5	Microestrutura.....	85
5	Resultados obtidos e discussões	86
5.1	Caracterização dos materiais	86
5.1.1	Granulometria	86
5.1.2	Microscopia eletrônica de varredura das fibras de carbono.....	88
5.1.3	Ensaio químicos.....	89
5.2	Avaliação das propriedades no estado fresco	92
5.3	Avaliação das propriedades no estado endurecido	93
5.3.1	Resistência à compressão.....	93
5.3.2	Resistência à tração na flexão e tenacidade.....	98
5.3.3	Módulo de elasticidade	108
5.3.4	Volume de poros por absorção total	114
5.3.5	Resistividade elétrica.....	117
5.5	Caracterização microestrutural.....	123
5.5.1	Matriz cimentícia: porosidade e hidratação	123
5.5.2	Dispersão das fibras e interação entre fibra e matriz	125

Sumário

5.5.3	Mecanismos de fissuração e transferência de tensões	126
5.6	Investigação complementar baseada nas tendências das superfícies de resposta .	128
6	Conclusões	133
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	135
	Referências bibliográficas	137

1 Introdução

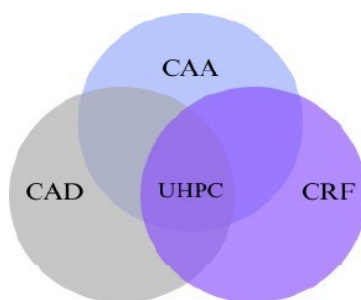
A evolução no campo da ciência dos materiais e da microestrutura do concreto tem possibilitado o desenvolvimento de compósitos com propriedades antes inimagináveis. Nas últimas décadas, diferentes famílias de concretos surgiram para atender demandas de maior durabilidade, resistência e vida útil das estruturas. Entre essas famílias destacam-se o Concreto de Alta Resistência (CAR), Concreto de Alto Desempenho (CAD) e, mais recentemente, o UHPC.

Richard e Cheyrezy (1994) desenvolveram o chamado Concreto de Pós Reativos (CPR), que atingiu resistências à compressão na faixa de 150 a 200MPa, resultado obtido pela combinação de partículas extremamente finas, adições minerais reativas e tratamento térmico. Esse avanço é considerado o marco inicial do que posteriormente passou a ser reconhecido como UHPC.

A aplicação prática desse material não tardou. Em julho de 1997, foi construída em *Sherbrooke*, no Canadá, a primeira ponte em concreto de pós reativos (Blais; Couture, 1999). Na sequência, elementos pré-moldados leves passaram a compor coberturas de estações ferroviárias em Calgary, também no Canadá, e, em 2006, foi concluída nos Estados Unidos a primeira ponte rodoviária executada em UHPC, a ponte do condado de Wapello Mars Hill (Perry; Parsekian; Shrive, 2017).

O concreto empregado nessas construções incorpora, em maior ou menor grau, as propriedades resultantes da integração de três tecnologias: os Concretos Autodensáveis (CAA), os Concretos Reforçados com Fibras (CRF) e os CAD. Quando levadas ao seu máximo potencial, essas tecnologias resultam no UHPC, conforme ilustrado na Figura 1.1 (Torregrosa, 2013).

Figura 1.1: Diferentes tipos de concretos especiais resultam em um UHPC



Fonte: Adaptado de Torregrosa (2013).

No Brasil, a norma recentemente publicada ABNT NBR 17246-1: Concreto de ultra-alto desempenho Parte 1: Classificação, requisitos e especificação (2025) - define o UHPC como um compósito cimentício homogêneo, de baixa porosidade, com resistência à compressão superior a 100MPa e comportamento dúctil à tração. A norma determina que a resistência característica à tração no limite de elasticidade ($f_{ctk,el}$) seja $\geq 6,0\text{MPa}$, enquanto a densidade específica deve situar-se entre 2200kg/m³ e 2800kg/m³, considerando todos os materiais que compõem a mistura.

Sua formulação caracteriza-se por uma relação água/materiais cimentícios muito baixa, utilização de cimento Portland de alta qualidade, aditivos superplastificantes ou polifuncionais, areia fina, pó de quartzo, sílica ativa e uma fração significativa de fibras, elementos que, em conjunto, conferem ao material sua elevada performance (Azme; Shafiq, 2018). A NBR 17246-1 estabelece que não há restrições quanto ao tipo de material empregado na produção do UHPC. No entanto, ressalta que os constituintes da mistura não devem conter substâncias que comprometam a durabilidade do concreto ou que possam provocar a corrosão das armaduras incorporadas aos elementos estruturais.

Todavia, as composições tipicamente comuns para este concreto demonstram certa limitação de sua aplicação mais ampla na prática devido ao elevado consumo de cimento, entre 700 a 1100 kg/m³ (Ding *et al.*, 2020, Graybeal, 2006, Richard e Cheyrezy, 1994), configurando altas emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, contrapondo os atuais objetivos de desenvolvimento sustentável e eficiência energética.

Pesquisas recentes sobre o concreto de ultra-alto desempenho com adição de fibras de carbono apresentam bons resultados, mas que ainda precisam ser explorados. Patchen, Young e Penumadu (2022) investigaram as propriedades de compressão, tração e flexão do concreto reforçado com fibras de carbono, realizando uma análise em múltiplas escalas. Essa análise abordou a relação entre o comportamento reológico, as características microestruturais relevantes, como a porosidade, e o desempenho mecânico, com ênfase na influência do reforço com fibras de carbono no projeto da mistura de concreto.

Os autores alcançaram um resultado de resistência à compressão de 135,3MPa, aproximadamente 42,5% maior que o concreto sem reforço (87,9MPa) e 17,9% maior que o concreto reforçado com fibras de aço (113,1MPa) e resistência à tração de 6,89MPa, cerca de 27,8% maior que o concreto sem reforço (5,21MPa) e 4,6% maior que o concreto reforçado com fibras de aço (6,58MPa). Ainda assim, mesmo com ótimo desempenho mecânico, as fibras reduziram a fluidez e a trabalhabilidade do concreto de ultra alto

desempenho em comparação com as fibras de aço e a mistura de concreto sem adição, levando a um aumento na porosidade.

A literatura tem investigado o uso de fibras de carbono recicladas como alternativa às fibras virgens, principalmente em função do menor custo e do potencial de redução de impactos ambientais associados ao descarte de compósitos (Shiino; Rezende, 2020; Kimm *et al.*, 2021). No entanto, a reciclagem desse material no Brasil ainda se encontra em estágio inicial, com aplicações restritas ao meio acadêmico e a iniciativas pontuais, sem disponibilidade comercial em larga escala (Batista, 2023; Souza, 2023).

Além disso, os processos de reciclagem (químicos, térmicos ou mecânicos) podem comprometer a homogeneidade das fibras, gerando variações em comprimento, diâmetro e propriedades mecânicas (Feraboli *et al.*, 2011; Pimenta; Pinho, 2011), o que dificulta o controle experimental. Nesse contexto, optou-se pela utilização de fibras de carbono virgens, que apresentam maior regularidade dimensional e confiabilidade experimental, permitindo melhor controle das variáveis e maior reprodutibilidade dos resultados.

Para avançar na compreensão do concreto de ultra-alto desempenho com adição de fibras de carbono, esta pesquisa contribui ao abordar dosagens otimizadas para o UHPC, considerando um intervalo de consumo de cimento variando entre 500 e 900 kg/m³. Essa faixa foi definida de modo a abranger tanto valores típicos descritos na literatura quanto consumos mais reduzidos, buscando investigar exatamente a possibilidade da produção de UHPC com menor consumo de cimento. Adicionalmente, são analisadas as propriedades intrínsecas do compósito, com o objetivo de compreender a influência da incorporação de fibras de carbono no comportamento mecânico e nas características microestruturais do compósito.

1.1 Justificativa

Em virtude da crescente demanda por estruturas mais leves, eficientes e sustentáveis, a evolução no estudo das propriedades e ciências dos materiais tem resultado em elementos de alta performance e durabilidade. Nesse contexto, o UHPC tem se destacado por suas características de elevada resistência à compressão, baixa permeabilidade, boa durabilidade e comportamento dúctil satisfatório (Rompa; Gidrão, 2020).

Tais propriedades derivam de sua composição diferenciada, caracterizada por uma

elevada compacidade de partículas, utilização de agregados finos, adições minerais reativas e inertes, além de aditivos superplastificantes ou polifuncionais.

Apesar de seu desempenho superior, a microestrutura extremamente densa do UHPC tende a resultar em rupturas abruptas e frágeis. Para superar essa limitação, a incorporação de fibras é prática corrente, uma vez que aumenta a capacidade de absorção de energia e confere maior tenacidade ao compósito (Fehling *et al.*, 2014). A resistência à tração, em particular, é influenciada tanto pela matriz cimentícia quanto pelo tipo, quantidade e qualidade das fibras utilizadas. Estudos indicam que fibras com elevada aderência à matriz até a primeira fissura, somada ao deslizamento posterior com ocorrência de *pull-out* contribuem significativamente para o aumento da capacidade de tração (El-Helou; Graybeal, 2022).

Neste cenário, as fibras de carbono mostram-se como uma alternativa promissora. As fibras de carbono apresentam propriedades notáveis, como baixa massa específica, tornando-as leves, elevado módulo de elasticidade, pequeno diâmetro e alta resistência mecânica quando comparada às fibras de outros materiais (Callister Jr., 2018). Em comparação às outras fibras sintéticas e minerais, as fibras de carbono possuem maior resistência à tração e módulo de elasticidade, dispondo assim a capacidade de melhorar as propriedades mecânicas do concreto (Gong *et al.*, 2022).

A produção de concretos de ultra-alto desempenho permite a obtenção de elementos estruturais mais delgados e duráveis, reduzindo o consumo de materiais e a necessidade de manutenções frequentes ao longo da vida útil da estrutura. Além disso, estudos revelam que a adição de fibras de carbono melhora significativamente a microestrutura do concreto, diminuindo o diâmetro médio dos poros e em consequência, a absorção capilar de água ao longo do tempo (Belli *et al.*, 2020).

Dessa forma, mesmo que o custo inicial do compósito seja superior ao de concretos convencionais, a redução no volume de materiais empregados, aliada ao prolongamento da vida útil das estruturas, contribui para diminuir o impacto ambiental global, alinhando-se aos princípios de construção sustentável e à busca por maior eficiência no uso de recursos. Por isso, esta pesquisa se justifica por contribuir para o entendimento do UHPC reforçado com fibras de carbono, avaliando suas propriedades mecânicas e microestruturais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é investigar a influência da incorporação de fibras de carbono nas propriedades mecânicas, tenacidade e propriedades elétricas do concreto de ultra-alto desempenho, considerando diferentes consumos de cimento, teores e comprimentos de fibras.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Desenvolver dosagens para o UHPC reforçado com fibras de carbono, variando o teor e o comprimento das fibras, assim como o consumo de cimento.
- Definir o método de dispersão das fibras de carbono de maneira homogênea na matriz, com base em métodos usados na literatura.
- Comparar o desempenho das diferentes misturas tanto no estado fresco quanto no endurecido por meio de superfície de respostas, buscando formulações ótimas.
- Analisar a microestrutura das misturas para verificar a morfologia e interação das fibras com a matriz cimentícia.

2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo apresenta-se, inicialmente, uma síntese histórica da evolução do concreto, até o desenvolvimento do UHPC. Em seguida, realiza-se uma revisão da literatura acerca da incorporação de fibras de carbono em matrizes cimentícias, abordando sua aplicação em UHPC e os principais resultados obtidos com esse tipo de reforço. Por fim, são discutidos os princípios básicos e as propriedades dos compósitos cimentícios reforçados com fibras, que fundamentam as análises desenvolvidas.

2.1 Histórico e definições

Ao longo do último século, o concreto transformou o ambiente construído em todo o mundo, desempenhando um papel fundamental na oferta de moradia, infraestrutura de transporte, geração de energia e proteção. Como o segundo material mais utilizado globalmente, atrás apenas da água, o concreto se destaca por sua abundância, baixo custo e versatilidade, sendo aplicável em diversas soluções (GCCA, 2021; Gagg, 2014).

As misturas convencionais de concreto compostas por cimento Portland, agregados, água e aditivos simples, apresentam certas deficiências relacionadas a baixa resistência à tração, a permeabilidade que está intimamente ligada à durabilidade, a fragilidade, a fissuração e retração e ao seu desempenho de forma geral. Por isso o foco em construções mais robustas e com maior vida útil levou ao desenvolvimento de novas famílias de concretos.

De acordo com Zollo (1996), foi proposto por Romualdi e Batson (1963) o conceito de CRF a fim de combater a fragilidade do concreto, o que trouxe a atenção de pesquisadores acadêmicos e da indústria em todo o mundo. O autor destaca que, naquela época, predominava um sentimento de descoberta e um entusiasmo geral quanto às possibilidades futuras de desenvolvimento de materiais compósitos à base de concreto de cimento Portland.

Nos anos 1960 e 1970, foi desenvolvido um concreto com resistência à compressão superior a 50MPa, definido como CAR. Esse material foi obtido mediante a melhoria na qualidade dos agregados e no uso de aditivos superplastificantes, que reduzem a relação água/cimento sem comprometer a trabalhabilidade. O CAR permitiu a construção de

estruturas mais esbeltas e de grande altura, como arranha-céus e pontes de longo vão (Neville, 2016).

Na década de 1970, o advento dos aditivos redutores de água, conhecidos como superplastificantes, revolucionou o setor ao permitir uma melhor dispersão das partículas de ligante na água. Isso abriu caminho para a utilização de partículas com granulometrias menores que a do cimento, promovendo o preenchimento dos vazios na matriz e resultando em uma estrutura mais densa e eficiente (Torregrosa, 2013).

No final da década de 1970 e início de 1980, pesquisas na Itália, Alemanha e Japão levaram ao desenvolvimento de misturas de concreto de alta trabalhabilidade revolucionando a forma de aplicação do concreto. Este concreto, chamado CAA, é definido como um concreto fluido que pode ser moldado in loco sem o uso de vibradores para formar um compósito livre de vazios e falhas (Mehta; Monteiro, 2008).

O CAA é formulado com aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade, permitindo que o concreto flua com facilidade e preencha as formas sem segregação ou vazios. Sua utilização em construções urbanas e grandes obras tornou-se comum, especialmente para estruturas com formas irregulares, como colunas finas e paredes de concreto aparente (Okamura; Ouchi, 2003).

Mehta e Aïtcin (1990) sugeriram o termo CAD para misturas que possuíssem boa trabalhabilidade, durabilidade e resistência. Este tipo de concreto é projetado para atender a critérios específicos além da resistência mecânica, elevada resistência química, baixa permeabilidade e resistência a intempéries e agentes agressivos.

Ainda na mesma década, Richard e Cheyrezy (1994) produziram o CPR o qual apresentou resistência à compressão na ordem de 150-200MPa por meio de utilização de partículas mais finas, adições minerais e tratamento térmico. No mesmo ano, De Larrard e Sedran (1994) publicaram sobre o conceito de UHPC otimizando uma mistura de CPR por meio do empacotamento de grãos.

Embora o conceito de UHPC tenha surgido nesta época, o American Concrete Institute (ACI) publicou o documento: ACI 239R-12: Report on Ultra-high Performance Concrete (2012), como uma das primeiras tentativas do ACI de organizar o conhecimento existente sobre este concreto e fornecer diretrizes gerais para pesquisadores e profissionais da área.

Essa publicação definiu o UHPC como um material avançado com resistência compressiva superior a 120MPa, durabilidade elevada e, geralmente, reforçado com fibras para melhorar a tenacidade. O relatório também destacou o desenvolvimento do *UHPC* como um avanço significativo em relação ao CAD.

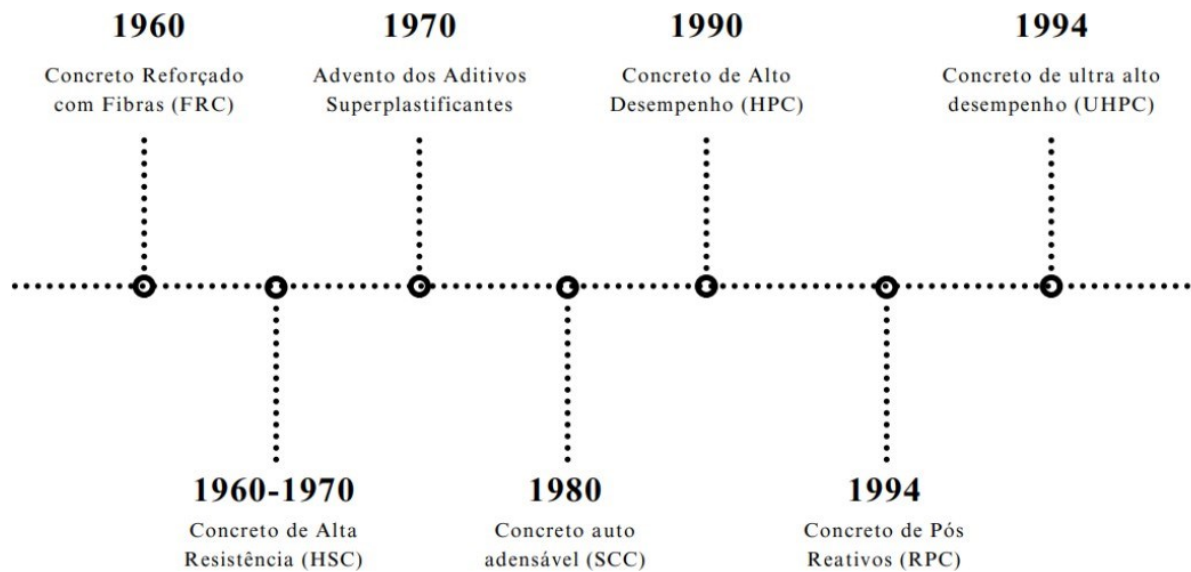
Só em 2018, a definição de UHPC foi formalizada pelo ACI, no documento ACI 239R-18: *Ultra-high-Performance Concrete: An Emerging Technology* (2018) que destacou características principais do *UHPC* como resistência à compressão superior a 150MPa, uso de fibras para melhorar o desempenho mecânico e a tenacidade, baixa permeabilidade resultando em alta durabilidade.

Atualmente, o Brasil deu um passo importante para a consolidação do uso do *UHPC* com a publicação da norma técnica nacional ABNT NBR 17246 (2025). Essa norma está organizada em quatro partes, contemplando aspectos de classificação, especificações, requisitos, métodos de ensaio e controle de qualidade. Em sua primeira parte (NBR 17246-1), o *UHPC* é definido como um concreto de matriz cimentícia homogênea, de baixa porosidade, com resistência à compressão superior a 100MPa e comportamento dúctil à tração.

A Figura 2.1 ilustra a linha do tempo sobre o auge da evolução do concreto até o momento: o Concreto de Ultra-Alto Desempenho, conhecido por suas características excepcionais. Este material é amplamente utilizado em obras de alta performance, como pontes esbeltas, elementos arquitetônicos de formas complexas e aplicações que demandam resistência extrema ao desgaste e ao impacto (Graybeal, 2014).

Richard e Cheyrezy (1994) produziram o concreto de pós reativos utilizando como reforço 2,5% de fibras de aço retas, com diâmetro de 0,15mm e comprimento de 13mm, alcançando uma resistência à compressão média de 218MPa e resistência a flexão entre 30 e 60MPa. Com base nesta e em outras pesquisas desta época, a tecnologia foi patenteada e nomeada Ductal® e está disponível comercialmente na América do Norte desde 2001 de propriedade da Lafarge S.A., Bouygues Construction e Rhodia Chemie S.A. (Perry; Zakariasen, 2003).

Figura 2.1: Linha do tempo da evolução do concreto



Fonte: Autora, 2026.

A partir dos anos 2000, houve um interesse crescente em diversificar os tipos de fibras utilizadas no UHPC. Fibras sintéticas, como polipropileno, álcool polivinílico e polietileno, vem sendo incorporadas para melhorar propriedades específicas, como resistência ao fogo e estabilidade volumétrica. Como exemplo, estudos demonstraram que fibras de polipropileno ajudavam a reduzir a probabilidade do efeito de spalling explosivo no concreto ao ser submetido a altas temperaturas, criando túneis no material, permitindo a saída do vapor (Gong *et al.*, 2022).

Os materiais de carbono de alta tecnologia estão sendo adicionados a argamassas e concretos em escalas nano, micro e milimétrica (Meng; Khayat, 2018; Lamba; Raj; Singh, 2023) para aprimorar as propriedades mecânica da microestrutura, aumentar a tenacidade, controlar o crescimento de microfissuras, melhorar a ductilidade, aumentar a condutividade térmica e a eficácia da blindagem eletromagnética, além de fortalecer a capacidade de absorção de energia e a resistência a abrasão (Peyvandi *et al.*, 2013; Ahmed *et al.*, 2014; Ladani *et al.*, 2016; Jung *et al.*, 2020).

Os materiais de carbono destacam-se como reforços excepcionais para concretos de alto desempenho devido às suas características únicas. São extremamente leves e apresentam elevado módulo e resistência específicos, aliados a uma alta tenacidade.

Além disso, possuem excelente resistência química, não sendo afetados pela umidade nem por uma ampla gama de solventes, ácidos e bases, o que contribui para sua durabilidade em ambientes agressivos (Coleman *et al.*, 2006; Callister Jr., 2018).

Mais recentemente, pesquisas tem focado na sustentabilidade e na viabilidade econômica. Fibras recicladas e fibras vegetais estão sendo investigadas como alternativas para reduzir custos e impactos ambientais. Ao mesmo tempo, avanços no design de misturas estão permitindo um controle ainda mais preciso das propriedades do UHPC, maximizando a eficiência das fibras incorporadas (Gong *et al.*, 2022).

As fibras de carbono têm sido incorporadas a matrizes cimentícias tanto com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas quanto de torná-lo um material eletricamente condutivo e intrinsecamente inteligente, capaz de permitir uma avaliação não destrutiva para o monitoramento de falhas, uma vez que a resistividade elétrica do compósito varia em função da geração, propagação e fechamento de fissuras (Chen; Chung, 1993). De forma complementar, trabalhos mais recentes, como o de Belli *et al.* (2020) confirmam que fibras de carbono recicladas podem aumentar a resistência à tração e flexão por cisalhamento.

2.2 Fibras de carbono como reforço em matrizes cimentícias

Historicamente, a introdução das fibras de carbono em matrizes cimentícias decorreu da necessidade de superar as limitações apresentadas pelos materiais de reforço então disponíveis. As fibras de aço, embora eficientes no ganho de resistência, apresentam elevada massa específica e suscetibilidade à corrosão; as fibras poliméricas, apesar do baixo custo e ampla disponibilidade, possuem módulo de elasticidade reduzido e são inflamáveis; já as fibras de vidro sofrem degradação em meio alcalino, o que compromete sua durabilidade a longo prazo (Ali; Majumdar; Rayment, 1972).

Nesse contexto, as fibras de carbono surgiram como uma solução promissora, já que apresentam vantagens significativas nos compósitos de matriz cimentícia em relação a fibras de aço, polipropileno ou vidro, incluindo facilidade de acabamento, durabilidade frente às intempéries, possibilidade de incorporação em altas frações volumétricas e estabilidade química em ambientes alcalinos e agressivos (Banthia, 1991).

Outras vantagens das fibras de carbono estão intrinsicamente relacionadas às suas propriedades mecânicas superiores, incluindo baixo peso específico, elevada resistência específica, alto módulo de elasticidade e elevada tenacidade, o que possibilita melhorias expressivas tanto no desempenho mecânico quanto nas propriedades elétricas das matrizes cimentícias (Reda; Shrive; Gillott, 1999).

A Tabela 2.1 apresenta um comparativo entre as propriedades típicas destas fibras. Observa-se que, mesmo apresentando baixa densidade, a fibra de carbono se destaca por suas excelentes propriedades mecânicas, evidenciando seu elevado potencial como material de reforço em matrizes cimentícias.

Tabela 2.1: Propriedades típicas físicas e mecânicas das fibras

Fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Polipropileno	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Carbono	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2006).

Nos anos de 1990, a fibra de carbono passou a ser estudada como um material capaz de transformar o concreto em um compósito inteligente, com potencial para detectar falhas de forma não destrutiva. Nesse contexto, Chen e Chung (1993) incorporaram fibras curtas de carbono, com comprimento nominal de 5,1mm, em teores entre 0,2 e 0,4% em relação ao peso de cimento, aplicados a diferentes argamassas. Os autores observaram que as argamassas reforçadas apresentaram variação significativa de resistividade elétrica quando submetidas à compressão até a fratura. Essa resposta elétrica está diretamente associada à resistividade volumétrica do compósito, a qual se modifica durante a formação, propagação e até mesmo no fechamento das fissuras.

Em vista disso, o emprego da fibra de carbono como reforço em matrizes cimentícias passou a ser compreendido como um marco no desenvolvimento de materiais multifuncionais, capazes de reunir propriedades estruturais e funcionais.

De acordo com Chung (2000), as principais vantagens observadas em termos estruturais incluem: aumento da resistência à tração e à flexão, maior ductilidade à tração e tenacidade à flexão, aumento da resistência a impactos, redução da retração por secagem e melhoria da durabilidade frente a ciclos de congelamento e degelo.

Em contrapartida, a utilização de fibras de carbono em matrizes cimentícias também apresenta algumas limitações. O efeito positivo da adição dessas fibras depende diretamente da fração volumétrica incorporada, podendo ser comprometido quando o teor é excessivo, uma vez que o aumento do conteúdo de fibras favorece a formação de vazios de ar, os quais reduzem propriedades importantes, como a resistência à compressão (Chung, 2000).

Além disso, a trabalhabilidade da mistura tende a diminuir conforme cresce a quantidade de fibras, ao mesmo tempo em que os custos do material se elevam de forma proporcional. Por esse motivo, recomenda-se a utilização de teores relativamente baixos, sendo que adições em torno de 0,2% em volume se mostraram eficazes, embora sejam mais comuns proporções acima de 1% (Wang, C. *et al.*, 2008).

Mastali, Dalvand e Sattarifard (2017) estudaram as propriedades mecânicas do concreto autoadensável com a adição de fibras de carbono reforçadas com polímero recicladas. Os autores observaram que, ao comparar a resistência à compressão e a porosidade das misturas, as fibras de carbono apresentaram grande potencial para limitar a propagação de fissuras, compensando os efeitos negativos do aumento da porosidade. Consequentemente, verificou-se uma tendência de aumento das resistências nas misturas reforçadas, associada ao incremento tanto do teor quanto do comprimento das fibras recicladas.

Pesquisas emergentes têm buscado superar limitações clássicas e expandir as funcionalidades do compósito cimentício reforçado com fibras de carbono. Estudos recentes vêm associando fibras de carbono a nanomateriais, como grafeno e nanotubos de carbono, para potencializar propriedades mecânicas e funcionais, além de melhorar a dispersão e a aderência fibra-matriz (Wang, L. *et al.*, 2022; Cimesa; Moustafa, 2022; Huang *et al.*, 2023).

A otimização mecânica e a funcionalização elétrica e térmica dos compósitos com fibras de carbono em bases cimentícias, são tópicos de estudos recentes. Trabalhos experimentais de Guo *et al.* (2021), investigaram o desempenho residual do concreto

reforçado com fibras de carbono após submetê-lo a altas temperaturas (400°C, 600°C e 800°C), evidenciando ganhos em resistência à flexão e tração, embora com impacto limitado na resistência à compressão, reforçando o potencial do material em situações extremas.

O estudo de Gwon, Kim e Shin (2023) contribui para o avanço dos compósitos cimentícios com fibras de carbono e negro de fumo ao demonstrar que a combinação de 0,4% de fibra de carbono e 0,8% de negro de fumo reduz significativamente a resistividade elétrica e potencializa o autoaquecimento, alcançando até 77°C. Os autores evidenciam que esse aquecimento interno, promovido pela passagem de corrente elétrica através dos agentes condutivos (efeito Joule), acelera a hidratação do cimento — processo denominado cura elétrica. Nessa condição, observou-se uma redução de aproximadamente 11% na porosidade e maior formação de fases hidratadas em apenas 24 horas, indicando potencial para aplicações em cura acelerada e aumento da durabilidade de estruturas cimentícias.

As fibras de carbono têm se destacado como adições eficazes para blindagem contra interferência eletromagnética em compósitos cimentícios, pois reduzem a resistividade elétrica e favorecem a continuidade de caminhos condutivos. Yoo *et al.* (2020) demonstraram que fibras de carbono, com diâmetro entre 5 e 100µm, são mais eficientes para blindagem do que macrofibras de aço ou nanofibras, além de conferirem maior ductilidade e tenacidade, ainda que com discreta redução na resistência à flexão. Essas fibras atuam por reflexão e absorção das ondas eletromagnéticas e mantêm desempenho mesmo em compósitos microfissurados.

Mais recentemente, Alyami *et al.* (2025) validaram experimentalmente um modelo matemático preditivo capaz de estimar a eficácia de blindagem em função da condutividade elétrica, permeabilidade magnética, espessura e frequência da radiação incidente, reforçando o papel multifuncional das fibras de carbono em materiais cimentícios.

O trabalho de Patchen, Young e Penumadu (2022) se apresentou como pioneiro ao utilizar fibras de carbono recicladas na produção de concretos de ultra-alto desempenho. A partir de pré-misturas de materiais convencionais, como: cimento, areia, pó de quartzo, sílica ativa e aditivo redutor de água de alto desempenho, combinados inicialmente com fibras de aço, os pesquisadores incorporaram fibras de carbono recicladas e compararam seu desempenho com fibras de carbono virgens.

Os resultados evidenciaram que as fibras recicladas, embora apresentem defeitos superficiais e maior heterogeneidade, foram capazes de melhorar significativamente as

propriedades mecânicas do UHPC, proporcionando desempenho superior em resistência à compressão em relação ao concreto de referência sem fibras e às misturas reforçadas com fibras de aço.

2.3 Princípios básicos do UHPC

O concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras é uma evolução do concreto tradicional, projetado para oferecer propriedades superiores em termos de resistência mecânica, durabilidade e desempenho estrutural, especialmente em situações exigentes. Ele combina a alta resistência do concreto com a tenacidade das fibras, criando um material que é robusto e eficiente para diversas aplicações. Os princípios básicos e os fundamentos teóricos deste tipo de compósito podem ser compreendidos a partir de vários aspectos, descritos nos tópicos seguintes.

2.3.1 Homogeneidade

No concreto convencional, a rigidez do material é reduzida em função da zona de transição que é a camada entre as partículas grandes de agregado e a pasta de cimento hidratada, parte mais frágil do material por se tratar de uma zona enfraquecida que contém vazios e microfissuras (Mehta; Monteiro, 2008).

Dessa forma, o conceito fundamental para a produção de concretos de ultra-alto desempenho é a eliminação da zona de transição, alcançada pela exclusão de agregados graúdos. Esses agregados são responsáveis por grande parte das falhas na microestrutura e por reterem mais água durante a exsudação, o que resulta em uma zona de transição mais pronunciada (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

Eliminando os grãos maiores no concreto, ele será constituído de grãos de pequena dimensão que proporcionarão maior superfície específica, o que consequentemente resultará em maior reatividade química e ligações secundárias pelas forças de Van der Waals, aumentando a homogeneidade da mistura.

Eliminar a zona de transição e aumentar a área superficial dos grãos provoca uma distribuição das cargas incidentes nestes de forma mais homogênea, o que diminui a concentração de tensões em vista de uma possível falha da microestrutura e resulta em

maior resistência última do material (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

2.3.2 Densidade

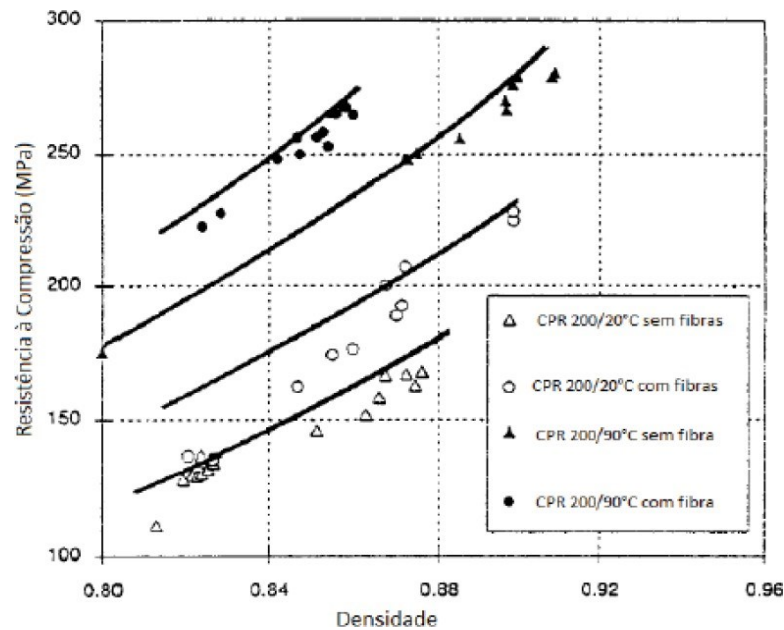
A densidade dos concretos de alto e ultra-alto desempenho não é apenas uma propriedade física, mas sim uma diretriz de projeto e é definida em termos globais pela quantidade de mistura granular, água e aditivo, energia de mistura e vibração eficiente (Vanderlei, 2004). Uma matriz cimentícia altamente compacta, minimiza a porosidade capilar, otimiza a interligação das partículas e resulta em um design de misturas com granulometria otimizada, uso de materiais cimentícios suplementares, como a sílica ativa, e aditivos superplastificantes avançados e polifuncionais.

De acordo com a pesquisa dos pioneiros, Richard e Cheyrezy (1994), a densificação da matriz é obtida por meio do conceito de teoria do empacotamento granular, que maximiza o preenchimento entre partículas de diferentes tamanhos, reduzindo os espaços vazios. Além disso, a adição de sílica ativa desempenha um papel fundamental com a reação pozolânica, promovendo a formação de gel Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) adicional, o que aumenta ainda mais a densidade do microconcreto.

O aumento da densidade da mistura com o empacotamento de partículas faz com que a resistência à compressão também aumente em diferentes misturas que podem ser submetidas ou não à tratamento térmico, como é possível visualizar na Figura 2.2.

A ABNT NBR 17246-1 (2025) Concreto de ultra-alto desempenho Parte 1: Classificação, requisitos e especificação - estabelece um intervalo de densidade específica para o concreto de ultra-alto desempenho entre 2200kg/m^3 e 2800kg/m^3 , incluindo todos os materiais utilizados na mistura.

Figura 2.2: Comparação da resistência à compressão com a densidade do material



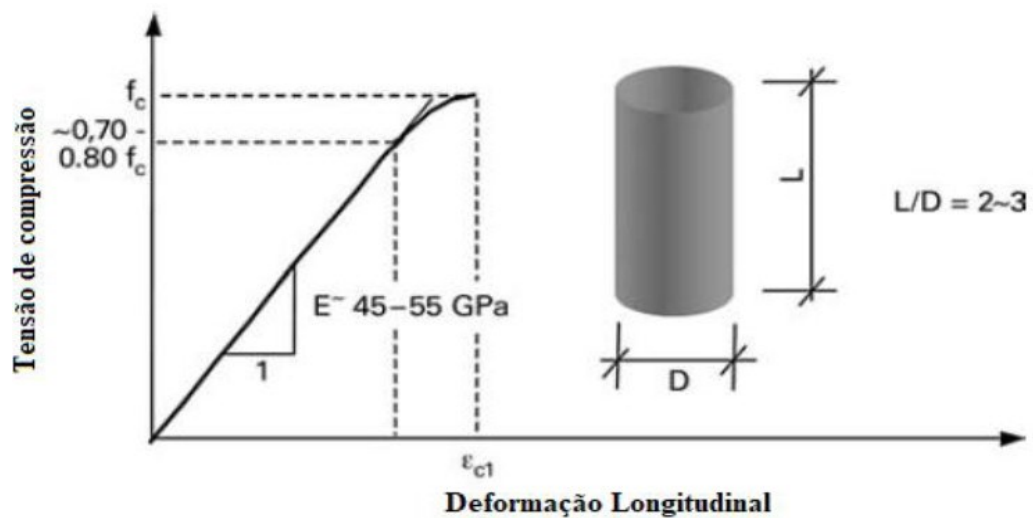
Fonte: Richard e Cheyrezy (1994).

2.3.3 Ductilidade e tenacidade adquirida com adição de fibras

Devido à ausência de mecanismos significativos de redistribuição de tensões, o comportamento do concreto de ultra-alto desempenho sem fibras é elástico linear (Figura 2.3), o que torna a matriz frágil e propensa a falhas abruptas. Essa é uma característica típica de materiais com alta resistência e elevado módulo de elasticidade, que no UHPC pode variar entre 45 e 55GPa (Fehling *et al.*, 2014; McSwain *et al.*, 2018).

A adição de fibras ao concreto de alto e ultra-alto desempenho é uma estratégia para superar essa limitação, pois promove a redistribuição de tensões, retardando a propagação das fissuras e dissipando energia por mecanismos como descolamento, atrito e ruptura. Dessa forma, o comportamento frágil do compósito é transformado em uma resposta mais dúctil e previsível, além de aumentar a capacidade de absorção de energia antes da ruptura, conhecida como tenacidade (Banthia; Trottier, 1995).

Figura 2.3: Diagrama tensão-deformação para o concreto de alto desempenho sem fibras, sob ensaio de compressão uniaxial



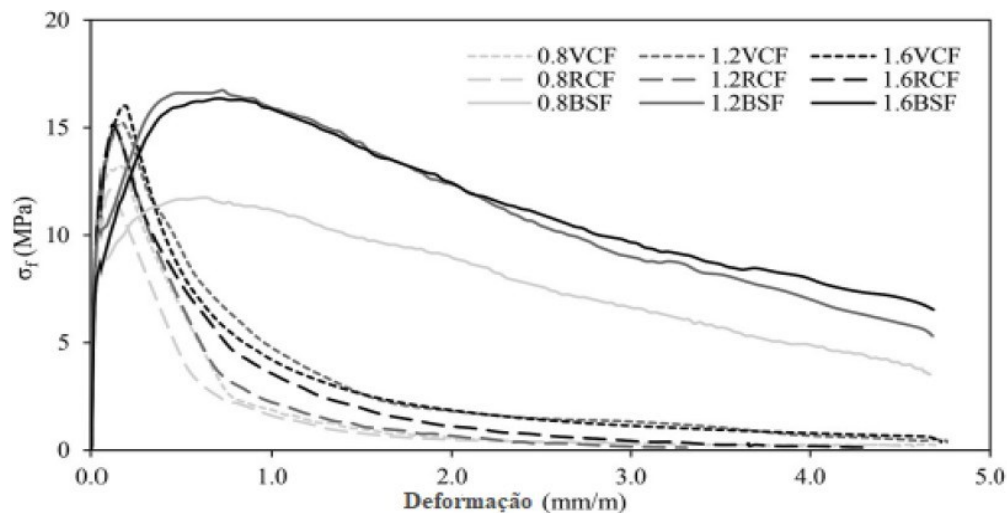
Fonte: Fehling *et al.* (2014).

Em outros termos, as fibras atuam como pontes nos planos de fissuras, permitindo que a matriz suporte tensões adicionais mesmo após o início da fissuração (Banthia; Trottier, 1995). A ductilidade é definida como a capacidade do material, submetido à carga, deformar-se plasticamente até a ruptura, e a adição de fibras cria uma zona de comportamento pós-pico mais ampla, fazendo com que o material apresente um gradiente mais suave de declínio na curva tensão-deformação, o que reduz a brusca transição da resistência máxima para a falha completa (Wille; Naaman, 2012).

Belli *et al.* (2020), investigaram o uso de três tipos de fibras condutoras: Fibras de Carbono Virgem (VCF), Fibras de Carbono Recicladas (RCF) e Fibras de Aço (BSF), incorporadas em argamassas de cimento para desenvolver materiais multifuncionais com alta condutividade elétrica, resistência mecânica aprimorada e maior durabilidade.

Os resultados do estudo indicam que as fibras de carbono e aço contribuíram positivamente para o comportamento pós-fissuração das argamassas reforçadas. As fibras de aço, devido a sua alta resistência à tração, aumentaram significativamente a ductilidade e a capacidade de suporte de carga após a fissuração. Por outro lado, as fibras de carbono, especialmente as recicladas, também melhoraram o comportamento pós-fissuração (Figura 2.4), embora de forma mais moderada, devido à sua capacidade de atuar como ponte de microfissuras, melhorando a ductilidade geral do material.

Figura 2.4: Curvas tensão de flexão-deformação com diferentes teores de fibras de aço e carbono



Fonte: Adaptado de Belli *et al.* (2020).

2.4 Propriedades do UHPC

O concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras tem destaque devido suas excepcionais propriedades mecânicas, durabilidade e desempenho frente as mais diversas situações. Neste tópico, serão descritas as propriedades deste compósito.

2.4.1 Propriedades mecânicas

O estudo das propriedades mecânicas do UHPC é essencial para compreender sua aplicabilidade em diferentes etapas construtivas e de serviço. A resistência, a rigidez e a capacidade de deformação desse material apresentam evolução diretamente relacionada ao processo de hidratação, o que influencia operações críticas como a desforma, protensão e o controle de fissuração (Habel *et al.*, 2006).

2.4.1.1 Resistência à compressão

A resistência é um importante indicador de qualidade do concreto, pois tem relação direta com a estrutura da pasta de cimento hidratada.

A resistência à compressão, especificamente, é a propriedade mecânica de referência na análise das outras propriedades e é amplamente utilizada na classificação, especificação, avaliação e acompanhamento de qualidade do concreto. São vários os fatores que influenciam significativamente a resistência à compressão medida no UHPC:

- **Propriedades e proporções dos materiais constituintes:** a qualidade dos agregados e suas características como angulosidade, absorção de água e textura; a escolha do material cimentício suplementar de grãos mais finos que os do cimento; a pasta de cimento e a qualidade dos hidratos formados; a ligação entre a pasta e o agregado que está intimamente relacionada a relação água/materiais cimentícios; a composição e a estrutura molecular do aditivo superplastificante a base de Policarboxilato à base de éter (PCE) ou do aditivo polifuncional; o teor de fibras, seu comprimento e sua relação comprimento/diâmetro.
- **Porosidade:** os poros e as coalescências formadas afetam a densidade e a integridade da matriz do concreto, pois enfraquecem a coesão entre as partículas de cimento e permitem a passagem de agentes agressivos o que afeta diretamente a resistência à compressão e durabilidade (Powers, 1958).
- **Grau de hidratação:** está relacionado a formação e à densidade do gel de C-S-H, que tem elevada responsabilidade na resistência do concreto. No caso do UHPC, caracterizado por ter uma matriz densa devido à sua composição de baixa relação água/materiais cimentícios, é essencial garantir bom grau de hidratação para otimizar a resistência (Dong *et al.*, 2024).
- **Condições de teste:** adensamento dos corpos de prova; condições de umidade; idade de rompimento; taxa de carregamento aplicada no ensaio, e a geometria dos corpos de prova, uma vez que corpos de prova cilíndricos tendem a apresentar resistências 20% a 25% menores do que corpos de prova cúbicos (Shah; Ahmad, 1994).

No concreto convencional a evolução das fissuras é dada até a tensão máxima sob compressão uniaxial, porém, no UHPC este comportamento também é esperado, mas o momento de ocorrência e a escala são diferentes. Estas fissuras surgem na ligação do agregado com a matriz e começam a se propagar formando uma rede contínua de fissuras em níveis de tensão entre 70% e 90% da tensão máxima (Krahl, 2018).

A propagação de fissuras no UHPC é influenciada pela interação entre porosidade, microfissuras e grãos de agregado. Sob tensões, as fissuras se formam principalmente ao redor dos poros, devido à concentração de tensões nesses pontos, e se desenvolvem

rapidamente. Os grãos de agregado ajudam a distribuir as cargas de forma mais uniforme, retardando a propagação das fissuras. No entanto, as fissuras se propagam rapidamente ao redor dos grãos, consumindo mais energia (Krahl, 2018).

Com a adição de fibras, as interações entre a matriz e as fibras aumentam a ductilidade do concreto e sua resistência ao avanço de fissuras. Essas interações envolvem aspectos físicos e químicos, como a adesão na superfície, a fricção durante o deslizamento e a ancoragem mecânica das fibras na matriz (Krahl, 2018).

Durante a propagação de microfissuras na matriz cimentícia sob carregamento, as fibras atuam como elementos de ponte, permitindo que o material continue a suportar tensões mesmo após a fissuração inicial. A elevada resistência de aderência entre as fibras de carbono e a matriz cimentícia possibilita a transferência eficiente de tensões até o limite de tração da fibra. Esse mecanismo restringe a abertura das fissuras e contribui significativamente para a elevada resistência mecânica, bem como à compressão, observada nos compósitos UHPC (Reda; Shrive; Gillott, 1999).

2.4.1.2 Resistência à tração

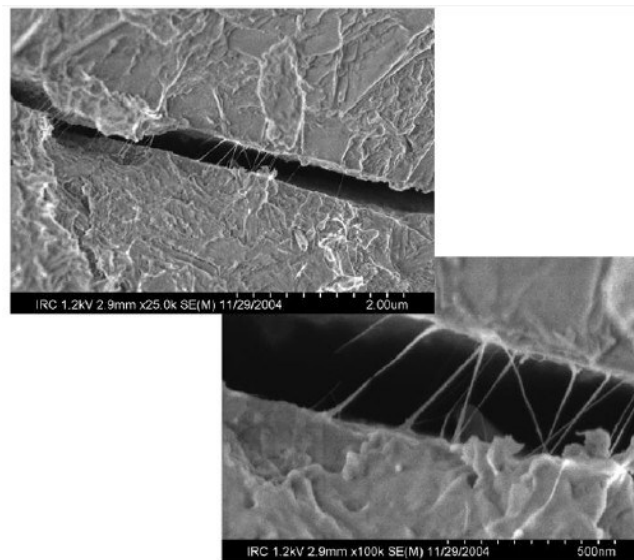
Diferente do concreto convencional em que a resistência a tração é baixa e são necessários vergalhões de aço para reforço passivo e ativo, o UHPC apresenta a capacidade de suportar tensões significativas após o aparecimento da primeira fissura. Esse comportamento é resultado da interação eficiente entre a matriz cimentícia de alta densidade e as fibras incorporadas ao material, permitindo o desenvolvimento de mecanismos que aumentam a ductilidade e a tenacidade.

Como as fissuras são na escala de nanômetro e micrômetros, as fibras e nanomateriais dessa ordem reforçam o UHPC por meio do efeito de ponteamto e preenchimento de poros, como pode ser claramente visualizado na Figura 2.5, impactando também em incremento na resistência à tração (Makar; Margeson; Luh, 2005).

As fibras desempenham um papel importante no processo de fratura do material, ativando o mecanismo de pull-out, em que a fibra envolta pela matriz é arrancada sob a ação de uma força aplicada.

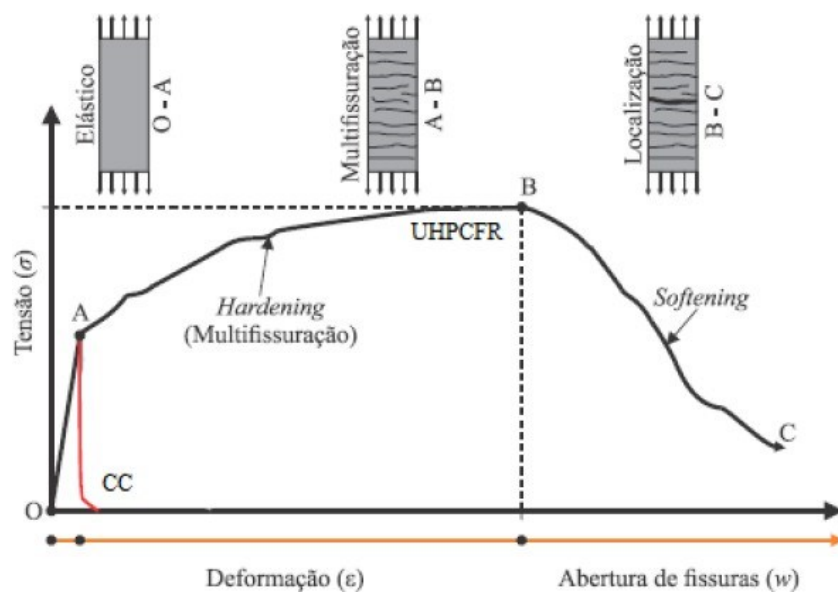
Para compreender como as fibras contribuem para a ductilidade, resistência residual e absorção de energia no UHPC, Naaman (2008) explica o comportamento de encruamento (endurecimento sob deformação) após a fissuração obtido na curva de tensão-deformação dos compósitos reforçados com fibras, como mostra a Figura 2.6.

Figura 2.5: Efeito de ponteamento de nanotubo de carbono entre as superfícies de fissuração



Fonte: Makar, Margeson e Luh (2005).

Figura 2.6: Resposta à tração de compósitos cimentícios reforçados com fibras



Fonte: Adaptado de Torres (2022).

Com a aplicação da tensão de tração, ocorre inicialmente a fase elástica, desde a origem até o ponto A. Os defeitos presentes nas primeiras idades do concreto são frequentemente atribuídos a processos como segregação durante a moldagem, retração e fissuras térmicas. À medida que o esforço é aplicado, essas descontinuidades começam a se propagar e a se interconectar a partir dos poros da matriz.

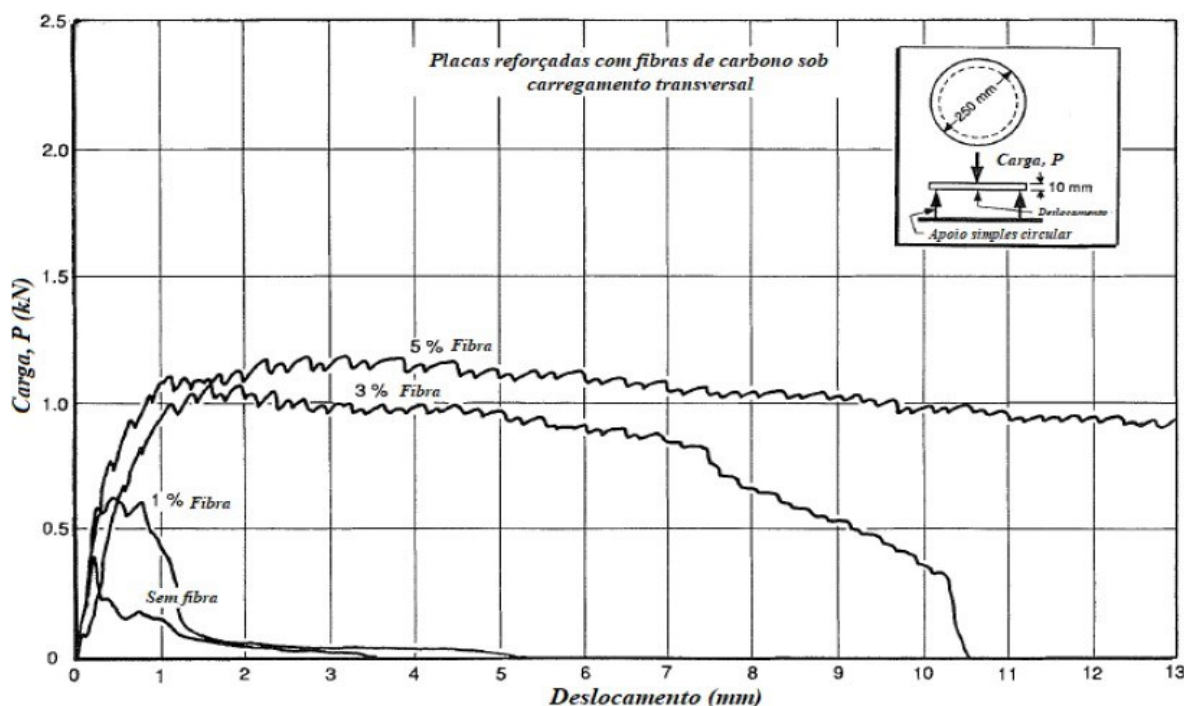
Nesse processo, ativa-se o mecanismo de arrancamento (*pull-out*) das fibras, que restringe a abertura das fissuras. Esse fenômeno caracteriza a fase de *Hardening* (endurecimento sob deformação). Em seguida, uma das fissuras começa aumentar sua abertura em maior proporção com relação às outras, causando a localização, que identifica a fase de *Softening* entre o trecho B e C. Nesta fase, a tensão máxima das múltiplas fibras sendo arrancadas nessa fissura é atingida e, conseqüentemente, ocorre a diminuição das tensões (Torres, 2022).

Este comportamento de *Hardening* é desejável nas misturas de UHPC uma vez que resulta em uma alta dissipação de energia e em aumento na capacidade de deformação do material, impactando diretamente na durabilidade devido a ocorrência de múltiplas microfissuras (Krahl, 2018).

As fibras de carbono, por sua vez, não apresentam comportamento de *hardening* em matrizes cimentícias com teores inferiores a 2%, valores mais comumente reportados na literatura (Park *et al.*, 2021; Yoo *et al.*, 2020; Belli *et al.*, 2020). Como pode ser observado na Figura 2.4, após o pico de fissuração, o compósito passa a apresentar comportamento de *softening*.

Todavia, Banthia e Sheng (1990) realizaram ensaios de flexão biaxial em placas circulares de 200mm de diâmetro e 10mm de espessura, produzidas com matriz cimentícia e reforçadas com fibras de carbono de 6mm em diferentes teores. Os autores concluíram que, como ilustrado na Figura 2.7, as misturas contendo 3% e 5% de fibras de carbono apresentaram desempenho em *hardening*.

Figura 2.7: Curvas de carga-deslocamento no ponto de aplicação obtidas para placa circulares de concreto reforçado com fibras de carbono sob carregamento transversal



Fonte: Banthia e Sheng (1990).

2.4.1.3 Módulo de Elasticidade

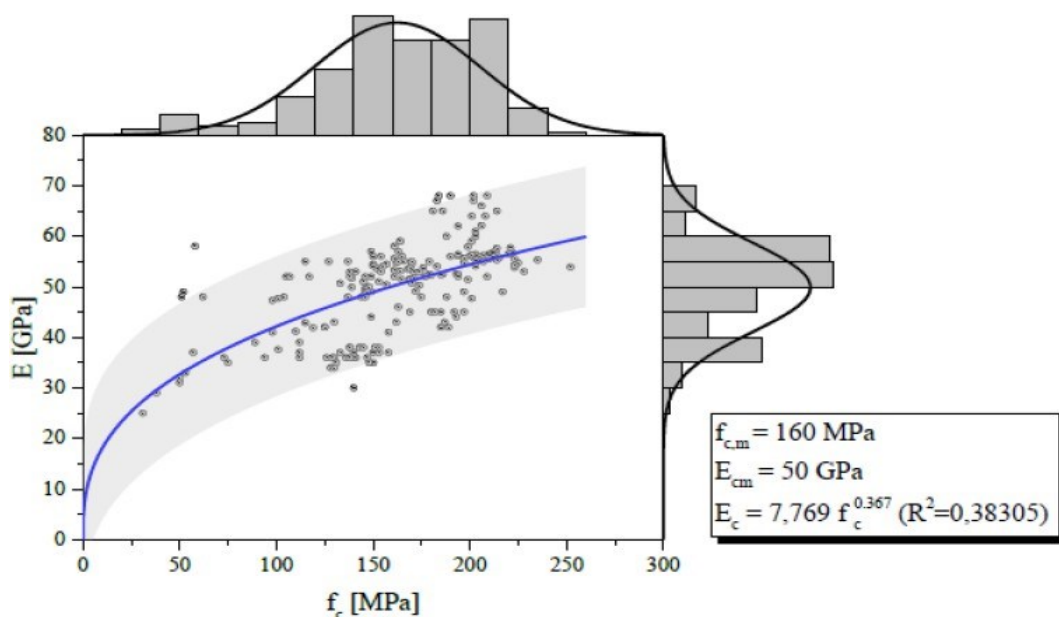
O módulo de elasticidade do UHPC é a capacidade do material de sofrer deformações temporárias sob a ação de uma carga e retornar à sua forma original quando a carga é removida, representando sua resistência à deformação elástica quando submetido a tensões. Essa propriedade está diretamente relacionada à rigidez do material e indica o quanto o concreto se deforma quando submetido a tensões compressivas, sendo também influenciada pela fluência e retração (Alsalman *et al.*, 2017).

O levantamento bibliográfico de Rompa e Gidrão (2020) mostra que o valor usualmente encontrado na literatura para o módulo de elasticidade do UHPC é na faixa de 37GPa a 68GPa, com valor médio de aproximadamente 50GPa, conforme a Figura 2.8. O autor também conclui por meio do levantamento bibliográfico e observações experimentais, que a melhora da resistência e das demais propriedades mecânicas deste concreto não é acompanhada por considerável aumento do módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade, parâmetro chave para o projeto e análise de estruturas de concreto, é necessário ao estimar a deflexão dos elementos para garantir que os requisitos

de serviço sejam atendidos. Este parâmetro pode ser determinado por meio de testes laboratoriais, ou, mais frequentemente, é estimado com base na resistência à compressão (Alsaman *et al.*, 2017).

Figura 2.8: Distribuição dos valores de Módulo de Elasticidade no UHPC obtidos por Rompa e Gidrão (2020) por levantamento bibliográfico



Fonte: Rompa e Gidrão (2020).

2.4.2 Propriedades Intrínsecas ao UHPC

O aumento da ductilidade e da resistência conseguido por meio da densa matriz nas misturas de UHPC resulta em propriedades notáveis de durabilidade e desempenho.

2.4.2.1 Durabilidade

A otimização da proporção dos materiais constituintes do concreto resulta em um compósito com maior resistência mecânica, boa trabalhabilidade, menor porosidade e, consequentemente maior durabilidade. Segundo o ACI 201, a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

A durabilidade do concreto está relacionada à sua vida útil, o que possui implicações socioeconômicas significativas. O custo de reparo e substituição das estruturas devido à

falha nos materiais gera altas despesas. Além disso, a durabilidade é vista sob uma perspectiva ecológica, uma vez que materiais mais duráveis contribuem para a conservação de recursos naturais e reduzem a emissão de CO_2 pela indústria cimentícia (Mehta; Monteiro, 2008).

Os fatores que impactam a durabilidade do concreto podem ser intrínsecos, como sua qualidade e densidade, ou extrínsecos, como a corrosão química da pasta de cimento devido ao ataque de águas ácidas, soluções de sulfato, água do mar, além de fatores físicos como fogo, gelo e abrasão. Segundo (Soroka, 1979), a regra geral é que a durabilidade do concreto melhora com o aumento da densidade. No entanto, uma alta densidade por si só nem sempre é suficiente para garantir a durabilidade necessária, e, por isso, o uso de materiais especiais deve ser considerado.

A matriz do UHPC é altamente compacta, devido à utilização de materiais finos e cuidadosamente graduados, como a sílica ativa e o cimento Portland, combinados com uma baixa relação água/cimento. Essa composição reduz significativamente a porosidade do material, dificultando a penetração de agentes agressivos como água, íons cloreto e sulfatos (Richard; Cheyrezy, 1994).

A água é um agente principal na deterioração de estruturas de concreto, pois é o meio mais comum dos agentes agressivos entrarem em contato com o concreto através dos poros, por meio do mecanismo de absorção capilar (Helene, 1993). Ela é responsável pelo transporte de íons agressivos, gerando processos químicos de degradação. Além disso, o concreto é um material essencialmente alcalino devido aos compostos de cálcio formados, o que torna as águas ácidas particularmente danosas para o material (Mehta; Monteiro, 2008).

Estudos sobre a durabilidade do UHPC submetido a ambientes agressivos têm sido frequentes, com o objetivo de entender a capacidade de resistência desse compósito aos ataques externos. Liu *et al.* (2022) investigaram a influência de nanotubos de carbono de paredes múltiplas como fibra de reforço na preparação de concreto de ultra alto desempenho, observando a deterioração ao longo do tempo sob o efeito combinado da erosão por sal e do ciclo de congelamento-descongelamento.

Os autores submeteram o compósito a 1500 ciclos de congelamento e descongelamento com sal, e concluíram que a microestrutura do concreto permaneceu densa, sem alterações significativas na aparência ou na perda de massa.

W. Wang *et al.* (2013) avaliaram a durabilidade de um UHPC após envelhecimento acelerado, incluindo secagem parcial, secagem em estufa a 105°C (estado seco de referência) e tratamento térmico a 200, 300 ou 400°C. Os autores concluíram que este concreto apresenta uma permeabilidade muito baixa e excelente desempenho estrutural, mesmo após tratamentos térmicos severos ou danos localizados. Além disso, destacaram que a distribuição de poros no UHPC é majoritariamente composta por poros menores que 100 nm, localizados nas camadas de C-S-H, o que contribui para sua resistência à penetração de fluidos e ao ataque de agentes agressivos.

2.4.2.2 Desempenho

O desempenho de um concreto de alta performance não se resume apenas à elevados valores de resistência mecânica ou à sua trabalhabilidade, mas sim, à capacidade do concreto de atender, de forma eficiente, exigências específicas de uma aplicação. Por isso um concreto de alto desempenho nem sempre será um concreto apenas de alta resistência e vice-versa.

Para Tutikian, Isaia e Helene (2011), o conceito de desempenho não se limita à resistência mecânica, abrangendo também aspectos como trabalhabilidade, estética, acabamento, integridade estrutural e, acima de tudo, durabilidade. Anteriormente, a resistência à compressão foi amplamente utilizada como o principal critério de avaliação do desempenho do concreto convencional.

No entanto, surge a necessidade de uma abordagem mais abrangente, considerando a deterioração das estruturas, especialmente em ambientes agressivos. A durabilidade, nesse contexto, torna-se um fator essencial para garantir a longevidade das estruturas. Segundo Mehta e Aïtcin (1990), a durabilidade deveria ser priorizada como o principal requisito para alcançar um concreto de alto desempenho.

De acordo também, com estes autores, para ser classificado como concreto de alta performance, um concreto deve atender especificações de impermeabilidade e de estabilidade estrutural. A impermeabilidade do concreto deve ser a primeira linha de defesa contra a penetração de umidade e íons nocivos. Quanto a estabilidade dimensional do concreto, esta depende de propriedades como módulo de elasticidade elevado, pouca retração durante a secagem, baixa fluência e mínimas alterações dimensionais devido a variações de temperatura.

3 Dosagem do UHPC

A proporção adequada dos materiais constituintes do UHPC constitui o princípio fundamental para alcançar uma matriz densa e com porosidade minimizada. Essa otimização permite a produção de um compósito com o menor número de defeitos microestruturais, conforme os seguintes fundamentos:

- i. adotar reduzido consumo de água na mistura;
- ii. excluir a utilização de agregados graúdos para aumentar a homogeneidade;
- iii. maximizar a densidade por meio de uma distribuição granulométrica otimizada;
- iv. utilizar aditivo polifuncional para melhorar a trabalhabilidade;
- v. incorporar fibras para o aprimoramento da ductilidade da matriz.

Neste capítulo, serão apresentados os constituintes do UHPC, suas respectivas funções na microestrutura, e o método de empacotamento para a mistura ideal, baseado no modelo modificado de Andreassen e Andersen.

3.1 Modelo teórico de empacotamento de grãos

De Larrard e Sedran (1994) desenvolveram modelos para prever a densidade de empacotamento de uma mistura de partículas para a obtenção de materiais cimentícios de ultra-alto desempenho. Este método consiste em uma ferramenta de dosagem para melhor seleção e otimização dos constituintes do concreto o que contribui para aumentar a densidade da mistura granular e reduzir o risco de segregação. Quando combinado com uma baixa relação a/c , proporciona ao concreto maior coesão e baixa porosidade como pode ser visualizado na Figura 3.1, elaborada por Formagini (2005), uma comparação entre o empacotamento granular do concreto convencional com a solução visando alto desempenho.

Figura 3.1: Empacotamento granular como solução de dosagem

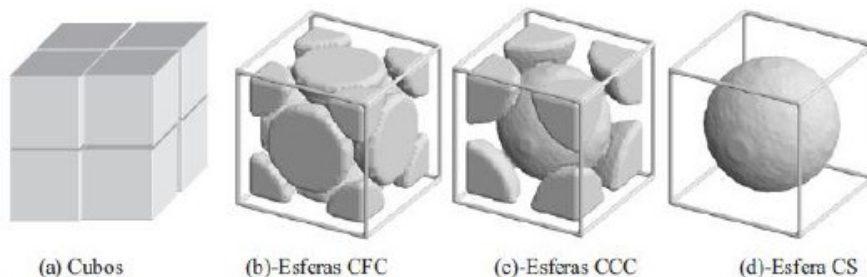


Fonte: Formagini (2005).

Alguns conceitos são fundamentais para atingir um empacotamento ótimo. Primeiramente, o formato das partículas é um fator influente. Está relacionado à compacidade virtual de empacotamento (β), que é o valor máximo de encaixe que pode ser alcançado ao posicionar os grãos um a um em uma mistura granular como ocorre com o cimento e a sílica ativa (Formagini, 2005).

Se as partículas possuem formato de cubos iguais, a compacidade virtual de empacotamento (β) será igual a 1. Partículas esféricas, devido à sua geometria regular, tendem a apresentar uma densidade de empacotamento mais previsível, com valores teóricos de até 74% em arranjo Cúbico de Face Centrada (CFC). Se as mesmas esferas formarem um arranjo Cúbico de Corpo Centrado (CCC), este valor será de 68%, e no caso de um arranjo Cúbico Simples (CS), a compacidade real será de 52% (Formagini, 2005). Estes arranjos são mais bem visualizados na Figura 3.2.

Figura 3.2: Arranjo atômico de partículas na compacidade virtual de empacotamento



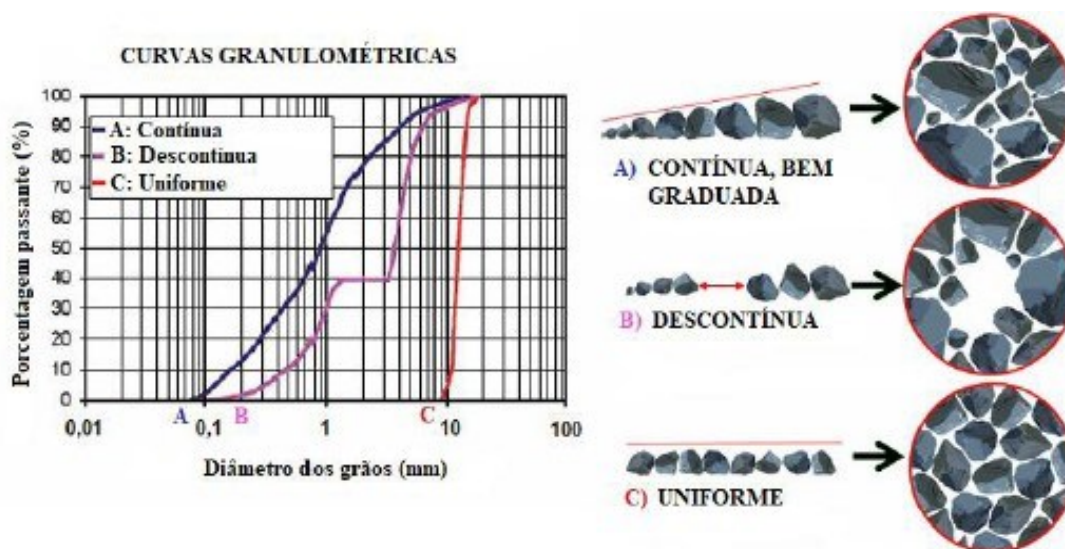
Fonte: Formagini (2005).

Em contrapartida, partículas angulares ou alongadas geram maior atrito interno, dificultando o rearranjo das partículas e resultando em misturas com maior porosidade (Mehta; Monteiro, 2008). Levar em conta a forma das partículas possibilita previsões mais precisas sobre aspectos como a necessidade de água em uma mistura de partículas finas e seu impacto na trabalhabilidade do UHPC.

Outro fator bastante relevante a ser considerado é a distribuição granulométrica, buscando-se uma granulometria contínua, conforme ilustrado na Figura 3.3. Essa abordagem visa combinar partículas de diferentes tamanhos, de maneira a preencher os vazios entre as partículas maiores com partículas menores, otimizando a densidade do material.

Além disso, dois efeitos impactam negativamente a densidade de empacotamento de misturas granulares, estando associados às interações entre partículas de diferentes tamanhos em uma mistura constituída por grãos de diversos tamanhos. O primeiro é o efeito de parede que ocorre quando partículas de maior diâmetro restringem o posicionamento das partículas menores ao redor delas.

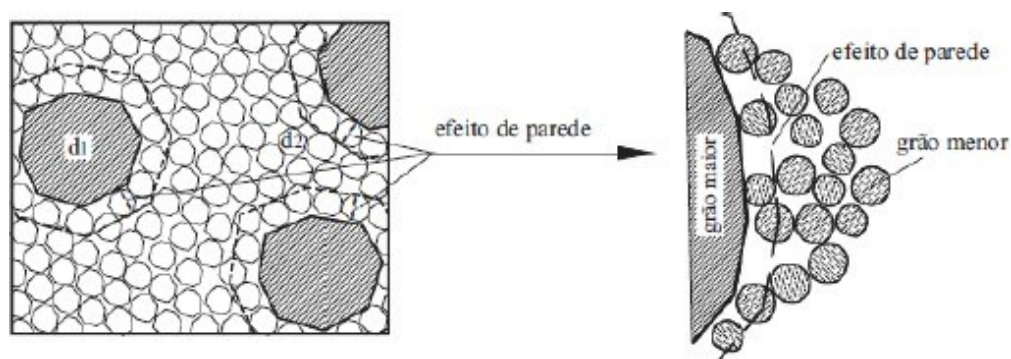
Figura 3.3: Faixa de distribuição das dimensões das partículas



Fonte: Adaptado de Farias e Palmeira (2007).

Essa interação cria regiões próximas às partículas maiores onde a densidade de empacotamento é reduzida devido à limitação no movimento e na acomodação das partículas menores. O efeito de parede, ilustrado na Figura 3.4, é exercido pelas partículas maiores sobre as menores, o que em resumo, reduz a compacidade geral da mistura.

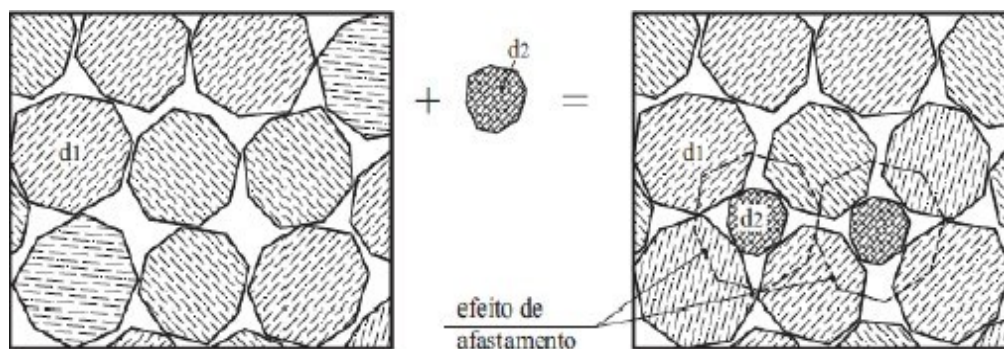
Figura 3.4: Efeito de parede exercido pelo grão maior sobre o grão de menor diâmetro



Fonte: Formagini (2005).

O efeito de afastamento é outro fenômeno que prejudica a compacidade ótima dos grãos, pois resulta da interferência que partículas menores exercem sobre partículas maiores ao preencher os vazios. Essa interação reduz a densidade de empacotamento das partículas maiores, pois as menores impedem que as maiores se acomodem de maneira mais eficiente, como pode se notar na Figura 3.5. Este efeito é causado pela perturbação introduzida na estrutura granular pelas partículas menores.

Figura 3.5: Efeito de afastamento exercido pelo grão menor sobre o grão de diâmetro maior.



Fonte: Formagini (2005).

3.2 Materiais constituintes do UHPC e suas propriedades

A seleção dos materiais para compor a mistura de um concreto de ultra-alto desempenho é um dos processos determinantes, considerando que existem diversos materiais disponíveis no mercado com granulometrias adequadas, mas que, muitas vezes, cumprem apenas a função de preenchimento. Portanto, compreender as propriedades

específicas de cada material é essencial para uma escolha otimizada, visando a obtenção de um produto com desempenho elevado. Neste tópico, serão apresentados os principais materiais que compõem as misturas de pesquisas bem sucedidas de UHPC, juntamente com as propriedades de cada um.

3.2.1 Água

A quantidade de água está intimamente relacionada à resistência mecânica final do concreto, seja ele convencional, mas principalmente, no UHPC. É um princípio básico que, para se obter elevada resistência à compressão toda a água deve ser utilizada para hidratação completa dos materiais cimentícios, para que assim, a porosidade capilar seja reduzida, e haja uma maior densidade da microestrutura e, conseqüentemente, uma maior resistência e durabilidade do concreto.

Porém, a água não pode ser reduzida indefinidamente, pois a trabalhabilidade do concreto precisa ser mantida. No entanto, a quantidade de água deve ser ajustada de modo a permitir uma fluidez adequada para a movimentação do ar, ao mesmo tempo em que se evita a sedimentação das fibras (Torregrosa, 2013).

Valores de água/aglomerante inferiores a 0,42 podem resultar em uma porcentagem de cimento hidratado inferior a 100%, o que implica que o cimento não hidratado atua como um preenchimento (Lima, 2019). Por isso, a utilização de aditivos superplastificantes permite a redução da água/aglomerante sem comprometer a trabalhabilidade e garante melhor dispersão das partículas (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

3.2.2 Agregados

As propriedades dos agregados mais relevantes para o concreto incluem a forma das partículas, a distribuição do tamanho das partículas, as propriedades mecânicas dos agregados e as possíveis reações químicas com a pasta que possam afetar a aderência. Além disso, para garantir alta resistência, é necessário manter uma baixa relação água/cimento, o que exige um controle rigoroso da graduação dos agregados (Shah; Ahmad, 1994).

Como visto na seção 3.1, os agregados utilizados em UHPC devem ser finos e com alta resistência mecânica, já que as partículas maiores podem comprometer a compactação

e a uniformidade da pasta. A granulometria dos agregados deve ser cuidadosamente controlada, uma vez que a distribuição de tamanho das partículas impacta a quantidade de pasta necessária para a hidratação do cimento e a obtenção de uma microestrutura densa.

Deve-se tomar o cuidado de evitar o uso de agregados suscetíveis a reações álcali-agregado ou ao surgimento de fissuras devido a tensões térmicas, mesmo que as baixas relações de água/cimento usadas tendam a reduzir a severidade dessas reações (Shah; Ahmad, 1994). Além disso, a superfície dos agregados deve estar isenta de impurezas, pois a presença de silte ou argila pode comprometer a resistência da ligação entre o cimento e o agregado, além de aumentar a demanda por água na mistura. Por fim, os agregados não devem apresentar uma superfície excessivamente polida, como frequentemente ocorre com cascalhos de leitos de rios, já que isso também prejudica a aderência entre o cimento e o agregado (Shah; Ahmad, 1994).

Areia de quartzo finamente moída, com partículas entre 150 μ m e 600 μ m, é amplamente empregada na preparação de UHPC devido às suas propriedades adequadas. A areia de rio é o principal agregado miúdo utilizado, mas apresenta partículas com tamanhos de até 4,75mm, sendo o maior diâmetro de 5 a 8 vezes superior ao da areia de quartzo fina. Essa diferença de granulometria pode comprometer a densidade de empacotamento das partículas (Du *et al.*, 2021).

Hasan, Levi e Srinivas (2019) realizaram um programa experimental abrangente para testar uma variedade de misturas de UHPC desenvolvidas com tamanhos máximos de partículas de agregados finos de até 4,75mm e estudar o efeito do tamanho das partículas nas propriedades mecânicas e de durabilidade do UHPC. Eles concluíram que a incorporação de agregados com tamanho máximo de 4,75mm, não afeta significativamente a trabalhabilidade, resistência à compressão, porosidade permeável ou a penetração de íons cloreto, embora possa haver uma leve redução na resistência à tração indireta.

3.2.3 Ligantes

Quando se utiliza um agregado de alta qualidade, a resistência e a permeabilidade do concreto são determinadas pela qualidade da pasta de cimento, a qual é influenciada pelas propriedades físicas e químicas do cimento, pelo tipo e pela quantidade de aditivos químicos e minerais, pela relação água-cimento original e pelo grau de hidratação (Mehta; Aïtcin, 1990). Comercialmente, há uma gama de cimentos disponíveis, com adições de

escória de alto-forno, material pozolânico ou filer calcário. Para a fabricação do UHPC, busca-se os tipos de cimento mais puros possíveis como o Cimento Portland (CP) I ou Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI), o que proporciona maior controle sobre as propriedades do cimento e evita variabilidades que podem impactar negativamente a densidade e a reatividade da matriz. Dentre estas duas opções, o CPV ARI é a melhor alternativa comercial no Brasil.

Este tipo de cimento possui elevada finura, o que aumenta a demanda de água. Em contrapartida, o CPV ARI apresenta alta reatividade, sendo capaz de se hidratar eficientemente mesmo com uma relação água/cimento muito baixa. O CPV ARI é formulado para atingir altas resistências nas primeiras idades, que é uma característica importante para o UHPC, uma vez que este concreto requer uma matriz densa e resistente para suportar elevadas cargas e esforços mecânicos.

Quimicamente, é preferível utilizar cimentos com baixo teor de Aluminato Tricálcico (C3A), devido à sua rápida reação em contato com a água. Esse comportamento pode resultar em um tempo de pega inicial indesejavelmente curto e na liberação de elevado calor de hidratação, fatores que comprometem as propriedades de concretos com alto consumo de cimento por metro cúbico. Para evitar esses efeitos, recomenda-se que o teor de C3A seja inferior a 3% (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

Como opção para substituição do cimento com o objetivo de reduzir o seu custo, mas principalmente reduzir a pegada de carbono, diminuindo a emissão de Dióxido de Carbono (CO_2) associada à produção do cimento, os Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) são materiais que, quando utilizados em conjunto com o cimento Portland, melhoram as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Alguns exemplos de MCS são a sílica ativa, cinza volante, escória, pó de vidro e cinza de casca de arroz.

Estes materiais podem reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento (reação pozolânica) pois apresentam um alto teor de Dióxido de Silício (SiO_2) e/ou Óxido de Cálcio (CaO) reativo, ou podem apresentar propriedades hidráulicas próprias, contribuindo para a formação de produtos cimentícios, especialmente quando a relação água/cimento é extremamente baixa.

Dentre estes materiais, a sílica ativa é amplamente utilizada na composição do UHPC agindo como um ligante pozolânico, devido ao elevado teor de $SiO_2 > 90\%$. A sílica ativa reage com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando C-S-H mais refinado, que é o principal hidrato responsável pela resistência do concreto.

Estas novas estruturas de C-S-H também contribuem na redução das áreas porosas e, conseqüentemente, para o aumento da resistência mecânica e durabilidade do concreto (Li *et al.*, 2015).

Outro mecanismo químico de ação da sílica ativa é a aceleração da hidratação do cimento, especialmente a hidratação da Alita (C3S), que modifica a reatividade do material ao aumentar a superfície disponível para a nucleação das fases C-S-H. Isso resulta em um desenvolvimento mais rápido da resistência inicial do concreto (Oertel *et al.*, 2014).

O teor usual de sílica ativa no UHPC varia entre 5% e 25% em massa de cimento. Quando a adição de sílica ativa é menor que 10%, melhora a densidade de empacotamento de partículas neste concreto e trabalhabilidade em relação a teores maiores que essa quantidade, pois, quando o teor excede 10%, a trabalhabilidade pode ser significativamente reduzida, uma vez que a alta área de superfície ($> 100.000\text{cm}^2/\text{g}$) da sílica ativa tende a adsorver água livre e o aditivo, o que provoca aglomeração de partículas e inibe a reação do cimento (Du *et al.*, 2021).

Segundo Fehling *et al.* (2014), a quantidade de sílica ativa deve ser limitada ao mínimo necessário para preencher os poros e otimizar a densidade de empacotamento, pois, em excesso, o concreto pode se tornar viscoso e pegajoso. Para evitar esse problema, os aditivos devem ser eficazes na dispersão das partículas de sílica ativa, que tendem a se aglomerar durante o processo de mistura. Caso contrário, todo o trabalho relacionado à otimização da densidade de empacotamento torna-se ineficaz.

3.2.4 *Fillers*

O material que melhor faz a função de preenchimento de microporos na mistura de UHPC é o pó de quartzo, que é uma forma pulverizada de quartzo, um mineral composto principalmente de SiO_2 . É um mineral que apresenta um grão de alta resistência e dureza e é facilmente disponível em uma ampla gama de granulometrias bem definidas com diferentes graus de finura (Fehling *et al.*, 2014).

Em síntese, o pó de quartzo otimiza o sistema de empacotamento do UHPC, promovendo um aumento na densidade da microestrutura, o que eleva a resistência à compressão e reduz a porosidade capilar, melhorando assim a durabilidade do concreto. Além disso, exerce um papel crucial na sustentabilidade e eficiência ambiental, funcionando como substituto parcial do cimento, o que contribui para a diminuição do

impacto ambiental da mistura (Kathirvel; Sreekumaran, 2021).

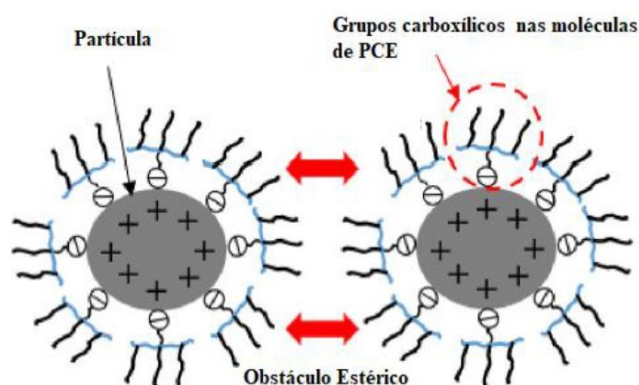
3.2.5 Aditivos químicos

De acordo com a ABNT NBR 11768-1 (2019) - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland, Parte 1: Requisitos - aditivo para concreto é definido como um produto adicionado e misturado ao concreto em quantidades geralmente não superiores a 5% em relação à massa de ligante total contida no concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido.

O aditivo superplastificante, conhecido como Aditivo Redutor de Água (*HRWR*), é um componente obrigatório no UHPC uma vez que tem a função de melhorar a consistência do concreto sem aumentar a demanda de água e reduzir o consumo de cimento para a mesma resistência e consistência. Esta função é alcançada devido a sua elevada capacidade de dispersar as partículas dos finos reativos.

Este aditivo é composto por uma classe de polímeros conhecidos por PCE e seu mecanismo de ação envolve a associação entre suas moléculas e as partículas finas como o cimento e a sílica, que possuem predisposição a se aglomerar. As extremidades negativas das moléculas de PCE são adsorvidas na superfície das partículas de cimento enquanto suas cadeias laterais causam repulsão estérica agindo contra a tendência de aglomeração de tais partículas (Figura 3.6) (Du *et al.*, 2021). Essa interação reduz a viscosidade da mistura, facilitando a sua aplicação e melhorando a densidade do concreto.

Figura 3.6: Mecanismo de ação dos superplastificantes nas partículas do *UHPC*



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

Todavia, a compatibilidade química entre o aditivo e as partículas de cimento deve ser verificada, pois para cada tipo de aditivo existe um ponto de saturação para um dado cimento (Tutikian; Isaia; Helene, 2011).

3.2.6 Fibras

As fibras, são incorporadas ao concreto para reduzir sua fragilidade, atuando na matriz como pontes que transmitem tensões nas fissuras. O mercado oferece uma ampla variedade de fibras fabricadas com diferentes materiais, como aço, vidro, celulose, materiais poliméricos sintéticos e minerais cada uma com características específicas de superfície, textura, geometria e fator de forma. Essas propriedades intrínsecas das fibras influenciam diretamente os mecanismos de interação matriz-fibra, determinando o desempenho mecânico e a durabilidade do UHPC.

Para potencializar os efeitos positivos das fibras na matriz de concreto de ultra-alto desempenho, diversas pesquisas investigam pré-tratamentos na superfície das fibras visando melhorar sua adesão à pasta de cimento. Esses tratamentos incluem o aumento da rugosidade superficial, como nos processos de oxidação gasosa e oxidação eletroquímica (Huang *et al.*, 2023), ou a modificação da hidrofobicidade, tornando a superfície mais hidrofílica por meio de tratamento com ozônio, revestimentos de silano e tratamento ácido (Liu *et al.*, 2022). Essas modificações são relevantes porque a molhabilidade das fibras influencia diretamente sua dispersão nos materiais à base de cimento e sua interação com os hidratos (Huang *et al.*, 2023).

Souza e Motta (2024) realizaram uma revisão sistemática da literatura recente sobre UHPC reforçado com nanomateriais e fibras de carbono e concluíram que o método mais empregado para assegurar a distribuição homogênea dos materiais de reforço na matriz cimentícia é a dispersão aquosa. Esse processo consiste na adição do material de carbono à água, associada ao uso de surfactantes químicos e ao tratamento ultrassônico, garantindo melhor dispersão e consequentemente, homogeneidade.

Martinie, Rossi e Roussel (2010) abordam o fator de forma (relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra, $r = l/d$) como um dos fatores mais críticos que influenciam o comportamento reológico e as propriedades mecânicas de materiais cimentícios reforçados com fibras. De acordo com o estudo dos autores, fibras com alto

fator de forma (maiores que 50) aumentam significativamente a tensão de escoamento e reduzem a fluidez da mistura. No estado endurecido, fibras com alto fator de forma melhoram a resistência à tração e a ductilidade do material. Contudo, um fator de forma excessivamente alto (maiores que 200) pode comprometer a homogeneidade da mistura e facilitar a formação de grumos.

O teor ótimo de fibras adicionado à mistura de UHPC influencia no equilíbrio da melhoria das propriedades mecânicas e da trabalhabilidade do material. No estudo de Akbar *et al.* (2021), sobre a influência das RCF nos compósitos de cimento, foram selecionadas seis frações de volume de fibra diferentes, variando de 0,25% a 1,5%, com uma taxa crescente de 0,25%, para desenvolver compósitos de cimento reforçados com fibras.

Os autores registraram que o grau de hidratação e a água quimicamente combinada aumentaram em 6,64% e 1,59%, respectivamente, com a adição de 1,5% de RCF aos compósitos de cimento. O efeito de reforço foi mais evidente com a adição de 1% em volume de RCF, com aumento de 82% na resistência à flexão e 47% na resistência à compressão.

3.2.7 Procedimento de mistura

O processo de mistura do UHPC é dividido em etapas: homogeneização a seco dos finos ativos e agregados, adição de água e aditivos, e, por fim, adição de fibras quando a plasticidade é alcançada. Quanto maior o teor de finos, maior também será o tempo de mistura, pois há um período prolongado de atrito entre partículas sem contato com o fluido. Assim, aumentar o diâmetro do agregado reduz o tempo de mistura (Torregrosa, 2013).

Torregrosa (2013) realizou um estudo sobre o processo de mistura do UHPC adotado por diferentes pesquisadores e concluiu que o tempo de mistura varia entre 8 e 15 minutos. O autor sugere a adição de aditivos em duas etapas: a primeira imediatamente após a adição da água e a segunda após a formação dos aglomerados, visando evitar que todo o PCE fique retido nesses aglomerados. Essa abordagem promove uma maior trabalhabilidade em comparação com a adição única de superplastificante. No entanto, a primeira etapa de adição do aditivo aumenta a demanda de potência devido à pressão capilar gerada durante o processo.

Quando o aglomerante apresenta um teor significativo de C_3A ou Óxido de Alumínio (Al_2O_3), a etapa inicial de hidratação pode causar aglomerações que demandam maior potência do misturador (Schachinger; Schubert; Mazanec, 2004). Esse fator reforça a importância de inserir o aditivo de forma retardada, uma vez que, durante a mistura, ocorre a formação inicial de cristais de etringita com dimensões variando entre 300 e 500nm (Schiebl *et al.*, 2010).

Durante a mistura, o consumo de energia diminui à medida que os aglomerados são destruídos, até atingir o tempo de estabilização, após o qual a fluidez permanece constante antes de iniciar a mistura excessiva, que pode causar erosão de partículas e perda de resistência. Velocidades mais rápidas de rotação são úteis no início, mas devem ser reduzidas após o concreto se tornar fluido para evitar ar aprisionado (Torregrosa, 2013).

A ordem de mistura pode variar conforme a dosagem. Fibras podem ser adicionadas na mistura seca ou de forma controlada para evitar aglomerações. Testes prévios são recomendados para adaptar o processo ao misturador utilizado. A mistura inadequada ou excessiva pode impactar as propriedades reológicas e mecânicas do UHPC.

3.3 Dosagem de UHPC com modelo de empacotamento de grãos de Andreassen e Andersen Modificado

A dosagem do UHPC requer uma abordagem precisa para garantir a maximização da compactação do esqueleto granular, reduzindo os vazios e otimizando a eficiência do material. Em vista dessa necessidade, Dinger e Funk (1992) atualizaram o modelo de empacotamento de grãos proposto por Andreassen e Andersen (1930) que considerava o empacotamento ideal quando o menor diâmetro da partícula for próximo de zero, o que não acontece na prática.

O modelo original de Andreassen e Andersen (A&A) utiliza a Equação 3.1 para descrever a curva granulométrica, propondo uma similaridade entre duas partículas que possuem tamanhos diferentes:

$$P(D) = 100 * \left(\frac{D^q}{D_{\max}^q} \right) \quad (3.1)$$

No entanto, o modelo Andreassen e Andersen Modificado (A&A_{MOD}) introduz o parâmetro $D_{mín}$, que representa o diâmetro mínimo das partículas. Isso é particularmente relevante para misturas de UHPC, que dependem do uso de partículas ultrafinas, como sílica ativa, para alcançar densidade compacta. A fórmula do A&A_{MOD} é:

$$P(D) = 100 * \left(\frac{D^q - D_{mín}^q}{D_{máx}^q - D_{mín}^q} \right) \quad (3.2)$$

Em que:

- $P(D)$: Percentual acumulado passante de finos.
- D : Diâmetro da partícula analisada no empacotamento.
- $D_{máx}$: Diâmetro da maior partícula analisada no empacotamento.
- $D_{mín}$: Diâmetro da menor partícula do empacotamento.
- q : Coeficiente de distribuição ou coeficiente de empacotamento.

Andreassen e Andersen observaram em seus estudos que o maior empacotamento ocorreu quando $q = 0,37$, sendo que q varia entre 0 e 1. Esse valor foi validado posteriormente por simulações computacionais que consideravam partículas esféricas. Quanto maior o teor de finos, maior o valor de q que maximiza a compacidade e quanto maior o desempenho esperado para o concreto, menor o valor de q recomendado pois implica em maior teor de cimento (Torregrosa, 2013).

Na prática, o A&A_{MOD} é usado para equilibrar agregados finos e grossos, garantindo que a distribuição granulométrica maximize a compacidade sem comprometer a trabalhabilidade. A curva granulométrica é representada em gráficos logarítmicos, evidenciando a importância do ajuste fino de $D_{mín}$, $D_{máx}$ e q . Misturas otimizadas utilizam aditivos superplastificantes ou polifuncionais para compensar a baixa relação água/materiais cimentícios, típica de UHPC, que varia entre 0,15 e 0,25.

4 Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais empregados e os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento de UHPC reforçados com fibras de carbono. Inicialmente, descreve-se a seleção dos constituintes do compósito (cimento, sílica ativa não densificada, agregados, aditivo redutor de água e fibras de carbono) com destaque para suas propriedades físicas e químicas, consideradas fundamentais para o desempenho material.

Em seguida, é apresentado o planejamento experimental, adotado com o objetivo de definir o número de ensaios e otimizar o processo de investigação. Para tal, empregou-se o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), o qual permite avaliar de forma simultânea os efeitos individuais, quadráticos e de interação entre os fatores estudados. Além disso, esse delineamento possibilita o ajuste de modelos matemáticos de segunda ordem, os quais constituem a base para a aplicação do Método da Superfície de Respostas (MSR).

Considerando que os experimentos laboratoriais envolvem a influência simultânea de múltiplos fatores, representados por variáveis independentes e variáveis de resposta, o Método de Superfície de Respostas foi empregado como ferramenta estatística e matemática para a modelagem, análise e otimização das misturas de UHPC, permitindo a construção de superfícies e curvas de contorno capazes de descrever o comportamento do material dentro do domínio experimental investigado.

Por fim, são descritos os procedimentos de dosagem, dispersão das fibras, preparo dos materiais, moldagem, cura e execução dos ensaios, contemplando as avaliações do UHPC tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

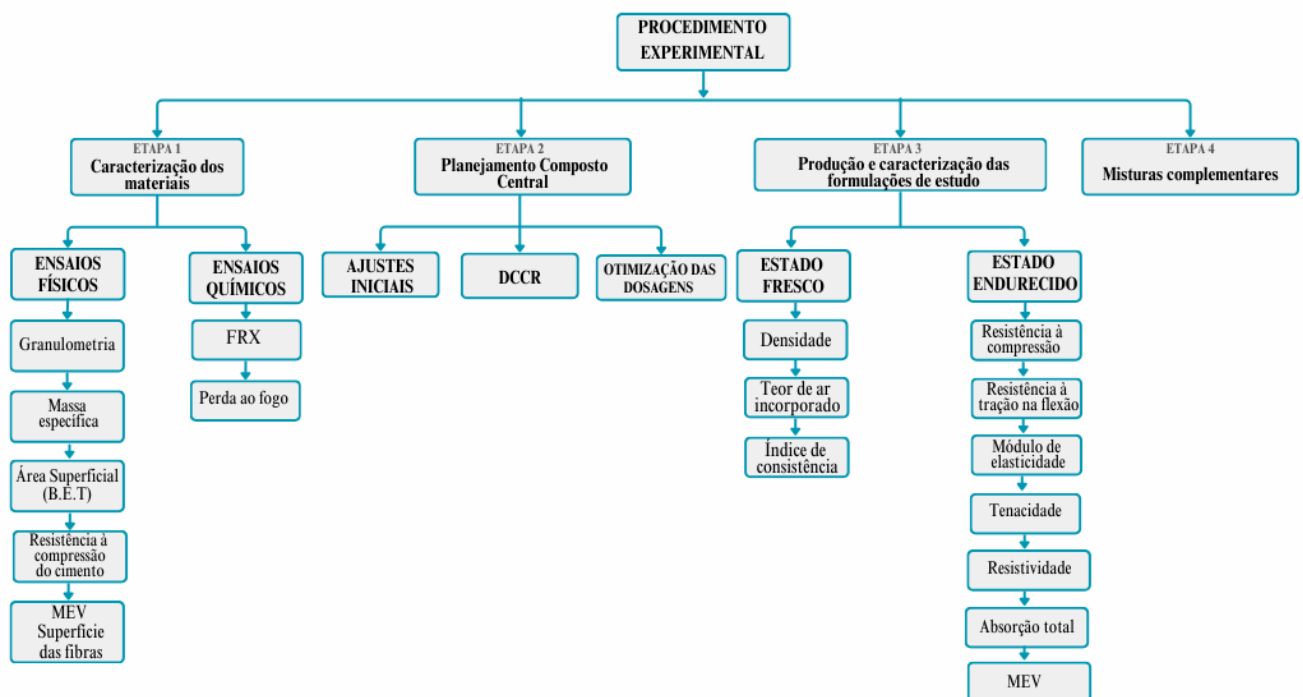
4.1 Programa experimental

O programa experimental desta pesquisa foi estruturado em etapas, conforme a Figura 4.1:

- i. caracterização dos materiais;

- ii. empacotamento otimizado das misturas;
- iii. produção e caracterização das formulações de estudo;
- iv. aplicação do método estatístico e matemático de superfície de respostas;
- v. Misturas complementares.

Figura 4.1: Fluxograma para o procedimento experimental da pesquisa



Fonte: Autora, 2026.

Na primeira etapa, foram realizados ensaios físicos e químicos para caracterizar os materiais disponíveis, abrangendo massa específica, granulometria, composição química, ensaios para análise da área e forma superficial dos materiais e testes de para detecção e controle de impurezas. Esses resultados foram fundamentais para compreender as propriedades características dos insumos e orientar as etapas subsequentes.

A segunda etapa teve como foco a otimização da compacidade da mistura base de UHPC. Para isso, foi utilizado um aplicativo de otimização desenvolvido por Mateus P. Otto, baseado na teoria de empacotamento de grãos de $A \& A_{MOD}$. Nessa fase, também foi definido o pó de pedra como agregado da mistura, em razão de seu desempenho superior em testes prévios, comparado às areias de rio disponíveis. Adicionalmente, foram

estabelecidos os tempos ideais de mistura, fator determinante para as propriedades finais do compósito.

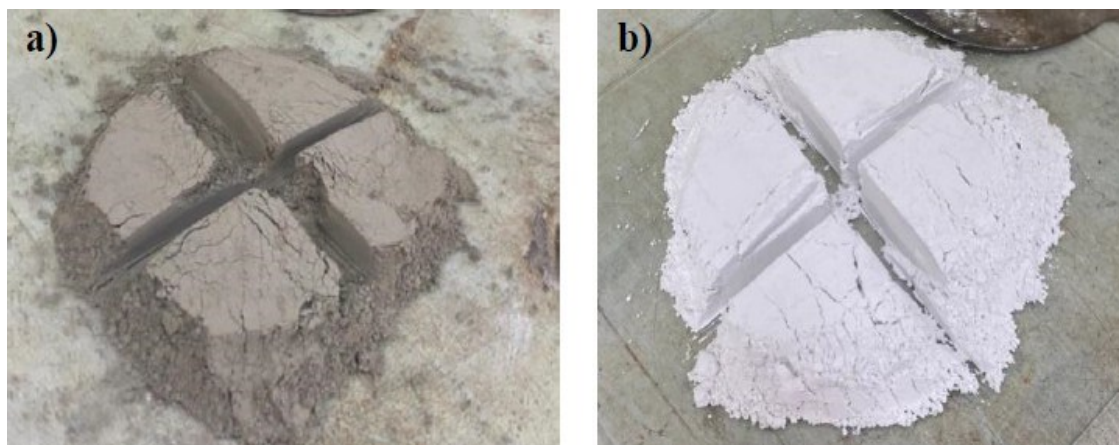
Na terceira etapa, a produção laboratorial foi conduzida conforme o planejamento experimental estabelecido previamente, seguida da análise das propriedades no estado fresco e endurecido. As misturas foram elaboradas com diferentes teores e comprimentos das fibras de carbono, variando também o consumo de cimento.

No estado endurecido, os ensaios tiveram como foco a avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais do UHPC, permitindo analisar os aspectos da interface matriz-fibra, a eficiência do processo de dispersão das fibras e a formação e a morfologia dos produtos hidratados, a partir de análises realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

4.2 Etapa 1: caracterização dos materiais

Os materiais utilizados no desenvolvimento desta pesquisa estão amplamente disponíveis no mercado brasileiro. O cimento empregado foi o CPV ARI, produzido e fornecido pela indústria cimenteira CIPLAN Cimento Planalto S/A. O pó de quartzo com partículas de 7,4 μm de diâmetro médio considerado ultrafino por ficar retido na malha 500. A Figura 4.2 mostra estes materiais no momento do quarteamento de amostras, com o objetivo de obter uma amostra representativa do lote mantendo a proporção de partículas de diferentes tamanhos, conforme a norma vigente NM 27:2000.

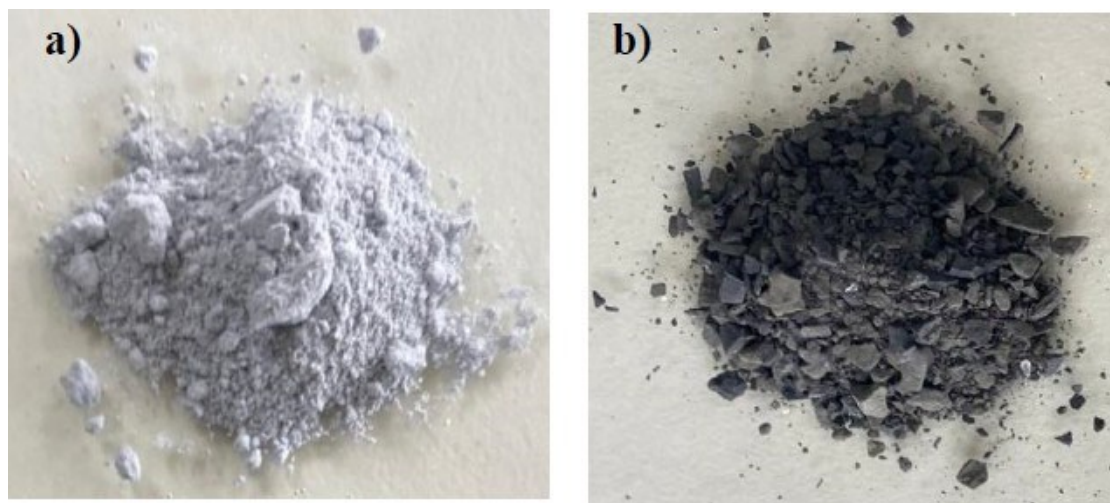
Figura 4.2: Quarteamento de amostras - (a) Cimento CPV e (b) pó de quartzo



Fonte: Autora, 2026.

A sílica ativa foi fornecida na forma não densificada, providenciada pela empresa Ligas de Alumínio S.A. - LIASA. Como agregado foi utilizado pó de pedra, também conhecido comercialmente como pó de brita, com granulometria bem distribuída e com elevada porcentagem de finos. A Figura 4.3 apresenta ambos os materiais.

Figura 4.3: Amostras (a) Sílica ativa e (b) pó de pedra



Fonte: Autora, 2026.

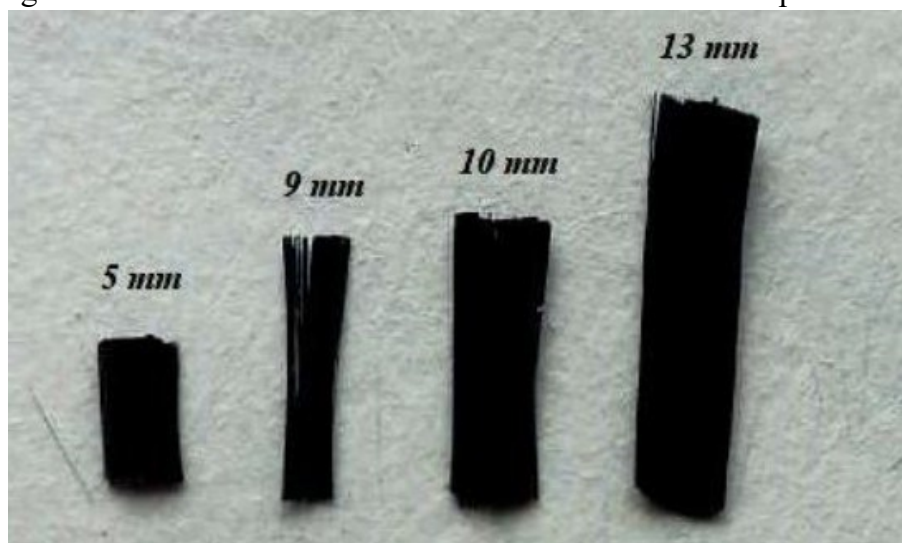
Foi empregado o aditivo polifuncional ADVA® 458 UHPC nas misturas, fornecido pela empresa Chryso Saint-Gobain. Este é um aditivo superplastificante à base de éter policarboxilato desenvolvido especificamente para UHPC, caracterizados por relações água/aglomerante extremamente baixas. De acordo com a ABNT NBR 11768-1:2019, o ADVA® 458 UHPC desempenha múltiplas funções, atuando como redutor de água tipo 2, acelerador de pega (RA2-A) e acelerador de resistência.

As fibras de carbono utilizadas foram fornecidas pela Texiglass Indústria e Comércio Têxtil Ltda., já cortadas (*short fibers*, Figura 4.4) nos comprimentos previamente estabelecidos para esta pesquisa (5, 9, 10 e 13 mm). A escolha desses comprimentos baseou-se em estudos anteriores: Guo *et al.* (2021) empregaram fibras de 5, 7 e 10 mm, enquanto Patchen, Young e Penumadu (2022) utilizaram comprimentos variando entre 1,5 e 12,7 mm.

A fibra de carbono utilizada corresponde ao fio 12K (C-8000/1-0), conforme especificação do fabricante, composto por aproximadamente 12.000 filamentos contínuos, sem torção, com diâmetro médio da ordem de 7 μm . De acordo com a ficha técnica, o material apresenta resistência à tração nominal de 4900 MPa, podendo atingir valores

máximos de até 5390 MPa, módulo de elasticidade em torno de 250 GPa, com valor máximo reportado de 263 GPa, e alongamento na ruptura de até 1,73%. Quanto às propriedades físicas, a densidade da fibra varia entre 1,77 e 1,83 g/cm³ e o fio de fibra de carbono é revestido por uma camada superficial de resina epóxi, correspondente a aproximadamente 1,4% em massa, com a finalidade de favorecer a adesão interfacial à matriz cimentícia.

Figura 4.4: Feixes de fibras de carbono em diferentes comprimentos



Fonte: Autora, 2026.

Optou-se pela utilização de fibras de carbono virgens nesta pesquisa devido à sua disponibilidade comercial e à homogeneidade de propriedades mecânicas, comprimento e diâmetro, fatores que reduzem a variabilidade dos resultados. A escolha também se justifica pelo fato de que, no Brasil, a cadeia de reciclagem de compósitos de carbono ainda não está consolidada, dificultando o acesso a fibras recicladas em escala adequada para pesquisas acadêmicas (Shiino; Rezende, 2020). Dessa forma, as fibras virgens foram consideradas a alternativa mais viável para garantir reprodutibilidade e confiabilidade experimental.

4.2.1 Ensaios físicos

Os ensaios físicos de caracterização dos materiais da pesquisa são testes para determinar as propriedades físicas como massa específica, diâmetro máximo e mínimo na

composição granulométrica e área superficial. Esta investigação tem o objetivo de avaliar a adequação do material para determinada aplicação, como no caso desta pesquisa, o desenvolvimento de um UHPC.

Os ensaios físicos de massa específica, composição granulométrica por peneiramento e resistência à compressão do cimento foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LabMat), da Faculdade de Engenharia Civil da UFU.

4.2.1.1 Composição granulométrica

A distribuição granulométrica dos pós passantes na peneira com abertura de 150 μ m, incluindo cimento, pó de quartzo e sílica ativa, foi determinada pelo método de difração de raios laser, utilizando o equipamento Mastersizer Microplus®, da fabricante Malvern Panalytical, no Laboratório de Processos de Separação da Faculdade de Engenharia Química da UFU. Para o cimento, utilizou-se álcool isopropílico como meio dispersante, enquanto para os demais pós empregou-se água. Todos os materiais foram submetidos a ondas de ultrassom no próprio equipamento, assegurando uma dispersão mais eficiente das partículas. A granulometria do pó de pedra foi realizada em duas fases. Inicialmente, seguiu-se a norma brasileira ABNT NBR 17054 - Agregados: Determinação da composição granulométrica - Método de Ensaio (2020), utilizando peneiras com aberturas de 6,3mm a 0,15mm.

4.2.1.2 Massa específica

A densidade real dos agregados miúdos foi determinada com a metodologia especificada na ABNT NBR 16916:2021 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água (2021). O pó de pedra possui massa específica de 2,72g/cm³ e apresenta um aumento de massa devido ao preenchimento dos poros permeáveis com água, resultando em uma absorção de 2,43%.

A densidade dos materiais granulares em pó foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 16605:2017 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica (2017), utilizando o frasco volumétrico de *Le Chatelier* e querosene como fluido para análise, a fim de evitar reações químicas com os materiais ensaiados. Os resultados obtidos indicaram que a massa específica do cimento CPV ARI é de 2,95g/cm³,

da sílica não densificada é de $2,18\text{g/cm}^3$ e do pó de quartzo é de $2,66\text{g/cm}^3$.

4.2.1.3 Resistência a compressão do cimento

No UHPC, a resistência à compressão do cimento impacta diretamente a resistência global do material. Ensaiair o cimento separadamente permite identificar o desempenho potencial antes de sua interação com os outros componentes. Por isso a resistência à compressão do cimento CPV ARI foi avaliada conforme a ABNT NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (2019).

O ensaio foi realizado após 7 dias de cura, para verificar se o material atende aos requisitos mínimos de qualidade e desempenho especificados pela ABNT NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos (2018), Tabela A.1, que estabelece os critérios de conformidade para a classe de resistência à compressão do CPV ARI que deve ser 34MPa aos 7 dias. A resistência média alcançada no ensaio foi de 34,41MPa aos 7 dias, alcançando o valor de referência estabelecido pela norma.

4.2.1.4 Superfície específica B.E.T

A técnica utilizada para medir a área de superfície específica de materiais sólidos, fundamentada na teoria de adsorção de gases desenvolvida por Brunauer, Emmett e Teller (1938) foi aplicada com uso de um analisador da marca Micromeritics, modelo: ASAP 2020 Plus, no Laboratório de Equipamentos Multiusuários do Pontal (LAMUP), no Campus Pontal da UFU, para o cimento CPV ARI e para a sílica não densificada. A sílica não densificada apresentou uma área superficial de $21,83\text{m}^2/\text{g}$, dentro dos limites estabelecidos entre $15 \leq \text{B.E.T} \leq 30\text{m}^2/\text{g}$, pela ABNT NBR 13956-1:2012 - Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, Parte 1: Requisitos (2012). O resultado de área superficial para o cimento CPV ARI foi de $2,65\text{m}^2/\text{g}$.

4.2.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

O equipamento utilizado para averiguar a morfologia de superfície da fibra de carbono, bem como seu diâmetro, foi o microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss

EVO MA10, do Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV-UFU). Este equipamento é equipado com detectores de elétrons secundários e elétrons retroespalhados. As amostras de fibras de carbono não foram recobridas com metais devido à sua natureza condutora.

4.2.2 Ensaios químicos

Os ensaios químicos para caracterização de materiais são métodos analíticos utilizados para determinar os componentes presentes no material e sua composição química, e a resposta dos materiais sob diferentes condições.

4.2.2.1 Fluorescência de Raios-X

A espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) foi realizada com um espectrômetro de FRX da marca Bruker modelo S8 Tiger, Laboratório Multiusuário em Energias Renováveis (LAMER), da Faculdade de Engenharia Química - UFU, resultando em uma análise química quantitativa dos óxidos maiores (SO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , MnO e P_2O_5) e demais componentes químicos, da sílica ativa e do CPV ARI.

Como as amostras são materiais sólidos em pó, a preparação foi realizada pelo procedimento de pérola fundida, para melhor homogeneização da amostra, eliminação de materiais voláteis durante o processo e melhora na superfície de análise por resultar em uma amostra mais plana e lisa.

4.2.2.2 Perda ao fogo

A perda ao fogo do CPV ARI foi determinada com o objetivo de avaliar suas características e composição. A partir desse ensaio a quantidade de massa que o cimento perde ao ser aquecido aos 950 °C foi obtida. A perda de massa é atribuída à presença de materiais voláteis, como água quimicamente combinada, carbonatos e compostos orgânicos ou inorgânicos, que se convertem em gás ou vapor durante o aquecimento. O procedimento foi realizado conforme a ABNT NBR 17086 — Cimento Portland — Análise química — Parte 6: Determinação da perda ao fogo (2023), no Laboratório de Análises do NUCBIO, Faculdade de

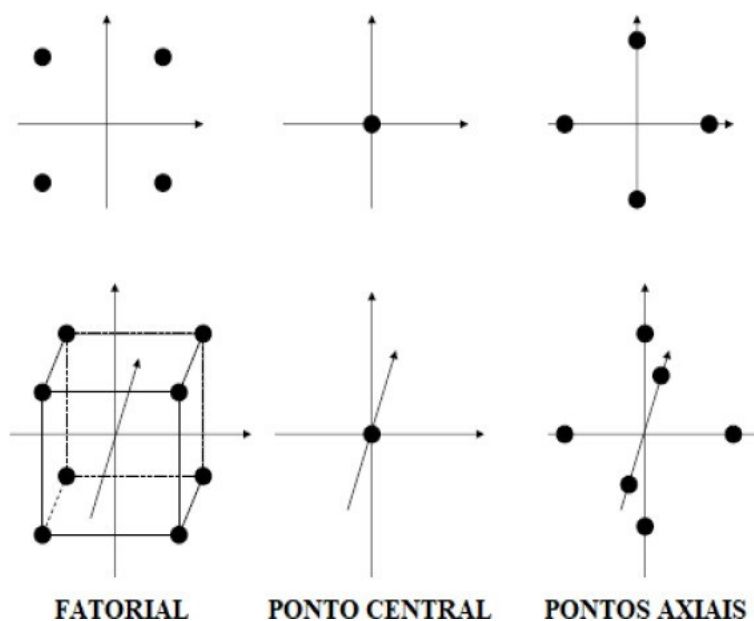
4.3 Delineamento composto central rotacional

No planejamento de experimentos laboratoriais, a técnica estatística de Delineamento Composto Central Rotacional é utilizada em estudos de superfície de resposta para modelar e otimizar processos. Nesta etapa do projeto de experimento, é essencial compreender os fatores controláveis, estabelecendo as variáveis independentes para avaliar seu efeito nos fatores incontroláveis, que são as variáveis resposta.

Esta técnica estatística é fundamentada no planejamento fatorial $2k$, em que k é o número de fatores (+1 e -1), com adição de pontos centrais e axiais ($+\alpha$ e $-\alpha$) que permitem estimar os termos quadráticos. É um delineamento simétrico de segunda ordem, constituído por três partes, como pode-se entender pela Figura 4.5 (Pérez, 2024).

A partir disso, o DCCR é projetado para ser rotacional, o que significa que a variância da previsão é constante em todas as direções equidistantes do centro do design. Isso é importante para garantir que as previsões sejam igualmente precisas em todas as direções (Fujiwara; Matsuura, 2019).

Figura 4.5: Planejamento composto central em duas e três dimensões



Fonte: Pérez (2024).

Com o objetivo de avaliar a interação das fibras de carbono na matriz de UHPC, definiram-se como variáveis independentes o teor de fibra em relação ao volume total da mistura e o comprimento das fibras de carbono. Adicionalmente, considerou-se como variável de estudo o consumo de cimento, com o objetivo de investigar a possibilidade de produção de UHPC com consumos de cimento abaixo dos valores estudados até então. Os limites estabelecidos para as variáveis estão apresentados na Tabela 4.1. As variáveis resposta consideradas compreenderam a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão, o módulo de elasticidade, a tenacidade, a resistividade elétrica e o índice de vazios.

Tabela 4.1: Limite inferior e superior das variáveis independentes

Variáveis controláveis	Limite inferior	Ponto central	Limite superior
Teor de fibra (%)	0	0,5	1
Comprimento da fibra (mm)	5	9	13
Consumo de cimento (kg/m³)	500	700	900

Fonte: Autora, 2026.

Para a elaboração da matriz de planejamento composto central, o valor de α é calculado pela Equação 4.1, conforme Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001), para $k = 3$ (fatores independentes):

$$\alpha = (2^k)^{\frac{1}{4}} = (2^3)^{\frac{1}{4}} = 1,6818 \quad (4.1)$$

Com os limites das variáveis independentes definidos na Tabela 4.1, pode-se calcular a relação entre as variáveis codificadas e decodificadas. Assim, após a definição dos limites das variáveis independentes, correspondentes a $E(+\alpha)$ e $E(-\alpha)$, é possível calcular os valores intermediários para cada fator:

$$x_i = \left(\frac{E_i - E(0)}{\frac{E(+1) - E(-1)}{2}} \right) \quad (4.2)$$

Em que:

- x_i : valor codificado na matriz do planejamento experimental;

- E_i : valor decodificado real;
- $E(0)$: valor central escolhido nos seus limites de trabalho (média entre $E(1)$ e $E(-1)$);
- $E(1)$: penúltimo valor mais alto para o limite de trabalho;
- $E(-1)$: penúltimo valor mais baixo para o limite de trabalho.

A partir dessas informações, o software *Statistica 12* foi utilizado para gerar automaticamente a matriz experimental, dispensando o usuário de montar manualmente todas as combinações características do DCCR. O alfa de rotabilidade considerado foi de 1,6818, conforme a Equação 4.1, com resolução do cubo (delineamento) de 3/1/18, contendo três fatores independentes, um bloco e 18 experimentos, incluindo quatro repetições do valor central. A Tabela 4.2 reúne os resultados da análise estatística realizada.

Tabela 4.2: Matriz de Planejamento Composto Central Rotacional com três variáveis

Experimento	Teor de fibras (%)	Comprimento de fibras (mm)	Consumo de cimento (kg/m³)	
E1	0,2	5,0	550	Planejamento fatorial
E2	0,2	10,0	550	
E3	0,2	5,0	790	
E4	0,2	10,0	790	
E5	0,9	5,0	790	
E6	0,9	5,0	550	
E7	0,9	10,0	550	
E8	0,9	10,0	790	
E9	0,5	13,0	700	Pontos axiais
E10	0,5	9,0	500	
E11	0,5	5,0	700	
E12	0,5	9,0	900	
E13	1,0	9,0	700	
E14	0,0	0,0	700	
E15	0,5	9,0	700	Repetições do ponto central
E16	0,5	9,0	700	
E17	0,5	9,0	700	
E18	0,5	9,0	700	

Fonte: Autora, 2026.

O experimento *E14-0%F0-700* é a mistura referência, sem incorporação de fibras, posicionada no nível intermediário de consumo de cimento dentro do Planejamento Composto Central, que permite avaliar de forma isolada a contribuição das fibras de carbono como reforço. Com a ausência de fibras, a mistura do experimento *E14* tende a ser uma mistura mais fluida e homogênea resultando em uma melhor trabalhabilidade, menor risco de incorporação de ar e maior uniformidade da matriz.

As quatro repetições do ponto central (*E15* a *E18*), com teor de fibras de 0,5% e comprimento de 9mm, reforça a confiabilidade estatística do planejamento, o que é particularmente relevante nas misturas de UHPC em que pequenas variações de dosagem podem resultar em alterações nos comportamentos mecânicos e reológicos.

4.4 Dosagem dos materiais sólidos segundo o modelo de empacotamento de grãos de Andreassen e Andersen modificado

Para cada um dos dezoito experimentos definidos no DCCR, foi realizada uma otimização automatizada. Como as faixas granulométricas dos materiais já estavam previamente definidas, a compacidade ideal da mistura seca foi estimada por meio de um aplicativo de otimização desenvolvido em *Python* com a biblioteca *Streamlit*. Esse aplicativo utiliza o modelo de empacotamento de grãos *A&A_{MOD}* e calcula a fração volumétrica ideal de cada componente seco do concreto, de modo a maximizar o empacotamento.

O coeficiente de distribuição (q) da curva de empacotamento da formulação *A&A_{MOD}*, apresentado na Equação 3.2, foi definido como 0,27. Além disso, a relação água/materiais cimentícios foi previamente estabelecida em 0,23, neste caso, o cimento e a sílica ativa. Estes valores pré-definidos foram embasados em testes prévios.

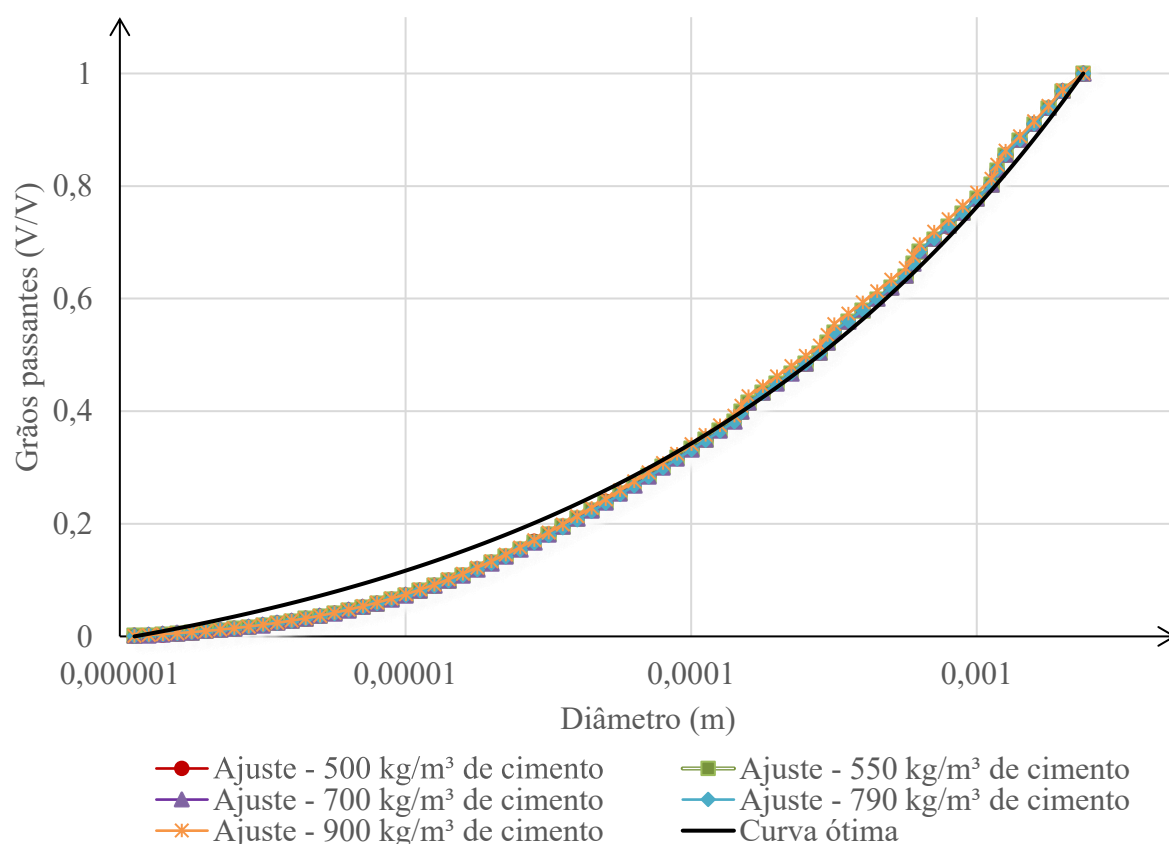
O consumo de cimento de cada formulação foi definido pelo planejamento composto central (Tabela 4.2), pois esta é uma das variáveis de estudo. O teor de sílica foi definido em 15% em relação à massa de cimento seguindo os trabalhos de Chung (2000) e C. Wang *et al.* (2008). Portanto, para cada formulação, os teores de cimento e sílica constituem restrições de entrada do modelo, de modo que o empacotamento se dá pela combinação desses teores prefixados com o ajuste das frações volumétricas dos demais constituintes para atingir a melhor proximidade à curva ideal, com base na granulometria

de todos os constituintes.

A Figura 4.6 apresenta os resultados da otimização para cinco composições com diferentes proporções em massa, envolvendo variações não apenas no consumo de cimento, mas também nos teores de sílica ativa, pó de quartzo e pó de pedra. A curva em preto, denominada curva ótima, representa a condição ideal de empacotamento dos grãos que compõem a mistura. As demais curvas correspondem aos ajustes obtidos para cada composição, indicando o grau de aproximação das misturas reais em relação a esse empacotamento ideal.

Apesar das diferenças nas proporções dos materiais constituintes, observa-se uma significativa sobreposição entre as curvas, evidenciando que todas as composições convergem para uma condição semelhante de empacotamento. Esse resultado demonstra a eficiência do processo de otimização adotado, capaz de conduzir diferentes combinações de materiais a um arranjo granular equivalente e próximo do estado ideal.

Figura 4.6: Curva de ajuste de empacotamento granular ótimo



Fonte: Autora, 2026.

4.5 Superfícies de respostas

De acordo com Calado e Montgomery (2003), a rotabilidade no DCCR está associada à simetria esférica do planejamento experimental, de modo que a variância da resposta prevista permaneça aproximadamente constante para todos os pontos localizados a uma mesma distância do centro do domínio experimental. A inclusão de pontos centrais no DCCR permite atender a esse requisito, favorecendo o ajuste de modelos polinomiais de segunda ordem, os quais são capazes de descrever o comportamento das respostas em função das variáveis de estudo e identificar pontos estacionários, associados a condições de máximo, mínimo ou ponto de sela.

Nesse contexto, o MSR é empregado como uma ferramenta estatística e matemática que utiliza os dados obtidos a partir do DCCR para modelar as relações funcionais entre variáveis independentes e variáveis resposta. A partir do ajuste do modelo, torna-se possível a construção de superfícies de respostas, que representam graficamente a tendência das propriedades analisadas dentro do domínio experimental, permitindo a identificação de regiões de desempenho ótimo ou desfavorável, bem como a avaliação da influência relativa das variáveis e de suas interações.

Considerando a ampla quantidade de parâmetros quantitativos obtidos no plano experimental, a aplicação do MSR possibilitou a análise sistemática da influência simultânea das variáveis independentes sobre as respostas avaliadas. Para esse fim, empregou-se novamente o *software Statistica 12* por meio do qual foram estabelecidas correlações estatísticas entre as variáveis independentes e as variáveis resposta, permitindo a identificação dos fatores de maior significância estatística e a determinação dos valores das variáveis independentes associados à otimização das propriedades analisadas.

As variáveis independentes consideradas no estudo foram X_1 = teor de fibras (%), X_2 = Comprimento das fibras (mm) e X_3 = Consumo de cimento (kg/m³). Para cada variável resposta, foi ajustado um modelo empírico polinomial de segunda ordem, expresso pela Equação 4.3 (Santos *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2019).

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (4.3)$$

Em que:

- $\hat{Y}$: resposta prevista;
- b_0 : termo constante;
- x_i : variáveis independentes;
- b_i : termos de regressão de primeira ordem;
- b_{ii} : termos quadráticos;
- b_{ij} : termos de interação entre variáveis.

Para as idades de 28 e 56 dias, a análise global das variáveis resposta foi realizada por meio de regressão polinomial de segunda ordem, a qual permite avaliar tanto os efeitos individuais das variáveis explicativas quanto suas interações e efeitos não lineares. O tratamento estatístico adotou um nível de significância de 95%, de modo que foram consideradas estatisticamente significativas as variáveis e interações que apresentaram valores de p inferiores a 0,05 no gráfico de Pareto.

4.6 Etapa 3: Produção e caracterização das formulações de estudo

4.6.1 Dispersão das fibras

Como o efeito de ponteamto proporcionado pelas fibras é fundamental para o aprimoramento das propriedades mecânicas do compósito, especialmente da resistência à tração na flexão e tenacidade, é essencial que essas fibras estejam uniformemente dispersas e individualizadas na matriz cimentícia. Uma boa dispersão permite que cada fibra atue de forma independente, contribuindo de maneira efetiva para o comportamento pós-fissuração e para o desempenho global do material.

As fibras de carbono utilizadas nas misturas foram fornecidas pelo fabricante na forma de feixes contínuos de fios, cada uma contendo aproximadamente 12000 filamentos. Devido à elevada coesão entre esses filamentos e ao diâmetro micrométrico das fibras, é necessário separá-las e individualizá-las antes do uso, de modo a garantir uma dispersão homogênea na matriz cimentícia.

Nas formulações desenvolvidas, as fibras passaram por duas etapas de dispersão: uma prévia à mistura dos materiais secos e outra durante o processo de mistura. A dispersão prévia foi realizada com base nos procedimentos descritos por Yoo *et al.* (2020) e C. Wang *et al.* (2008), conforme a seguinte sequência:

- i. **Preparação da solução dispersante:** foram utilizados 2 litros de água aquecida a aproximadamente 40°C, contendo 3g de aditivo polifuncional por grama de fibra, conforme o aditivo disponível.
- ii. **Imersão das fibras:** as fibras de carbono foram incorporadas à solução aquosa contendo água e aditivo.
- iii. **Agitação mecânica:** a mistura foi submetida à agitação mecânica por 5 minutos, para iniciar o processo de separação dos filamentos.
- iv. **Banho ultrassônico:** em seguida, a solução foi colocada em uma lavadora ultras-sônica (potência de 100W e frequência de 40kHz) e submetida a banho ultrassônico por 10 minutos, promovendo a dispersão completa das fibras.
- v. **Secagem:** após o banho ultrassônico, as fibras foram secas em estufa a 100 °C por 24 horas, resultando em fibras pouco aglomeradas e com volume final significativo.

As fibras tratadas por esse procedimento foram, então, utilizadas na etapa de mistura, assegurando uma distribuição mais homogênea no compósito. O procedimento de preparação das fibras de carbono encontra-se ilustrado na Figura 4.7.

Figura 4.7: Processo de dispersão das fibras de carbono



Fonte: Autora, 2026.

A fim de garantir a adequada dispersão das fibras de carbono na matriz de concreto, as fibras secas, previamente submetidas a tratamento ultrassônico, foram misturadas a teores pré-estabelecidos de água e aditivo, definidos conforme as frações volumétricas de cada material em cada mistura, constituindo a segunda etapa do processo de dispersão.

4.6.2 Mistura, moldagem e cura

Para incorporação de energia de mistura, foi utilizado o misturador da Solotest com movimentos planetários com motor da marca WEG FT81512, operando a uma rotação máxima de 1720rpm e capacidade de 20 litros. O volume total de mistura para moldagem de todos os corpos de prova e realização dos ensaios no estado fresco, foi de 4 litros.

A água da mistura foi dividida em três frações: 70% destinada ao molhamento inicial dos pós, 25% para a segunda etapa de dispersão das fibras e 5% para a diluição do aditivo. O aditivo, por sua vez, também foi fracionado: 80% foram incorporados diretamente aos pós após o molhamento, enquanto os 20% restantes foram utilizados na segunda etapa de dispersão das fibras. A Figura 4.8 ilustra esta preparação para a mistura exemplo.

Figura 4.8: Materiais utilizados na preparação das misturas



Fonte: Autora, 2026.

Após a preparação dos materiais, todos os componentes secos foram inicialmente pré-misturados para garantir a homogeneização. Em seguida, adicionou-se a água destinada ao molhamento dos pós e, somente após o completo umedecimento das partículas, incorporou-se o polifuncional previamente diluído em água.

Nesse estágio, o misturador foi ajustado para a rotação máxima, a fim de promover maior incorporação de energia e alcançar a plasticidade desejada da mistura. Após atingir essa condição, as fibras previamente dispersas foram adicionadas e incorporadas à matriz cimentícia sob rotação média do misturador. Os tempos, rotações e etapas de mistura estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Método de mistura realizado

Tempo (min)	Rotação do misturador	Etapas de mistura
0-5	Baixa	Homogeneização dos materiais secos (cimento, sílica, pó de quartzo e pó de pedra)
5-7	Baixa/Média	Adição de 80% de água na mistura
7-9	Máxima	Incorporação de aditivo polifuncional diluído em água
9-12	Média	Adição das fibras de carbono dispersas.

Fonte: Autora, 2026.

A moldagem e cura dos corpos de prova de *UHPC* procedeu conforme as diretrizes da ABNT NBR 5738:2015 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (2015). Para cada mistura, foram moldados 20 corpos de prova, sendo 8 cilíndricos (5 x 10cm), 6 cúbicos (4 x 4 x 4cm) e 6 prismáticos (4 x 4 x 16cm), destinados aos ensaios no estado endurecido aos 28 e 56 dias. O adensamento foi realizado em duas etapas: inicialmente de forma manual com uso de uma haste e, posteriormente, em mesa vibratória, garantindo adequada compactação da mistura. A Tabela 4.4 apresenta o procedimento de moldagem adotado e os ensaios correspondentes a cada geometria de corpo de prova.

Nas primeiras 24 horas, os corpos de prova foram mantidos em ambiente com umidade relativa de 90% e temperatura controladas de 23 ± 2 °C. Em seguida, foram submetidos à cura em água saturada com hidróxido de cálcio até a data dos ensaios em temperatura também entre 23 ± 2 °C.

Tabela 4.4: Procedimentos de moldagem e vibração dos corpos de prova

Tipo de corpo de prova	Quantidade de corpos de prova por traço	Quantidade de camadas	Quantidade de golpes por camada	Tempo de vibração por camada (s)	Ensaio
Cilíndrico	8	3	15	30	Compressão e Módulo de Elasticidade
Prismático	6	2	15	30	Tração na flexão e Resistividade
Cúbico	6	2	60	60	Porosidade por absorção total

Fonte: Autora, 2026.

4.6.3 Ensaios no estado fresco

A realização de ensaios no estado fresco do concreto é fundamental para assegurar o desempenho do material antes de seu endurecimento. No presente estudo, para a verificação da trabalhabilidade das misturas, bem como para a determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, adotaram-se as normas aplicáveis a argamassas, em razão da semelhança reológica e composicional entre essas misturas e o concreto de ultra alto desempenho. Além disso, essa opção se justifica pelo fato de que a norma brasileira específica para o UHPC (NBR 17246:2025) entrou em vigor após a etapa de moldagem dos corpos de prova, impossibilitando sua aplicação direta nos ensaios realizados.

Para a determinação da densidade de massa (kg/m^3) e do teor de ar incorporado (%), seguiu-se as diretrizes da NBR 13278 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado (2019). Ao término do tempo de mistura, a amostra foi introduzida em um recipiente de massa e volume previamente conhecidos, em três camadas sucessivas, cada uma adensada com 20 golpes e submetida a três quedas livres de aproximadamente 3cm de altura. Esse procedimento visou garantir o preenchimento uniforme do recipiente e a redução de vazios na massa fresca, possibilitando assim a obtenção de resultados mais representativos das propriedades da mistura.

A análise do índice de consistência foi conduzida de acordo com as orientações da NBR 13276:2016 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Após o preparo da mistura, a massa foi inserida em um molde troncônico metálico, em três camadas sucessivas, adensadas com 15, 10 e 5 golpes, respectivamente. As quedas na mesa de consistência não foram realizadas, em razão da propriedade de autoadensamento do concreto de ultra alto desempenho, que dispensa esse tipo de adensamento mecânico. Em seguida, o molde foi retirado na direção vertical, e, após um tempo controlado de 40 segundos, foi medido diâmetro da massa espalhada, em três direções distintas, expressando-se o resultado como a média das três medidas, em milímetros (mm).

A Figura 4.9 exemplifica o molde troncônico preenchido e o concreto espalhado na mesa de consistência. A mistura e moldagem dos corpos de prova foram realizadas em ambiente com temperatura controlada de 23 ± 2 °C, e umidade relativa do ar mantida em $60 \pm 5\%$.

Figura 4.9: Ensaio de índice de consistência



Fonte: Autora, 2026.

4.6.4 Ensaios no estado endurecido

O conjunto de ensaios realizados no estado endurecido do concreto permitiu avaliar as propriedades mecânicas do compósito, bem como suas características microestruturais. Os ensaios relativos às propriedades mecânicas compreenderam a determinação da resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e tenacidade. Para a caracterização física e microestrutural, foram conduzidas análises de resistividade elétrica,

MEV e volume de poros por absorção total dos espécimes.

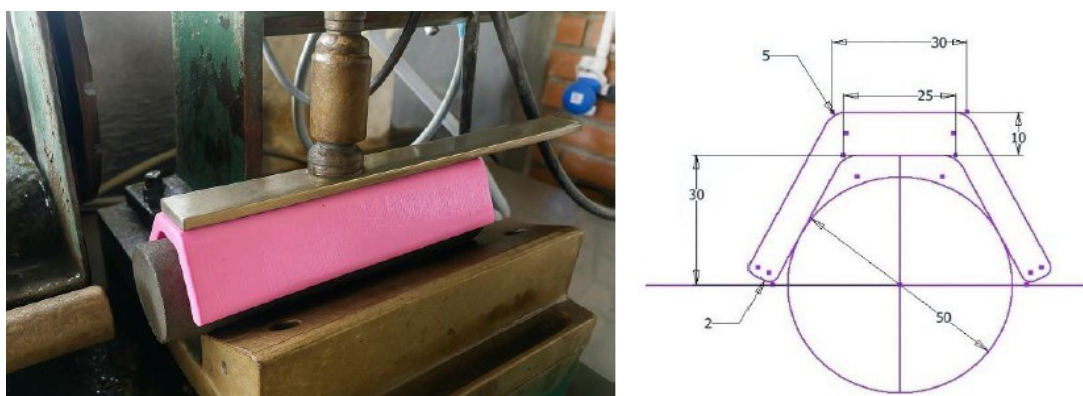
4.6.4.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foi verificada conforme a normativa brasileira NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (2018). Os ensaios foram realizados aos 28 e 56 dias, em máquina disponibilizada no LABMAT/UFU (EMIC, DL60000). O carregamento de ensaio foi aplicado continuamente e sem choques, com a velocidade de carregamento de 500N/s.

Para manter o paralelismo das faces dos corpos de prova cilíndricos e assegurar a aplicação correta da força de compressão, foi desenvolvido um suporte em impressão 3D, adaptado à retífica utilizada para o acabamento dos corpos de prova de 5 x 10cm.

Essa adaptação foi necessária pois a máquina foi originalmente projetada para corpos de prova de maiores dimensões (10 x 20cm). A Figura 4.10 apresenta a máquina retífica e o suporte confeccionado.

Figura 4.10: Suporte de corpo de prova cilíndrico para retífica



Fonte: Autora, 2026.

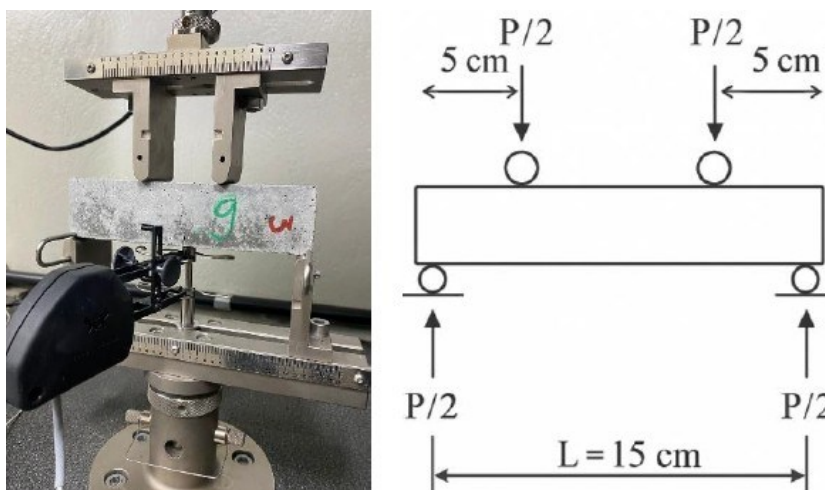
4.6.4.2 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi conduzido pelo método de quatro pontos (Figura 4.11), utilizando uma máquina universal de ensaios da marca Instron, modelo 5982, disponível no Labmat/UFU. A partir desse ensaio, foram determinados o módulo de ruptura e a tenacidade do compósito. Os parâmetros empregados seguiram as

recomendações do comitê RILEM (1989). A máquina possui célula de carga com capacidade de 100kN, e a velocidade de deslocamento do atuador foi fixada em 0,2mm/min. A deflexão no vão central foi monitorada por meio de um extensômetro axial estático do tipo *Clip-On*, também da marca Instron.

O Módulo de Ruptura (MOR) foi determinado a partir da Equação 4.4 e a tenacidade do compósito, expressa como energia específica (kJ/m²), foi determinada a partir da energia absorvida durante o ensaio de flexão. Para isso, calculou-se a área sob a curva que relaciona a força aplicada e a deflexão medida (curva Força x Flecha), obtida ao longo de todo o ensaio, inclusive na fase de *softening*. Em seguida, esse valor foi dividido pela área da seção transversal dos corpos de prova, resultando na tenacidade do UHPC com fibras de carbono.

Figura 4.11: Ensaio de flexão a quatro pontos com extensômetro para medida de flecha



Fonte: Autora, 2026.

$$MOR = \frac{p_{m\acute{a}x} L}{be^2} \quad (4.4)$$

Em que:

- $p_{m\acute{a}x}$: força máxima durante o ensaio;
- L : vão de ensaio (mm);
- b : largura do corpo de prova (mm);

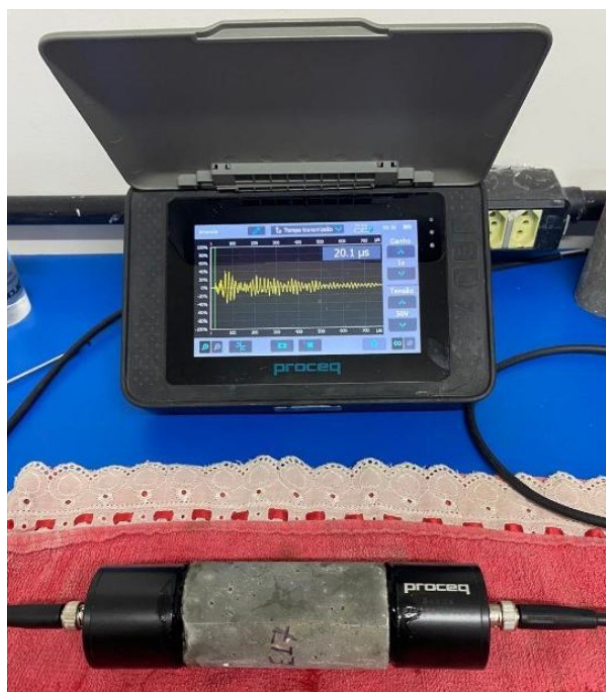
- e : espessura do corpo de prova (mm).

4.6.4.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dos espécimes foi verificado com base na NBR 15630:2008 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica (2008). É um método não destrutivo baseado em propagação de ondas ultrassônicas longitudinais que atravessam os corpos de prova. Um pulso ultrassônico é gerado por um transdutor emissor que atravessa o corpo de prova e é captado com um transdutor receptor posicionado na face oposta, como mostra a Figura 4.12.

O ultrassom para concreto PROCEQ – Pundit 200 foi disponibilizado pelo grupo de pesquisa de Durabilidade e Avaliação Estrutural (DurAE) da UFU, para a realização dos ensaios.

Figura 4.12: Ultrassom para concreto Proceq



Fonte: Autora, 2026.

A leitura fornecida pelo equipamento corresponde ao tempo de propagação da onda, expresso em microssegundos, necessário para percorrer o comprimento do corpo de prova. A partir desse tempo, calcule-se conforme a Equação 4.5, a velocidade de propagação da

onda que depende das propriedades elásticas e da densidade do material.

$$V = \frac{L}{t} \quad (4.5)$$

- V : velocidade de propagação da onda (mm/ μ s);
- L : distância entre os transdutores (mm);
- b : tempo de percurso da onda (μ s).

Para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, também é necessário determinar a densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m^3) como estabelecido na NBR 13280: 2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido (2005).

Para esta determinação, mede-se as dimensões geométricas dos corpos de prova (comprimento e diâmetro) e a massa do espécime seco, preparado para as leituras no ultrassom. A densidade de massa aparente do concreto é determinada pela razão entre a massa e o volume do cilindro.

Calculados esses parâmetros, faz-se a substituição na Equação 4.6, fornecida pela NBR 15630:2008, para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Devido a disponibilidade do equipamento, este ensaio foi realizado aos 56 dias do concreto de ultra alto desempenho.

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (4.6)$$

Em que:

- E_d : módulo de elasticidade dinâmico, expresso em megapascal (MPa);
- v : velocidade de propagação da onda ultrasônica, expressa em milímetros por microsegundos ($\text{mm}/\mu\text{s}$);
- ρ : é a densidade de massa aparente do corpo-de-prova, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);
- μ : é o coeficiente de *Poisson*. Adota-se nesta equação o valor 0,2.

4.6.4.4 Volume de poros por absorção total

Para aprofundar a compreensão da densidade da matriz cimentícia e obter parâmetros quantitativos, foi realizado o ensaio de porosidade, conforme a norma internacional ASTM C642-21 - *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete* (2021).

O ensaio consiste inicialmente na determinação da massa do corpo de prova cúbico (4 x 4 x 4cm) seco em estufa, correspondente à condição sem a presença de água nos poros, obtida após secagem a 110 ± 5 °C por um período mínimo de 24 horas. Em seguida, determina-se a massa saturada após imersão, mantendo o corpo de prova submerso em água a aproximadamente 21 °C por no mínimo 48 horas.

Na etapa subsequente, com o objetivo de promover a saturação máxima dos poros permeáveis, o corpo de prova previamente saturado é submetido à fervura em água por 5 horas, favorecendo a penetração da água em capilares e microporos. Por fim, determina-se a massa aparente imersa, por meio de balança hidrostática, necessária para o cálculo do volume total do espécime.

De forma direta, o volume total de poros permeáveis corresponde à razão entre o volume de água absorvida nos poros e o volume total do corpo de prova, conforme a Equação 4.7:

$$V_p = \frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{total}}} \times 10 \quad (4.7)$$

Em que:

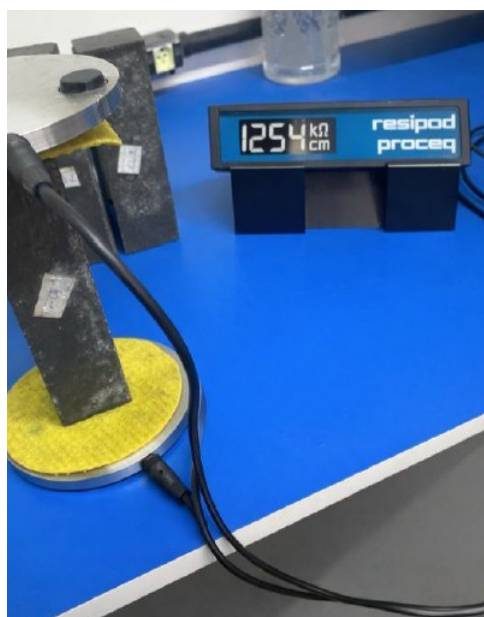
- V_p : volume total de poros permeáveis (%);
- $V_{\text{água}}$: volume de água absorvida nos poros;
- V_{total} : volume total do corpo de prova.

4.6.4.5 Resistividade elétrica

O ensaio foi conduzido em corpos de prova saturados, utilizando o equipamento Resipod, da Proceq, acoplado ao acessório para medição de resistividade volumétrica. As medições foram realizadas em corpos de prova prismáticos (16 x 4 x 4cm), com equipamento disponibilizado pelo grupo de pesquisa DurAE.

O sistema é composto por duas placas metálicas condutoras e espumas condutoras de contato, que possibilitam a aplicação de uma corrente elétrica alternada através do volume do concreto. A partir da diferença de potencial medida entre os eletrodos, o equipamento calcula a resistividade elétrica volumétrica, fornecendo um valor representativo do material como um todo, e não restrito a regiões localizadas da superfície, conforme ilustrado na Figura 4.13.

Figura 4.13: Resistividade volumétrica do concreto



Fonte: Autora, 2026.

A leitura realizada no equipamento é dada em $k\Omega\text{cm}$, e de acordo com as instruções do fabricante, este valor deve ser dividido por $2\pi a$, sendo a é o espaçamento das sondas, no caso, 5,0cm. Portanto a resistividade volumétrica é dada por:

$$\rho = k \times R_{cp} \quad (4.8)$$

$$k = \frac{A}{L} \quad (4.9)$$

Em que:

- A : área transversal do corpo de prova;
- L : comprimento do corpo de prova;

- R_{cp} : leitura obtida no equipamento com a correção (dividida por 10π);
- ρ : resistividade elétrica.

Como a área transversal dos corpos de prova prismáticos é igual a 16cm^2 e seu respectivo comprimento é 16cm , então $k = 1$.

4.6.5 Microestrutura

As micrografias da seção de ruptura à tração na flexão dos compósitos foram obtidas por meio de MEV, utilizando os equipamentos Tescan, modelo VEGA 3 LMU, e Zeiss, modelo EVO MA10, pertencentes aos laboratórios LAMEV e ao Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), respectivamente.

Além da visualização da porosidade, morfologia e distribuição dos compostos, a microscopia eletrônica foi empregada para analisar a interação entre a fibra de carbono e a matriz cimentícia, possibilitando avaliar a aderência interfacial e a ocorrência do efeito de ponteamto promovido pelas fibras de carbono. A qualidade da hidratação e a formação dos produtos hidratados também foram analisadas por meio de imagens de microscopia eletrônica.

Foi feita ainda, análise por espectrometria de raios-X por Energia Dispersiva por Raio-X (EDS) para determinação qualitativa da composição química tanto da superfície das fibras de carbono após o tratamento de dispersão, quanto na matriz cimentícia. As amostras para estas técnicas de análise microscópica foram metalizadas com recobrimento (*coating*) em ouro.

Adicionalmente aos dezoito experimentos estabelecidos pelo Planejamento Composto Central, foram produzidas três misturas complementares com o propósito de investigar a influência do aumento do teor de fibras nas propriedades mecânicas e microestruturais do material. A definição dessas misturas baseou-se nas tendências observadas nas superfícies de resposta, sendo adotado consumo de cimento constante de 800kg/m^3 e teores de fibras de carbono de 1,5%, 2,0% e 3,7%.

5 Resultados obtidos e discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos ao longo do programa de pesquisa, abrangendo desde a caracterização dos materiais constituintes até a análise integrada do desempenho do UHPC reforçado com fibras de carbono. Inicialmente, são discutidos os resultados da caracterização física, química e microestrutural dos materiais. Em seguida, apresentam-se o planejamento experimental e as dosagens adotadas, bem como a avaliação das propriedades do compósito nos estados fresco e endurecido. A análise das propriedades mecânicas, de durabilidade e da resposta microestrutural é complementada pela aplicação de técnicas estatísticas, por meio da análise das superfícies de resposta, permitindo identificar as variáveis mais influentes no desempenho do material. Por fim, uma investigação complementar é conduzida com base nas tendências observadas, visando aprofundar a compreensão dos mecanismos associados à incorporação de teores mais altos de fibras de carbono na matriz de UHPC.

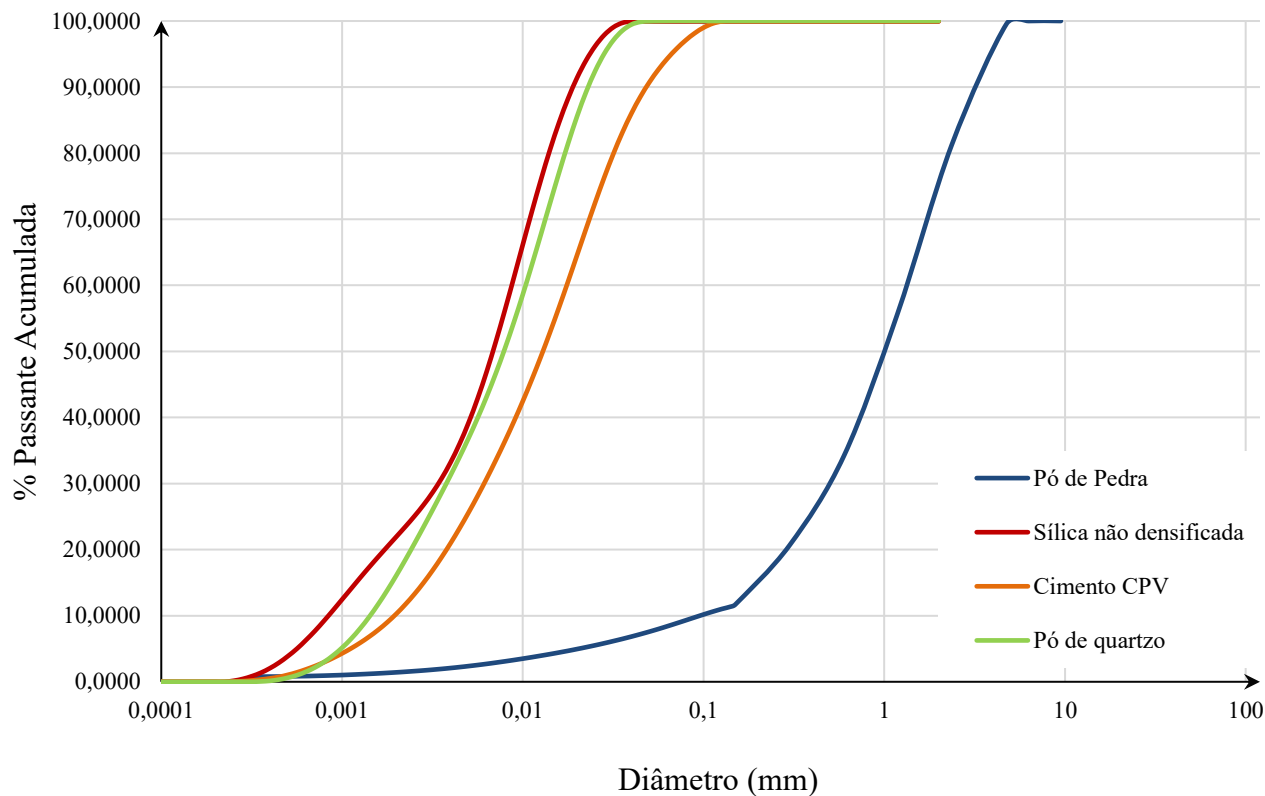
5.1 Caracterização dos materiais

5.1.1 Granulometria

A distribuição granulométrica dos materiais granulares utilizados na produção das misturas *UHPC*, objeto deste estudo, é apresentada na Figura 5.1. A Tabela 5.1 apresenta os diâmetros equivalentes característicos dos materiais utilizados, em que diâmetros abaixo de D_{10} são considerados a fração ultrafina do material, D_{50} o diâmetro médio predominante e D_{90} indica o diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas, representando, portanto, a fração mais grossa.

Na dosagem de UHPC é importante combinar materiais com diferentes valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} para atingir curva de empacotamento otimizada, favorecendo a redução da porosidade da matriz.

Figura 5.1: Curvas granulométricas dos materiais granulares



Fonte: Autora, 2026.

Tabela 5.1: Diâmetros equivalentes dos materiais granulares em micrômetros

Material	D10	D50	D90
Sílica ativa	0,939	7,660	21,196
Pó de quartzo	1,605	8,822	25,794
Cimento	2,187	14,499	54,033
Pó de pedra	~150,000	~1200,000	~4000,000

Fonte: Autora, 2026.

À primeira vista, observa-se uma separação clara entre as faixas granulométricas dos diferentes materiais. Embora os valores de *D50* da sílica ativa e do pó de quartzo sejam relativamente próximos, os dois materiais exercem funções distintas na matriz: a sílica ativa atua predominantemente como material pozolânico altamente reativo, contribuindo para a formação adicional de produtos hidratados, enquanto o pó de quartzo apresenta comportamento essencialmente inerte, atuando como *filler* dos interstícios da matriz cimentícia.

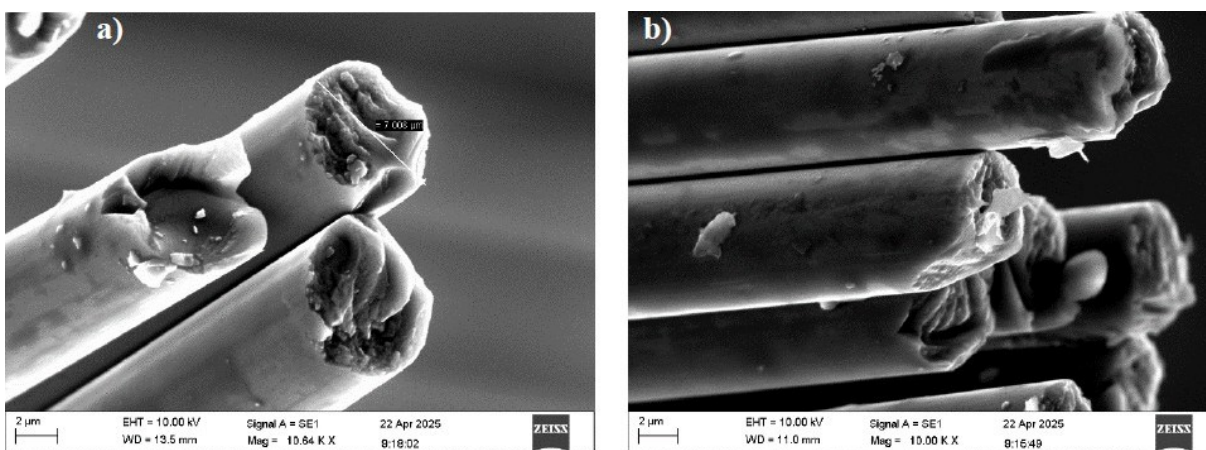
A combinação de partículas de diferentes tamanhos constitui um fator determinante para o aumento da densidade da matriz, como discutido no Capítulo 3. Na Figura 5.1, verifica-se a granulometria contínua e bem graduada dos materiais. Há uma boa complementaridade granulométrica entre os materiais, indicando um empacotamento eficiente, no qual as partículas de menor dimensão preenchem progressivamente os vazios deixados pelas partículas de maior tamanho, resultando em uma matriz mais densa e contínua.

Entretanto, observa-se que o empacotamento global da mistura poderia ser ainda mais eficiente com a introdução de partículas capazes de preencher a faixa intermediária de vazios existente entre o pó de pedra e o cimento. Considerando o diâmetro médio predominante (D_{50}), essa lacuna corresponde aproximadamente ao intervalo entre 15 e $1200\mu\text{m}$, indicando a ausência de partículas com dimensões intermediárias suficientes para promover um empacotamento ainda mais denso.

5.1.2 Microscopia eletrônica de varredura das fibras de carbono

Na Figura 5.2 (a) são apresentadas as micrografias das fibras de carbono cortadas, evidenciando morfologia cilíndrica bem definida e diâmetro médio em torno de $7\mu\text{m}$, valor que confirma a especificação fornecida pelo fabricante. Já na 5.2 (b), observa-se que a superfície externa é predominantemente lisa e homogênea.

Figura 5.2: Imagens geradas pelo MEV das fibras de carbono



Fonte: Autora, 2026.

Na região terminal da fibra de carbono, correspondente à superfície de corte, observa-se uma topografia bastante rugosa e irregular, distinta da porção cilíndrica externa. Essa rugosidade decorre do processo de cisalhamento ocorrido no momento do corte das fibras, que gera descontinuidades superficiais, ressaltos e microfissuras. Contudo, essa superfície mais rugosa pode representar um aspecto positivo, uma vez que favorece a interação mecânica e a ancoragem da fibra na matriz, contribuindo para melhorar a aderência interfacial no compósito.

Diante dos resultados obtidos nos ensaios químicos, conclui-se que os materiais utilizados apresentam composição química compatível com os requisitos de um concreto de ultra-alto desempenho. O cimento CPV ARI demonstrou boa estabilidade química e adequada qualidade, evidenciada pelo baixo teor de materiais voláteis e contaminantes.

5.1.3 Ensaios químicos

A composição química dos materiais cimentícios utilizados na mistura foi determinada por meio da análise de fluorescência de raios (FRX), descrita na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultado da análise da composição química do cimento CPV e da sílica ativa

Elemento	Concentração média (%)	
	Cimento CPV	Sílica Ativa
Na_2O	0,42	0,36
MgO	3,97	0,32
Al_2O_3	8,85	0,13
SiO_2	26,38	94,66
P_2O_5	0,14	0,14
SO_3	2,05	0,05
K_2O	0,97	1,17
CaO	52,09	0,22
TiO_2	0,49	0,00
Mn_2O_3	0,08	0,03
Fe_2O_3	2,52	0,00

Fonte: Autora, 2026

O teor de Óxido de Magnésio (MgO) do CPV ARI igual a 3,97% está dentro dos requisitos químicos exigidos para este tipo de cimento Portland que deve ser menor ou igual a 6,5%, bem como o Trióxido de Enxofre (SO₃) que deve ser menor ou igual a 4,5%, de acordo com a Tabela 3 da ABNT NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos (2018). Para a sílica, o teor de SiO₂ deverá apresentar valor maior que 85%, segundo a ABNT NBR 13956-1 (2012). Na amostra analisada, o teor de SiO₂ é de 94,66%, garantindo mais reações com o Hidróxido de Cálcio (Ca(OH)₂) do cimento e por consequência, mais hidratos formados.

Para avaliar a perda ao fogo, duas amostras do mesmo cimento foram submetidas à calcinação a 950 °C em uma mufla. A amostra 1 obteve uma perda ao fogo de 3,02272% e a amostra 2 de 2,36952% o que resulta na porcentagem de perda ao fogo média de 2,70%, valor bem abaixo do limite estabelecido na NBR 16697:2018 (2018), que deve ser menor que 6,5% para o cimento CPV ARI, sugerindo um cimento com baixo teor de voláteis e carbonatos.

Dessa forma, eventuais variações no desempenho global do UHPC reforçado com fibras de carbono tornam-se menos suscetíveis à variabilidade, à baixa qualidade ou a defeitos intrínsecos dos materiais constituintes, podendo ser atribuídas, com maior confiabilidade, aos efeitos da dosagem, do empacotamento e da incorporação das fibras. Planejamento composto central e dosagens

Após a definição dos materiais, foram estabelecidas as proporções das misturas, obedecendo à seguinte ordem do traço: cimento, sílica ativa, pó de quartzo e pó de pedra. As formulações foram organizadas conforme o consumo de cimento (kg/m³), como apresentado na Tabela 5.3, e a nomenclatura das misturas estão em ordem de composição, sendo o primeiro termo o teor de fibras em %, o segundo termo, a letra “F” acompanhada do comprimento da fibra e o último termo, relativo ao consumo de cimento da mistura em kg/m³. Nessa tabela, também é apresentado o teor de aditivo polifuncional necessário para atingir a plasticidade adequada de cada mistura, expresso como porcentagem da massa de cimento. Salienta-se que os valores de teor de aditivo expressos na Tabela 5.3 foram determinados considerando também a massa de aditivo residual impregnado nas fibras no processo de dispersão.

O consumo de cimento, variando entre 500 e 900 kg/m³, permitiu avaliar uma ampla gama de composições de UHPC, mantendo-se constante o empacotamento granular entre

as misturas. Dessa forma, as variações de dosagem refletem exclusivamente alterações na fração de ligantes reativos, uma vez que o teor de sílica ativa foi mantido proporcional à massa de cimento. A escolha dessa faixa teve como principal objetivo investigar se misturas com menor consumo de cimento são capazes de apresentar desempenho equivalente ou próximo ao de composições com maiores teores, contribuindo para o desenvolvimento de UHPCs mais sustentáveis e ambientalmente viáveis.

Nas misturas com menor teor de cimento, a redução do volume de pasta (cimento+sílica+água) e o consequente aumento relativo da fração inerte elevam a demanda de aditivo, uma vez que a menor quantidade de pasta precisa apresentar maior fluidez para garantir a adequada trabalhabilidade e o envolvimento das partículas sólidas. Além disso, a menor área específica reativa disponível nessas misturas limita a adsorção eficiente do aditivo polifuncional e a dispersão homogênea da suspensão, justificando o uso de teores mais elevados de aditivo.

Tabela 5.3: Composição das misturas produzidas

Experimento	Consumo de cimento (kg/m³)	Fração volumétrica de fibra (%)	Comprimento da fibra (mm)	Proporção em massa (c:s:pq:pp)	Volume de pasta (cm³)	Teor de Aditivo (%)
E10	500	0,5	9	1:0,15:0,76:2,93	0,15	6,89
E1	550	0,2	5	1:0,15:0,58:2,61	0,17	6,01
E2		0,2	10	1:0,15:0,58:2,61	0,17	6,01
E6		0,9	5	1:0,15:0,58:2,61	0,17	6,46
E7		0,9	10	1:0,15:0,58:2,61	0,17	6,15
E9		0,5	13	1:0,15:0,20:1,95	0,22	2,65
E11	700	0,5	5	1:0,15:0,20:1,95	0,22	2,66
E13		1,0	9	1:0,15:0,20:1,95	0,22	2,71
E14		0	—	1:0,15:0,20:1,95	0,22	2,50
E15		0,5	9	1:0,15:0,20:1,95	0,22	2,55
E16		0,5	9	1:0,15:0,20:1,95	0,22	2,55
E17		0,5	9	1:0,15:0,20:1,95	0,22	2,54
E18		0,5	9	1:0,15:0,20:1,95	0,22	2,99
E3	790	0,2	5	1:0,15:0,05:1,66	0,26	2,52
E4		0,2	10	1:0,15:0,05:1,66	0,26	2,53
E5		0,9	5	1:0,15:0,05:1,66	0,26	2,76
E8		0,9	10	1:0,15:0,05:1,66	0,26	2,55
E12	900	0,5	9	1:0,15:0,00:1,29	0,30	2,54

Fonte: Autora, 2026.

5.2 Avaliação das propriedades no estado fresco

Após a realização dos ensaios no estado fresco, descritos no item 4.4, a Tabela 5.4 apresenta os resultados de densidade de massa teórica, teor de ar incorporado e índice de consistência das misturas estudadas.

Observa-se que a mistura *E14-0%F0-700*, isenta de fibras, obteve o maior índice de consistência (262mm), indicando elevada trabalhabilidade, além de não apresentar incorporação de ar no momento da mistura. Esta resposta era esperada, uma vez que a ausência de fibras reduz a resistência interna ao escoamento e a probabilidade de aprisionamento de ar.

Tabela 5.4: Propriedades das misturas no estado fresco

Experimentos	Consumo de cimento (kg/m³)	Teor de aditivo (%)	Densidade da massa (g/cm³)	Teor de ar incorporado (%)	Índice de consistência (mm)
E10-0,5%F9-500	500	6	2,44	1,11	139
E1- 0,2%F5-550	550	6	2,43	1,97	200
E2- 0,2%F10-550		6	2,43	0,04	215
E6-0,9%F5-550		6	2,43	1,25	182
E7-0,9%F10-550		6	2,43	0,50	188
E9-0,5%F13-700	700	2,5	2,40	0,36	218
E11-0,5%F5-700		2,5	2,40	0,19	221
E13-1,0%F9 - 700		2,5	2,37	0,79	164
E14 - 0%F0-700		2,5	2,42	0	262
E15-0,5%F9-700		2,5	2,39	0,59	222
E16-0,5%F9-700		2,5	2,39	0	252
E17-0,5%F9-700		2,5	2,39	1,04	224
E18-0,5%F9-700		2,5	2,39	1,16	240
E3- 0,2%F5-790	790	2,5	2,34	1,57	190
E4- 0,2%F10-790		2,5	2,35	0,97	138
E5-0,9%F5-790		2,5	2,31	2,35	139
E8- 0,9%F10-790		2,5	2,31	2,21	141
E12-0,5%F9-900	900	2,5	2,26	3,30	141

Fonte: Autora, 2026.

As misturas do ponto central (*E15,16,17e18-0,5%F9-700*), com 0,5% de fibras incorporadas, apresentam-se mais equilibradas no estado fresco, com índices de

consistência intermediários (entre 222 e 252mm), densidades intermediárias ($2,39\text{kg/m}^3$) e teores de ar inferiores a 1,2%. Esses resultados indicam uma adequada relação entre fluidez, compacidade da matriz e viabilidade de incorporação das fibras. A mistura *E11-0,5%F5-700*, também com 0,5% em teor de fibras, apresenta melhor combinação entre fluidez, densidade da matriz e mínima incorporação de ar como as misturas do ponto central, se destacando como uma mistura promissora no estado fresco.

As misturas com teores de fibras de 0,9% e 1,0% apresentaram menor trabalhabilidade, com índices de consistência variando entre 138 e 188mm, o que indica a influência direta do aumento do teor de fibras na redução da fluidez das misturas. Esse comportamento está associado à dificuldade do deslizamento da pasta e à maior dificuldade de acomodação das fibras na matriz cimentícia.

Em relação à densidade da massa, observa-se que as misturas com menores valores de densidade, como a *E12-0,5%F9-900*, apresentaram maiores teores de ar incorporado, o que reduz a compacidade da matriz. Embora a relação água/cimento seja baixa, o elevado teor de pasta favorece o aumento da porosidade, predominantemente associada à formação de microporos na pasta hidratada. Assim, o aumento da fração de pasta tende a elevar o teor total de poros, influenciando negativamente a densificação do material. Além disso, a distribuição granulométrica da matriz exerce influência direta sobre a mobilidade da mistura, afetando sua resposta reológica e, consequentemente, a trabalhabilidade no estado fresco.

5.3 Avaliação das propriedades no estado endurecido

5.3.1 Resistência à compressão

Para a avaliação da resistência à compressão, foram ensaiados quatro corpos de prova por mistura, por idade. A média dos resultados de resistência à compressão, acompanhados de seus respectivos desvios padrão, obtidos para os dezoito experimentos nas idades de 28 e 56 dias, estão apresentados na Tabela 5.5.

Ressalta-se que, em materiais compósitos, é comum a ocorrência de maior dispersão nos resultados experimentais, em decorrência da heterogeneidade da matriz cimentícia e da influência de múltiplas variáveis associadas à presença e à distribuição das

fibras.

Os resultados de resistência à compressão evidenciam que a redução do consumo de cimento não comprometeu significativamente o desempenho mecânico do UHPC. A mistura E10-0,5%F9-500, com consumo de apenas 500 kg/m³ de cimento, apresentou resistências de 114,29 MPa aos 28 dias e 120,22 MPa aos 56 dias, valores que se mantiveram próximos aos obtidos para misturas com maiores consumos de cimento. Esse resultado indica a possibilidade de produzir UHPC com menor consumo de cimento sem prejuízo significativo dessa propriedade.

Tabela 5.5: Resistência à compressão aos 28 e 56 dias

Experimentos	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	
		28 dias	56 dias
E10-0,5%F9-500	500	114,29±2,24	120,22±1,49
E1- 0,2%F5-550	550	115,83±0,32	108,43±0,35
E2- 0,2%F10-550		102,41±3,46	122,87±0,24
E6-0,9%F5-550		108,88±3,13	114,26±0,28
E7-0,9%F10-550		109±0,90	122,76±3,08
E9-0,5%F13-700	700	119,08±0,23	128,67±0,27
E11-0,5%F5-700		115,85±10,10	134,53±0,52
E13-1,0%F9 - 700		121,77±3,00	129,61±2,80
E14 - 0%F0-700		127,32±1,14	128,97±0,24
E15-0,5%F9-700		120,92±4,05	129,34±0,19
E16-0,5%F9-700		120,59±0,88	126,88±7,53
E17-0,5%F9-700		113,77±1,66	131,7±0,34
E18-0,5%F9-700		120,86±0,37	121,06±1,08
E3- 0,2%F5-790	790	119,45±1,17	124,3±3,24
E4- 0,2%F10-790		115,39±1,03	122,42±5,78
E5-0,9%F5-790		111,49±3,22	123,66±0,23
E8- 0,9%F10-790		110,29±5,11	118,73±0,82
E12-0,5%F9-900	900	106,66±3,82	101,12±2,07

Fonte: Autora, 2026.

Aos 28 dias, a maior resistência à compressão foi observada na mistura E14- 0%F0-700, isenta de fibras de carbono, que atingiu 127,32MPa. Esse desempenho pode ser

atribuído à elevada densidade da matriz cimentícia e ao bom desempenho no estado fresco, favorecendo um empacotamento mais eficiente e menor incorporação de vazios. Esse resultado evidencia que, embora a adição de fibras contribua para outras propriedades mecânicas do compósito, sua presença em excesso tende a influenciar negativamente a resistência à compressão quando compromete a trabalhabilidade e a compacidade da matriz.

A resistência à compressão é predominantemente controlada pela compacidade dos grãos e consequentemente pela densidade da matriz cimentícia, bem como pela presença de defeitos internos. Ao inserir fibras na matriz, elas não contribuem diretamente para o incremento de resistência à compressão, mas teores moderados (0,5%) e boa dispersão das fibras na matriz, conduzem a bons resultados desta propriedade mecânica.

Como exemplo, aos 56 dias, observa-se um incremento generalizado da resistência à compressão para a maioria das misturas, com destaque para os pontos centrais e para o experimento *E11-0,5%F5-700*, que apresentaram os maiores valores nesta idade. Os experimentos *E11-0,5%F5-700* e *E16-0,5%F9-700*, que já haviam demonstrado bom desempenho no estado fresco, mantiveram essa tendência no estado endurecido, evidenciando um equilíbrio favorável entre trabalhabilidade, empacotamento da matriz e desempenho mecânico.

Na Tabela 5.5, o experimento *E16-0,5%F9-700* apresenta resistência média à compressão de 126,88MPa aos 56 dias, associada ao maior desvio padrão entre as misturas analisadas. Apesar disso, essa formulação atingiu o maior valor individual de resistência à compressão, alcançando 136,10MPa. Esse resultado indica que, quando as condições de moldagem, compactação e dispersão das fibras são adequadas, a mistura *E16-0,5%F9-700* é capaz de desenvolver elevados níveis de resistência à compressão, reforçando a eficiência do empacotamento da matriz e a coerência com o bom desempenho observado no estado fresco.

Em relação à análise estatística, os resultados obtidos aos 28 dias indicou que nenhuma das variáveis independentes avaliadas: teor de fibras, comprimento das fibras e consumo de cimento, exerceu influência estatisticamente significativa sobre a resistência à compressão, à tração e à tenacidade do UHPC. De forma consistente com esse resultado, as superfícies de resposta associadas a essa idade não evidenciam a definição de regiões ótimas ou interações relevantes entre os fatores estudados, enquanto os gráficos de Pareto dos efeitos padronizados confirmam a ausência de termos estatisticamente

influentes para as propriedades analisadas.

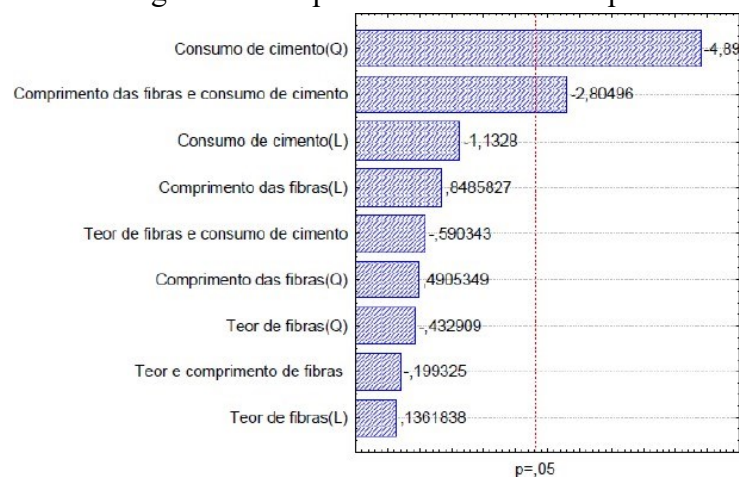
A não significância estatística das variáveis nessa idade pode ser atribuída à limitada maturidade microestrutural da matriz cimentícia, uma vez que as reações pozolânicas da sílica não densificada acontecem de forma tardia. Nas idades iniciais, as partículas finas de sílica atuam como preenchimento na matriz, funcionando como pontos de nucleação para o crescimento do C-S-H. Já nas idades mais avançadas, a sílica reage com a portlandita por meio de reação pozolânica, levado à novas formações de C-S-H, o que provoca melhoria nas propriedades físicas da microestrutura (Fang *et al.*, 2021).

Portanto, determinação das variáveis dependentes para a resistência à compressão (σ_c) os 56 dias foi obtida por meio de regressão múltipla, apresentada na equação quadrática (Equação 5.2). O coeficiente de determinação (R^2) desta equação foi de 0,83, indicando boas correlações entre as variáveis.

$$\sigma_c = 129,0679 + 0,5711x_1 + 0,6393x_2 - 3,7939x_3 - 2,1027x_1^2 + 0,0351x_2^2 - 13,8525x_3^2 - 0,1193x_1x_2 - 2,0825x_1x_3 - 1,8459x_2x_3 \quad (5.2)$$

Pela equação, sabe-se que as variáveis explicativas estatisticamente influentes são o consumo de cimento e a interação entre o consumo de cimento e o comprimento das fibras. O gráfico de Pareto na Figura 5.3 mostra com mais clareza este resultado. Nesse gráfico, o termo L refere-se aos efeitos lineares e Q aos efeitos quadráticos.

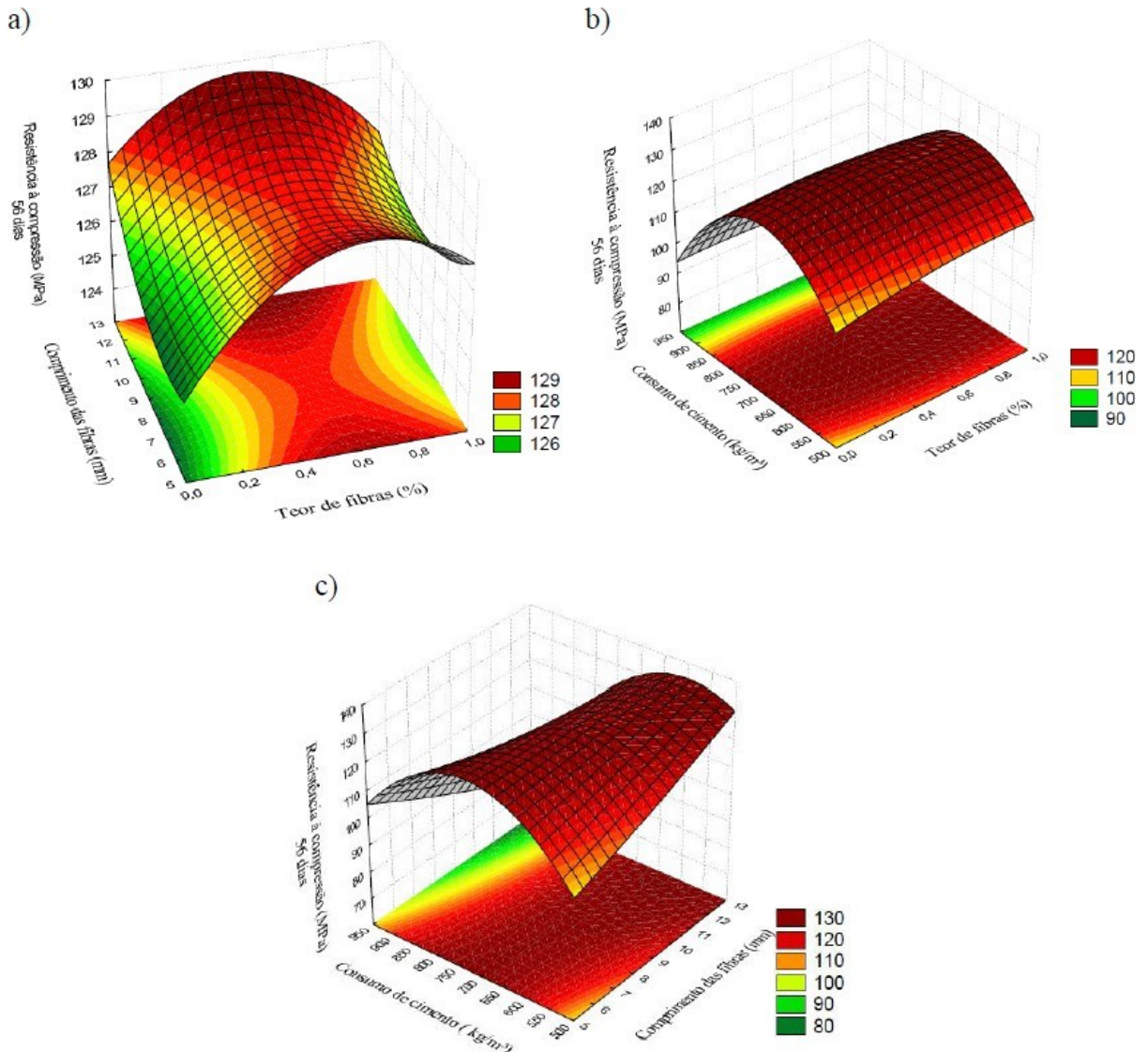
Figura 5.3: Variáveis significativas para resistência à compressão aos 56 dias



Fonte: Autora, 2026.

As superfícies de resposta ilustradas na Figura 5.4, completam a análise ao mostrar os pontos otimizados das variáveis resposta.

Figura 5.4: Superfícies de respostas para resistência à compressão aos 56 dias



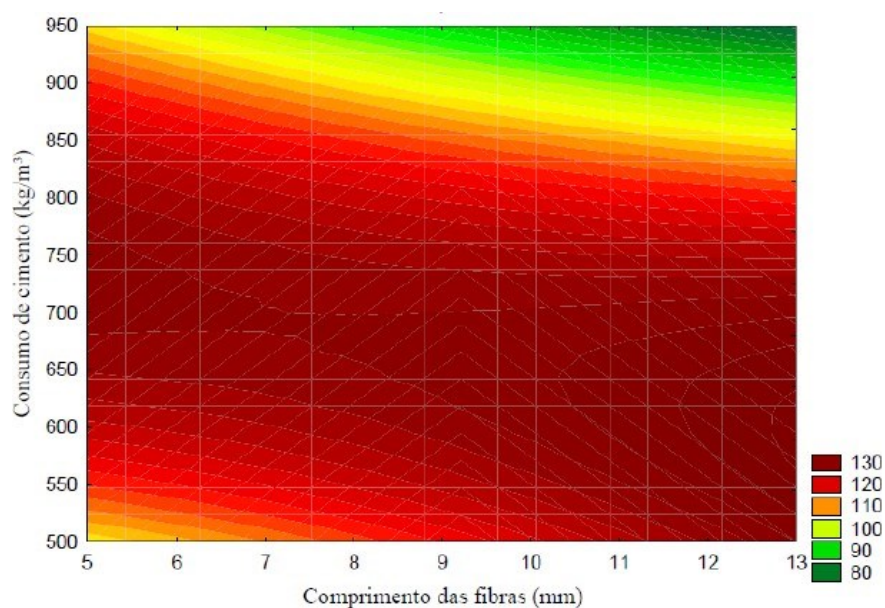
Fonte: Autora, 2026.

O consumo de cimento apresenta-se como a variável explicativa predominante na avaliação da resistência à compressão do UHPC reforçado com fibras de carbono. É uma resposta esperada, uma vez que as reações pozolânicas, intensificadas pela presença da microsilica, desempenham papel fundamental na formação de uma microestrutura mais densa e refinada, capaz de suportar elevadas tensões de compressão.

O comprimento das fibras, por sua vez, mostrou-se um fator de influência secundária sobre a resistência à compressão. Ainda assim, sua inclusão no modelo matemático é relevante, uma vez que contribui para a adequada definição da região ótima de resposta, conforme ilustrado na Figura 5.5.

A análise das superfícies de resposta evidencia que os maiores valores de resistência à compressão são obtidos para consumos de cimento da ordem de 700kg/m^3 ou inferiores, associados a comprimentos de fibras superiores a 9mm .

Figura 5.5: Região ótima para resistência à compressão aos 56 dias



Fonte: Autora, 2026.

O teor de fibras não demonstrou significância estatística para a resistência à compressão, resultado coerente com a literatura. Guo *et al.* (2021) destacam que fibras de carbono influenciam principalmente as propriedades à flexão e à tração, apresentando efeito limitado sobre a resistência à compressão. De forma semelhante, Overhage *et al.* (2024) verificaram que fibras de carbono, tanto virgens quanto recicladas, não exercem influência significativa sobre essa propriedade mecânica.

5.3.2 Resistência à tração na flexão e tenacidade

Na Tabela 5.6 são apresentadas as médias dos resultados de resistência à tração na flexão e de tenacidade dos compósitos, bem como os respectivos desvios padrão.

Entre 28 e 56 dias, as misturas E1-0,2%F5-550, E3-0,2%F5-790 e E5-0,9%F5-790 apresentaram ganhos expressivos nas propriedades mecânicas, com incrementos de até 45% na resistência à tração na flexão e de até 78% na tenacidade. Essas misturas têm em comum o menor comprimento de fibra (5mm), indicando que fibras mais curtas favorecem

uma distribuição mais homogênea na matriz cimentícia com elevada finura. Além disso, *E1-0,2%F5-550* e *E3- 0,2%F5-790* possuem o mesmo teor de fibras, enquanto *E3-0,2%F5-790* e *E5-0,9%F5-790* apresentam consumos de cimento iguais, o que reforça a influência predominante do comprimento da fibra nesse conjunto de misturas.

Tabela 5.6: Resistência à tração na flexão e tenacidade aos 28 e 56 dias

Experimento	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à tração na flexão (MPa)		Tenacidade (kJ/m ²)	
		28 dias	56 dias	28 dias	56 dias
E10-0,5%F9-500	500	6,92±0,48	7,34±0,34	0,20±0,0149	0,23±0,0152
E1- 0,2%F5-550	550	5,50±0,20	9,17±0,04	0,12±0,0005	0,29±0,0111
E2- 0,2%F10-550		8,91±0,93	6,84±0,07	0,25±0,0234	0,30±0,0107
E6-0,9%F5-550		9,80±0,73	8,49±0,03	0,37±0,0046	0,30±0,1270
E7-0,9%F10-550		6,98±0,61	7,23±0,38	0,24±0,0035	0,25±0,0454
E9-0,5%F13-700		7,03±0,56	7,66±0,14	0,26±0,0272	0,24±0,0383
E11-0,5%F5-700	700	7,88±0,70	7,46±0,23	0,19±0,0031	0,29±0,0809
E13-1,0%F9 - 700		8,69±0,45	9,61±0,12	0,26±0,0234	0,49±0,0535
E14 - 0%F0-700		6,84±0,30	8,90±0,49	0,17±0,0071	0,31±0,0364
E15-0,5%F9-700		7,20±0,44	7,90±0,37	0,19±0,0114	0,29±0,0141
E16-0,5%F9-700		7,67±0,81	7,94±0,22	0,24±0,031	0,29±0,0461
E17-0,5%F9-700		7,12±0,65	8,22±0,60	0,20±0,0265	0,26±0,0180
E18-0,5%F9-700		9,09±0,02	8,97±0,79	0,34±0,0431	0,29±0,0692
E3- 0,2%F5-790		5,18±0,23	9,22±0,28	0,12±0,0341	0,40±0,0671
E4- 0,2%F10-790	790	7,69±1,01	8,88±0,12	0,24±0,0656	0,39±0,0555
E5-0,9%F5-790		5,25±0,82	9,61±0,53	0,11±0,0185	0,50±0,1317
E8- 0,9%F10-790		9,25±0,80	9,99±0,63	0,29±0,0329	0,35±0,0033
E12-0,5%F9-900	900	6,71±0,07	7,74±0,22	0,40±0,0084	0,67±0,1134

Fonte: Autora, 2026.

A mistura de referência sem fibras, *E14-0%F0-700*, também apresentou ganho significativo de resistência à tração entre 28 e 56 dias, da ordem de aproximadamente 2MPa, evidenciando a contribuição da matriz densa e bem empacotada para o desempenho à tração e à dissipação de energia, mesmo na ausência de reforço fibroso.

Do ponto de vista do mecanismo de reforço, espera-se que o aumento do teor e do comprimento das fibras resulte em maiores valores de resistência à tração e tenacidade, em

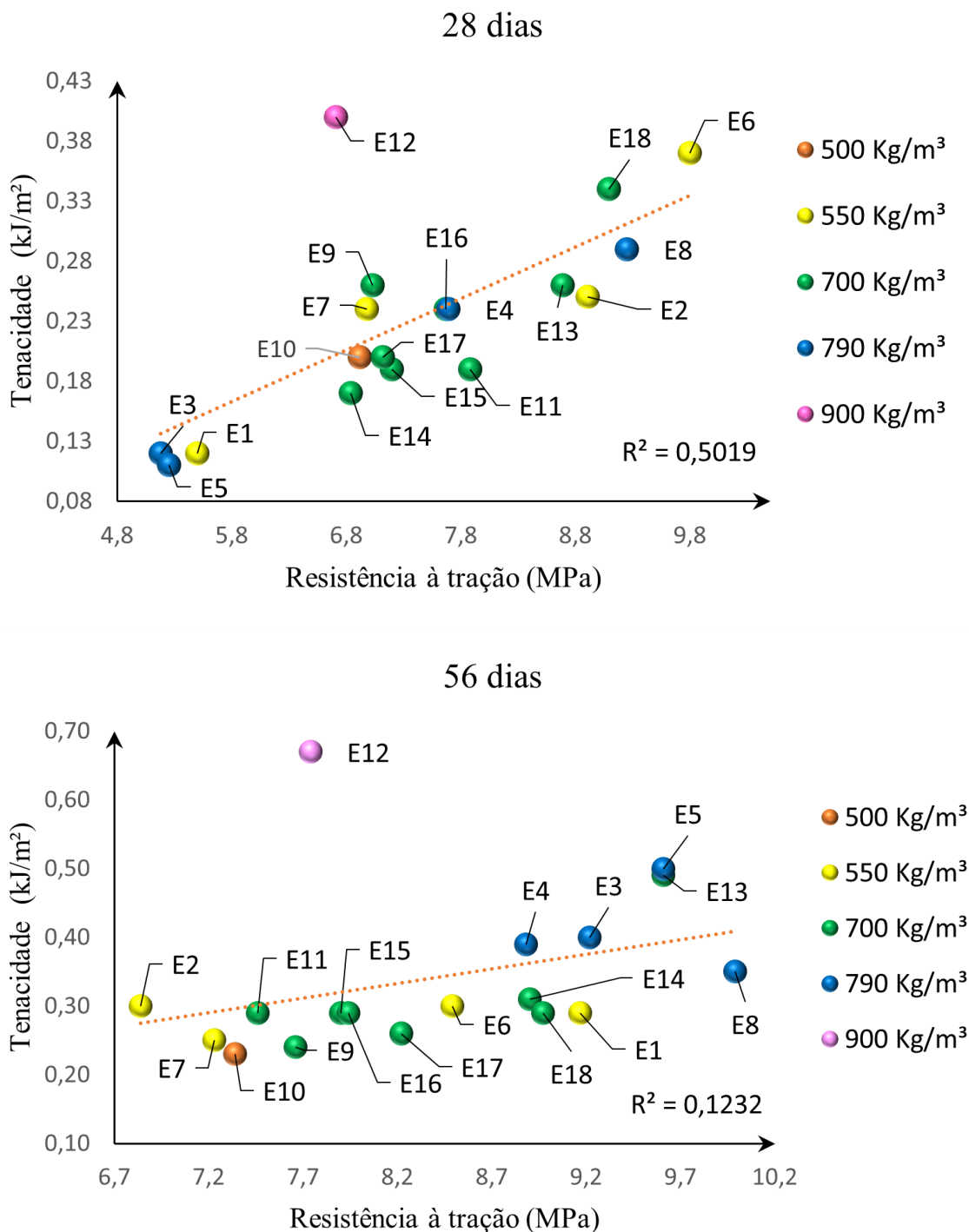
razão do efeito de ponteamto de fissuras e transferência de tensões. Nesse contexto, a mistura *E8- 0,9%F10-790*, com 0,9% de fibras e comprimento de 10mm, apresentou o maior valor alcançado de resistência à tração na flexão, confirmando a eficiência do reforço fibroso quando há um equilíbrio entre teor e geometria das fibras.

De forma semelhante, a mistura *E13-1,0%F9 -700*, com 1,0% de fibras de carbono e comprimento de 9mm, apresentou aos 28 dias valor de tenacidade igual ao da mistura *E9-0,5%F13-700*, que utiliza fibras de maior comprimento (13mm) e menor teor (0,5%). Entretanto, aos 56 dias, a mistura *E13-1,0%F-700* apresentou um aumento expressivo da tenacidade (47%), alcançando valores significativamente superiores aos da mistura *E9-0,5%F13-700* na mesma idade.

Esse comportamento indica que, embora o comprimento das fibras contribua para o desempenho pós-fissuração em idades iniciais, o aumento do teor de fibras exerce influência mais pronunciada na evolução da tenacidade ao longo do tempo, potencializando a capacidade de absorção de energia do compósito. Esses padrões são evidenciados no gráfico da Figura 5.6, que compara a resistência à tração na flexão e a tenacidade nas idades de 28 e 56 dias dos compósitos.

Os resultados de resistência à tração na flexão e tenacidade também evidenciam o potencial das misturas com reduzido consumo de cimento. A formulação *E10-0,5%F9-500*, com apenas 500 kg/m³ de cimento, apresentou resistência à tração na flexão de 6,92 MPa aos 28 dias e 7,34 MPa aos 56 dias, acompanhada de tenacidade de 0,20 e 0,23 kJ/m², respectivamente. Embora não tenham sido os maiores valores obtidos no conjunto experimental, esses resultados demonstram que a redução do consumo de cimento não impediu a obtenção de níveis satisfatórios de resistência à tração e capacidade de absorção de energia. Esse resultado reforça que o aumento do consumo de cimento, isoladamente, não é suficiente para garantir ganhos proporcionais nessas propriedades, destacando o potencial de obtenção de UHPC com menor consumo de cimento e bom desempenho mecânico.

Figura 5.6: Relação entre resistência à tração e tenacidade



Fonte: Autora, 2026.

A mistura *E12-0,5%F9-900*, com consumo de cimento de 900kg/m³, é notadamente a que apresentou maior tenacidade nas duas idades de ensaio. Embora sua composição resulte em maior teor de ar incorporado, esse resultado indica que a dissipação de energia

do compósito não está diretamente associada apenas à densidade da matriz, mas principalmente à eficiência do mecanismo de pontamento e arrancamento (*pull-out*) das fibras.

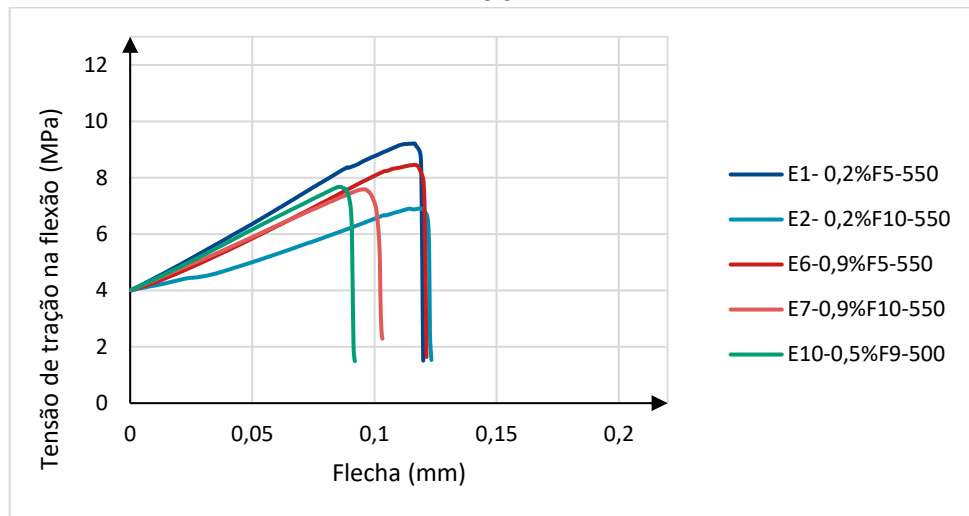
A partir desses resultados, infere-se que a menor rigidez da matriz associada à mistura E12-0,5%F9-900 favorece a ocorrência de maiores deformações quando comparada às misturas com empacotamento granular mais denso e maior teor de fibras, como a E13-1,0%F9-700. Essa condição de maior deformação promove a ampliação da área sob a curva força $\times$ flecha obtida no ensaio de tração na flexão, refletindo-se diretamente em valores mais elevados de tenacidade do compósito, conforme pode ser observado na Figura 5.7(d).

Com o objetivo de ampliar a análise e comparar os picos de resistência à tração na flexão e a tenacidade das diferentes misturas, a Figura 5.4 apresenta as curvas médias de tensão de tração na flexão em função da flecha para todas as misturas aos 56 dias. Para facilitar a interpretação dos resultados, os gráficos foram organizados de acordo com o consumo de cimento, agrupando as misturas com 500 e 550 kg/m³, 700 kg/m³, 790 kg/m³ e, por fim, aquelas com maiores consumos de cimento (850 e 900 kg/m³).

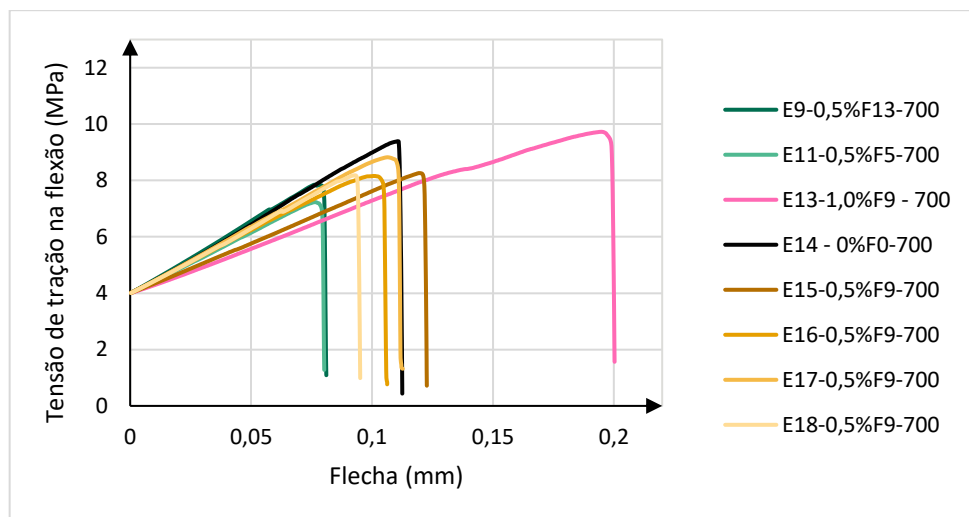
Com o objetivo de padronizar a representação gráfica e facilitar a comparação entre os resultados, as curvas de tensão de tração na flexão foram ajustadas para que o trecho inicial coincidissem em 4 MPa. Essa padronização foi adotada exclusivamente para fins de visualização, permitindo uma melhor identificação das tendências observadas entre as diferentes misturas.

Observa-se, ainda, a ausência de comportamento de *strain hardening* nas misturas avaliadas, pois após o pico de tensão, as curvas apresentaram uma queda da capacidade resistente. Portanto, os teores, comprimentos e propriedades das fibras de carbono estudadas não foram suficientes para atingir o volume crítico de fibras de forma a resistirem às tensões transmitidas pela matriz na sua ruptura.

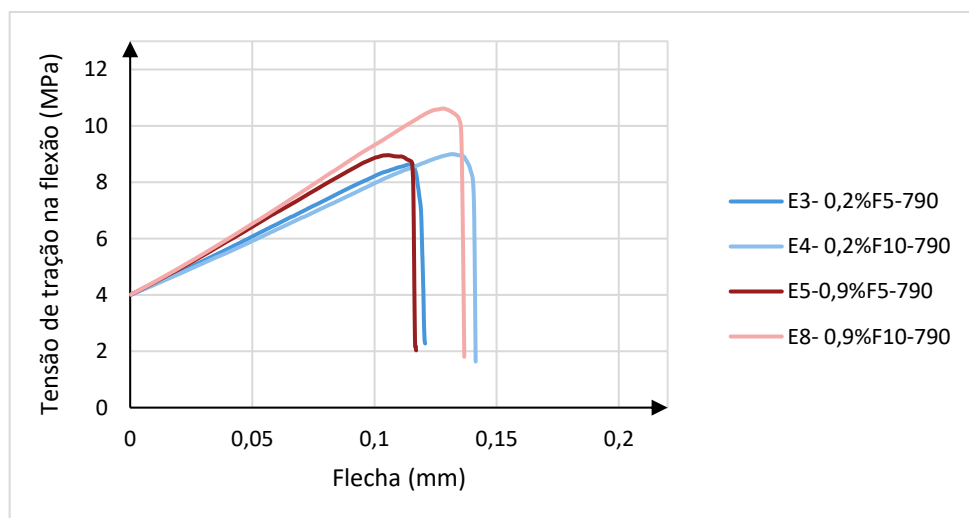
Figura 5.7: Comparação entre picos de resistência à tração de todos os experimentos realizados aos 56 dias



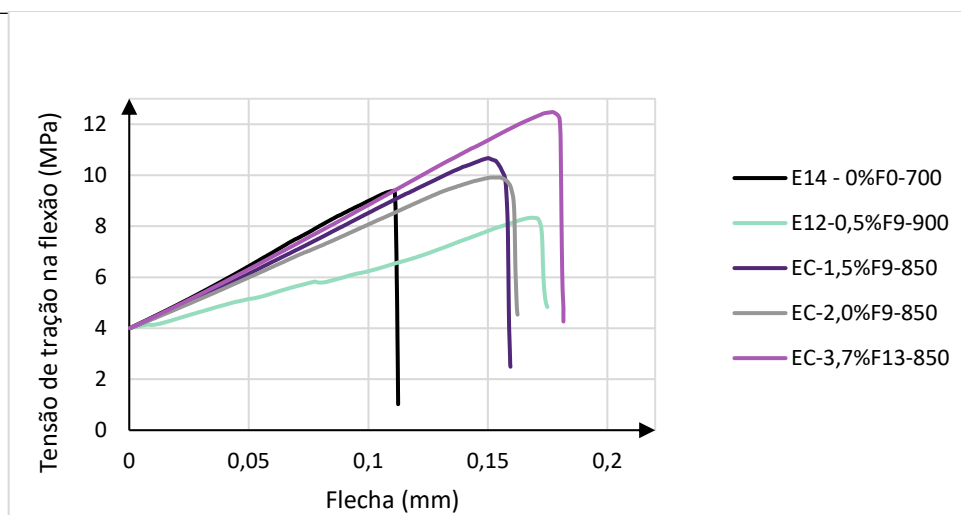
a) Misturas com 500 e 550 kg/m³ de consumo de cimento



b) Misturas com 700 kg/m³ de consumo de cimento



c) Misturas com 790 kg/m³ de consumo de cimento

d) Misturas com 850 e 900 kg/m³ de consumo de cimento

Fonte: Autora, 2026.

A influência do teor de fibras sobre a tenacidade torna-se evidente na comparação entre as misturas com consumo de cimento de 700 kg/m³, apresentada na Figura 5.7 (b). A mistura E13-1,0%F9-700, contendo 1,0% de fibras de carbono em volume, atingiu aproximadamente o dobro da deformação em relação às demais misturas desse grupo, que continham 0,5% de fibras. Entretanto, a tensão máxima de tração na flexão da mistura E13-1,0%F9-700 apresentou valores próximos aos obtidos pela mistura de referência E14-0%F0-700, indicando que, nas condições avaliadas, o aumento do teor de fibras exerceu influência mais significativa sobre a capacidade de deformação e a tenacidade do compósito do que sobre a resistência máxima à tração na flexão.

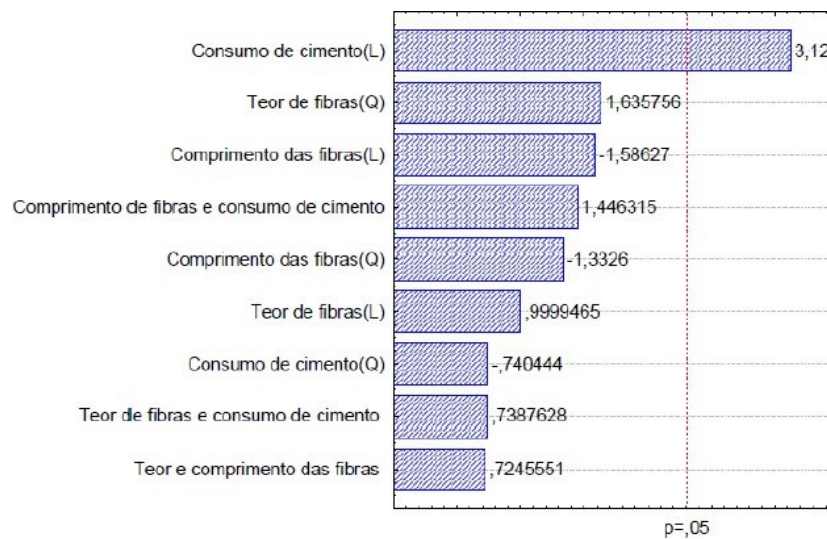
O efeito combinado do aumento do consumo de cimento, do teor volumétrico de fibras e do comprimento das fibras também resultou em incrementos tanto da tensão máxima de tração na flexão quanto da deformabilidade do compósito. Conforme apresentado na Figura 5.7 (d), a mistura EC-3,7%F13-850, que combina o maior teor volumétrico de fibras (3,7%), o maior comprimento de fibras e um consumo de cimento de 850 kg/m³, apresentou desempenho superior às demais misturas comparadas, alcançando os maiores valores de tensão máxima, deformabilidade e, consequentemente, de tenacidade.

A análise estatística dos resultados de resistência à tração (σ_t) aos 56 dias, foi representada por meio de uma equação polinomial de segunda ordem, expressa na Equação 5.3, a qual apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,69.

$$\sigma_t = 8,1410 + 0,6370 x_1 - 0,1815 x_2 + 1,5880 x_3 + 1,2070 x_1^2 - 0,0144 x_2^2 - 0,03186 x_3^2 + 0,0659 x_1 x_2 + 0,3960 x_1 x_3 + 0,1446 x_2 x_3 \quad (5.3)$$

O gráfico de Pareto apresentado na Figura 5.8 confirma a mesma variável estatisticamente significativa indicada pelo modelo matemático, sendo o consumo de cimento o fator de maior influência sobre a resistência à tração nesta idade.

Figura 5.8: Variável significativa para resistência à tração aos 56 dias



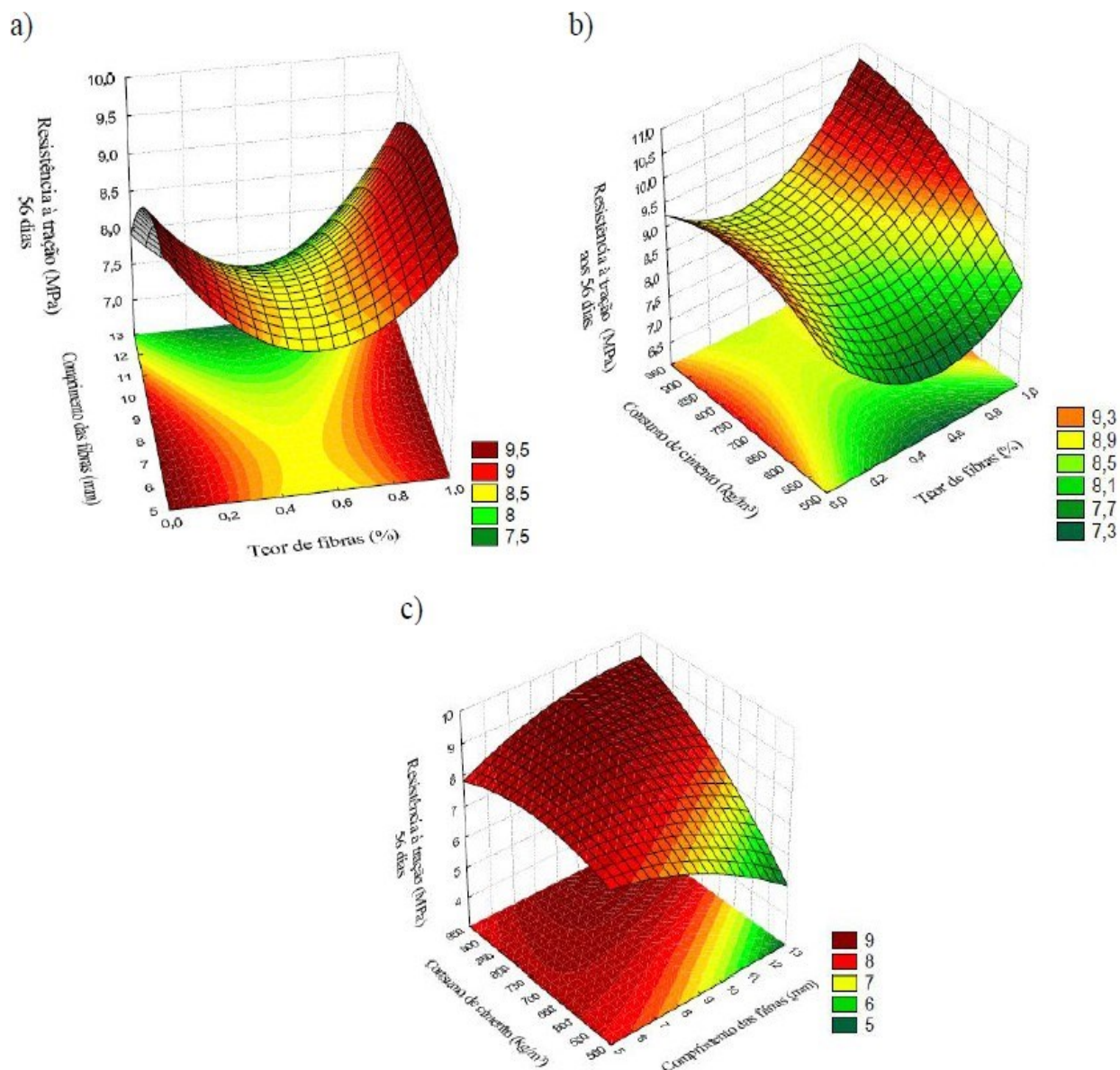
Fonte: Autora, 2026.

Esta resposta matemática pode ser mais bem observada nas superfícies de resposta referente à resistência à tração aos 56 dias, como ilustra a Figura 5.9.

As correlações entre o teor de fibras e as demais variáveis resultam na formação de pontos de sela nas superfícies de resposta, indicando a ausência de condições ótimas globais associadas a essas interações. Por outro lado, a interação entre o consumo de cimento e o comprimento das fibras conduz a regiões que favorecem a otimização da resistência à tração do UHPC reforçado com fibras de carbono.

Conforme observado na Figura 5.9-c, consumos de cimento superiores a 800kg/m³ estão associados a um incremento significativo dessa propriedade mecânica.

Figura 5.9: Superfícies de respostas para resistência à tração aos 56 dias



Fonte: Autora, 2026.

Ao analisar os valores máximos de tenacidade, observa-se um aumento progressivo do desempenho entre os teores de 0 e 0,5% de fibras, de 0,31 a 0,67kJ/m² respectivamente. Nesse intervalo, é provável que as fibras apresentem melhor dispersão e menor tendência à formação de aglomerados, favorecendo a criação de múltiplas pontes de fissura e, conseqüentemente, maior capacidade de dissipação de energia.

Por outro lado, para teores mais elevados de fibras de carbono (0,9 e 1,0%), os valores máximos de tenacidade tendem a se estabilizar, atingindo aproximadamente 0,50 e 0,49kJ/m², respectivamente. Em comparação com teores intermediários, observa-se uma

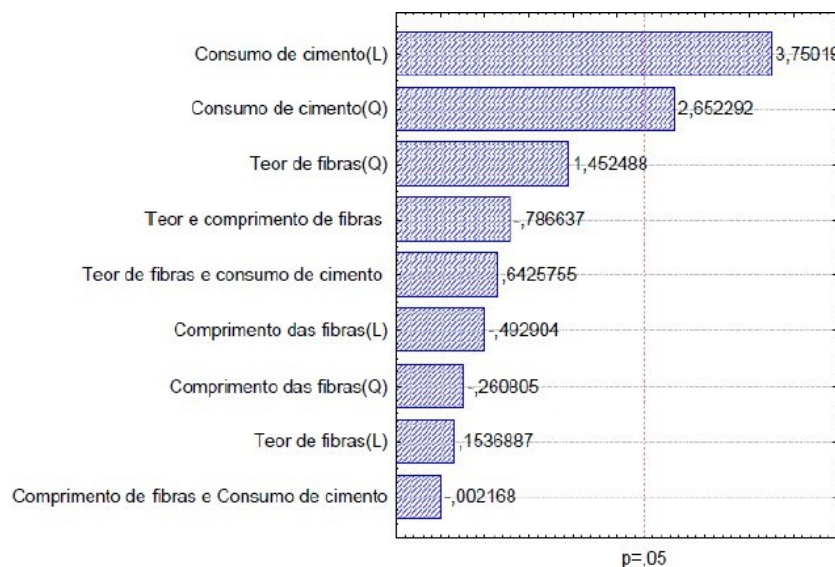
redução relativa do ganho de tenacidade, possivelmente associada à dispersão menos eficiente das fibras, com formação de aglomerados que atuam como defeitos locais e limitam o desempenho pós-fissuração do compósito.

A expressão matemática representativa da variável resposta tenacidade (T) aos 56 dias é apresentada na Equação 5.4. O coeficiente de determinação (R^2) associado ao modelo foi igual a 0,82, indicando um bom ajuste da expressão aos dados experimentais.

$$T = 0,2689 + 0,0085 x_1 - 0,0049 x_2 + 0,1663 x_3 + 0,0934 x_1^2 - 0,0002 x_2^2 + 0,0995 x_3^2 - 0,0062 x_1 x_2 + 0,0300 x_1 x_3 - 0,0000 x_2 x_3 \quad (5.4)$$

Portanto, visando à maximização da tenacidade aos 56 dias, a expressão matemática indica que apenas o consumo de cimento apresenta significância estatística para o UHPC reforçado com fibras de carbono. Este resultado também está representado no gráfico de Pareto da Figura 5.10:

Figura 5.10: Variável significativa para a tenacidade aos 56 dias

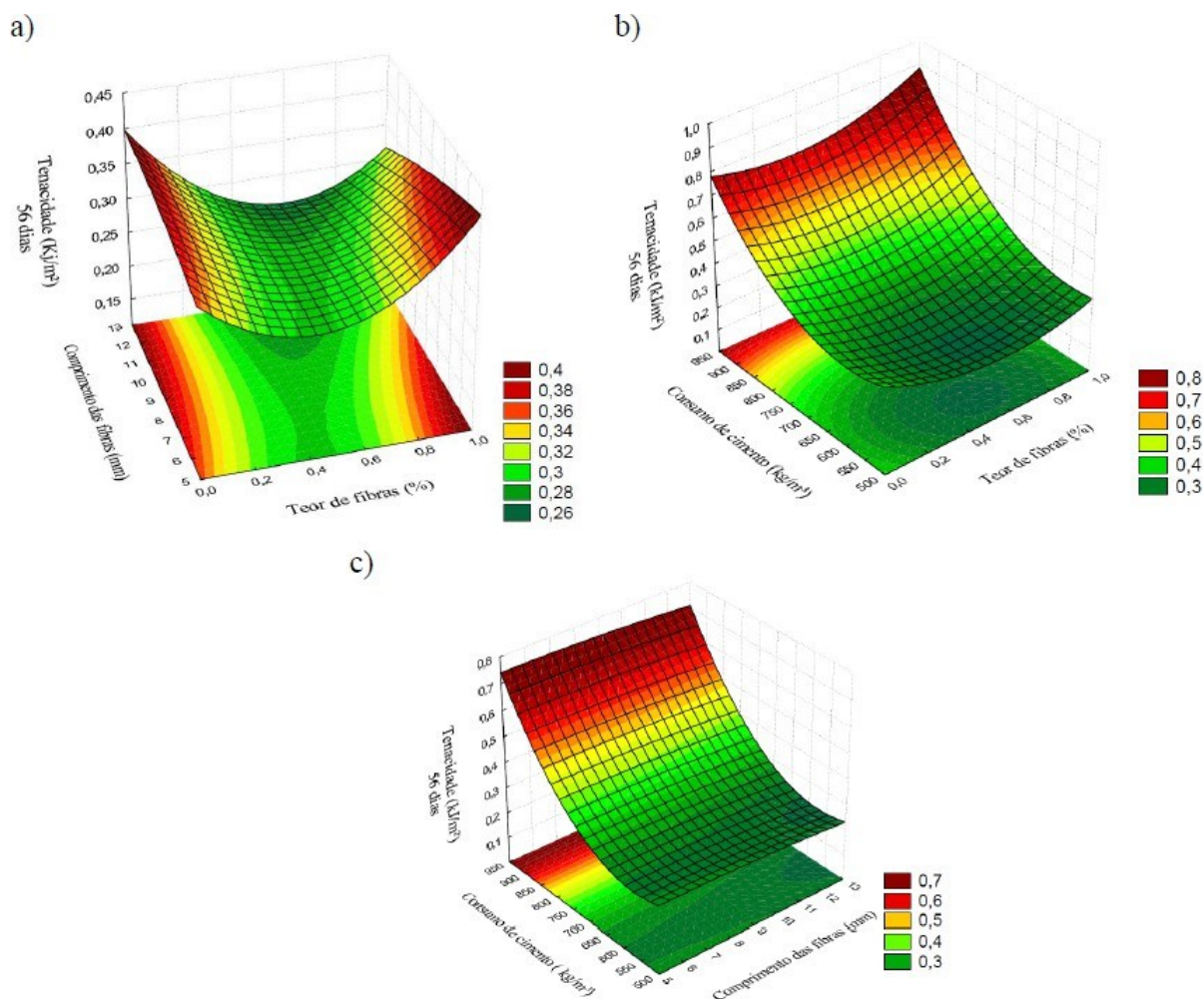


Fonte: Autora, 2026

Assim como observado para a resistência à tração, a tenacidade aos 56 dias é predominantemente influenciada pelo consumo de cimento, sendo esta a única variável com significância estatística no intervalo experimental analisado. As superfícies de resposta apresentadas na Figura 5.11 confirmam essa tendência.

Portanto, conforme evidenciado nos gráficos da Figura 5.11-b e 5.11-c, consumos de cimento superiores a 850kg/m^3 resultam em maiores valores de tenacidade do compósito aos 56 dias.

Figura 5.11: Superfícies de respostas para tenacidade aos 56 dias



Fonte: Autora, 2026.

5.3.3 Módulo de elasticidade

Os resultados do módulo de elasticidade dinâmico (GPa) e da densidade de massa aparente no estado endurecido (g/cm^3), aos 56 dias, estão apresentados na Tabela 5.7. Para esse levantamento, foram consideradas as médias dos resultados obtidos a partir de quatro corpos de prova cilíndricos ensaiados.

Tabela 5.7: Módulo de elasticidade dinâmico e densidade de massa aparente das diferentes formulações estudadas

Experimentos	Consumo de cimento (kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade de massa aparente (g/cm ³)
E10-0,5%F9-500	500	54,31±0,13	2,48
E1- 0,2%F5-550	550	53,93±0,24	2,49
E2- 0,2%F10-550		55,42±0,20	2,51
E6-0,9%F5-550		51,84±0,20	2,47
E7-0,9%F10-550		54,03±0,12	2,49
E9-0,5%F13-700	700	53,98±0,47	2,48
E11-0,5%F5-700		53,54±0,10	2,46
E13-1,0%F9 - 700		52,64±0,02	2,45
E14 - 0%F0-700		55,67±0,22	2,48
E15-0,5%F9-700		52,39±0,26	2,45
E16-0,5%F9-700		52,47±0,14	2,47
E17-0,5%F9-700		53,05±0,02	2,48
E18-0,5%F9-700		53,42±0,24	2,47
E3- 0,2%F5-790	790	52,90±0,18	2,46
E4- 0,2%F10-790		51,55±0,16	2,43
E5-0,9%F5-790		47,73±0,48	2,40
E8- 0,9%F10-790		48,94±0,06	2,38
E12-0,5%F9-900	900	45,79±0,16	2,34

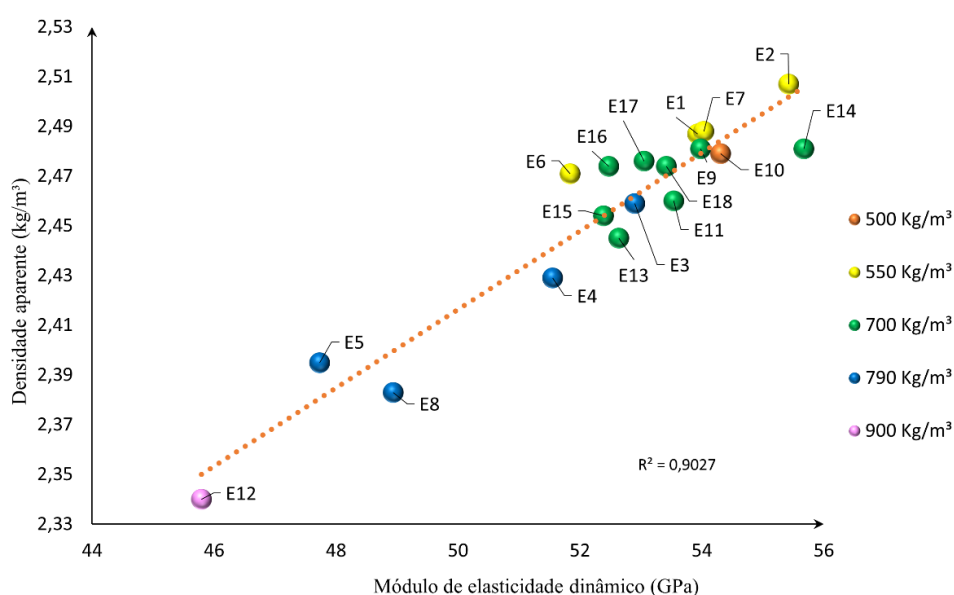
Fonte: Autora, 2026.

Primeiramente, observa-se uma forte correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e densidade aparente, que está ilustrada na Figura 5.12, com uma correlação linear elevada ($R^2 \approx 0,90$) entre as duas propriedades. Isto induz que o módulo dinâmico do UHPC reforçado com fibras de carbono é bastante sensível à compacidade dos compósitos, refletida pela densidade aparente e que pequenas variações de densidade resultam em variações significativas de rigidez do material.

Os consumos de cimento maiores, de 790 e 900kg/m³, não implicam em maior módulo de elasticidade, pelo contrário, a tendência percebida é decrescente como se observa na Figura 5.13. Maiores teores de cimento na mistura podem provocar retração e microfissuração mais acentuada em relação a misturas com menores teores, o que afeta de modo direto a rigidez global.

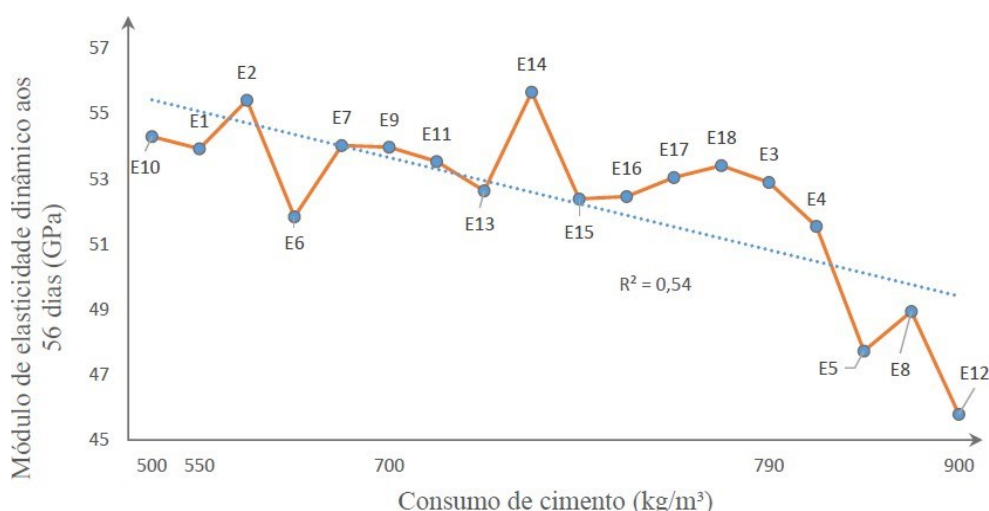
Em contrapartida, as misturas com menores consumos de cimento (500 e 550 kg/m³) apresentaram módulos de elasticidade de até 8,5 GPa superiores aos obtidos para as composições mais ricas em cimento. Esse resultado evidencia o potencial de otimização do UHPC, uma vez que permite reduções expressivas no consumo de cimento, de até 400 kg/m³, sem prejuízo ao desempenho mecânico e, em determinados casos, com incremento da rigidez do compósito.

Figura 5.12: Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a densidade aparente do UHPC



Fonte: Autora, 2026.

Figura 5.13: Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e consumo de cimento



Fonte: Autora, 2026.

Como mencionado no levantamento bibliográfico de Rompa e Gidrão (2020), o módulo de elasticidade para o UHPC é de 50GPa em média, sendo do que neste estudo o valor máximo encontrado foi de 55,67GPa. Com base no estudo dos autores, os resultados nesta pesquisa reafirmam que a melhora das outras propriedades como resistência à compressão e tração não é acompanhada do aumento do módulo de elasticidade.

A influência das fibras parece ser limitada nos resultados de módulo de elasticidade, porém nota-se que misturas com teores mais altos de fibra e com maior tenacidade, resultam em módulos de elasticidade menores. Assim, conclui-se que a fibra é um componente que impacta negativamente nos resultados de módulo de elasticidade do UHPC com fibras de carbono, uma vez que com a inserção de fibras, a porosidade do compósito aumenta.

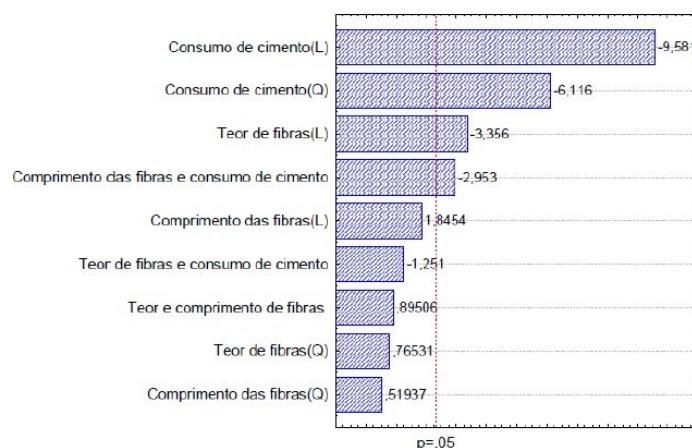
Ao comparar as misturas *E12-0,5%F9-900* e *E14-0%F0-700* percebe-se como a matriz compacta influencia na resposta elástica do material. A mistura referência, *E14-0%F0-700*, sem fibras, que demonstrou em resultados anteriores ter um empacotamento de partículas eficiente, apresentou o maior módulo de elasticidade dinâmico associado a uma alta densidade aparente da massa no estado endurecido dentre os dezoito experimentos. Em resumo, a rigidez do UHPC com fibras de carbono é governada pela compactidade dos grãos e pela configuração da microestrutura da matriz cimentícia.

A Equação 5.5 apresenta o modelo estatístico ajustado para representar o Módulo de Elasticidade (ME) aos 56 dias. O ajuste aos dados experimentais é altamente satisfatório, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,97, indicando que o modelo explica 97% da variabilidade observada, evidenciando sua excelente capacidade preditiva.

$$ME = 53,1652 - 1,8775 x_1 + 0,1855 x_2 - 4,2803 x_3 + 0,4958 x_1^2 - 0,0050 x_2^2 - 2,3111 x_3^2 + 0,0715 x_1 x_2 - 0,5891 x_1 x_3 - 0,2593 x_2 x_3 \quad (5.5)$$

De forma objetiva, a Figura 5.14 evidencia as variáveis estatisticamente significativas para o módulo de elasticidade aos 56 dias.

Figura 5.14: Variáveis significativas para o módulo de elasticidade aos 56 dias

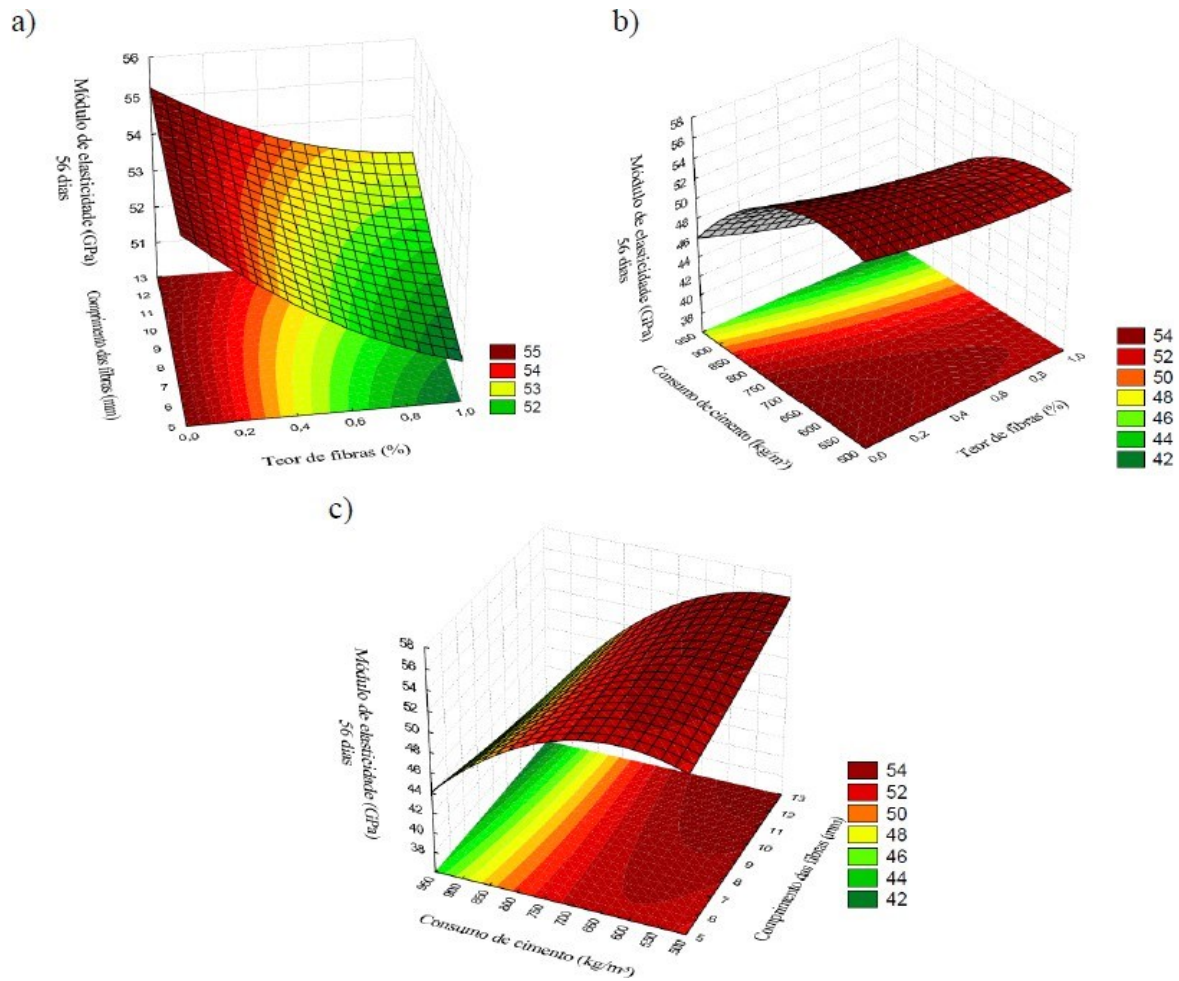


Fonte: Autora, 2026.

O consumo de cimento, o teor de fibras e a interação entre o comprimento das fibras e o consumo de cimento configuram-se como as variáveis estatisticamente significativas para o módulo de elasticidade do compósito aos 56 dias. As superfícies de resposta, modeladas conforme apresentado na Figura 5.15, indicam regiões ótimas associadas à obtenção de elevados valores de módulo de elasticidade para o compósito desenvolvido nesta pesquisa.

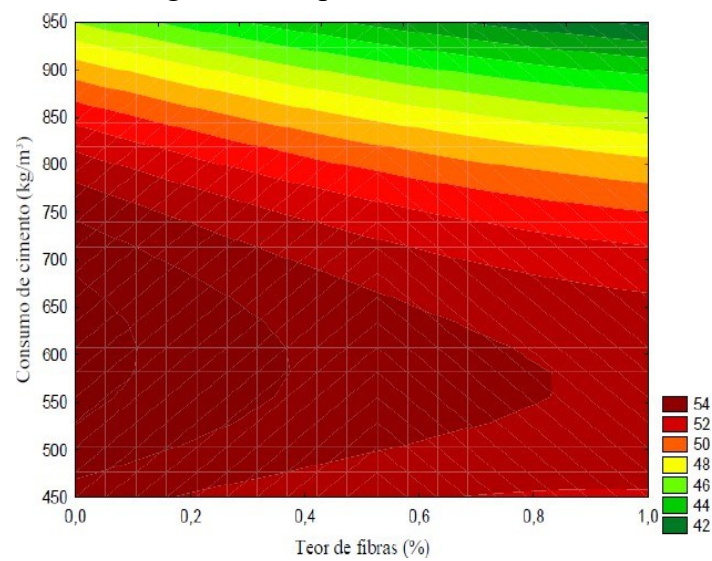
A Figura 5.16, referente à interação entre o consumo de cimento e o teor de fibras de carbono, evidencia a região ótima associada ao aumento do módulo de elasticidade. A partir da análise preliminar dos resultados de módulo de elasticidade, sabe-se que a presença de fibras tende a limitar a obtenção de valores elevados dessa propriedade, fato evidenciado nas superfícies de resposta. As análises indicam que menores teores de fibras, associados a consumos de cimento inferiores a 800kg/m^3 , favorecem maiores valores de módulo de elasticidade aos 56 dias.

Figura 5.15: Superfícies de respostas para o módulo de elasticidade aos 56 dias



Fonte: Autora, 2026.

Figura 5.16: Região ótima para módulo de elasticidade aos 56 dias



Fonte: Autora, 2026.

5.3.4 Volume de poros por absorção total

A Tabela 5.8 reúne os valores médios do volume de poros permeáveis e seus respectivos desvios padrão, calculados a partir dos corpos de prova correspondentes a cada traço analisado, aos 28 dias de idade. A tabela também apresenta os valores de resistência à compressão e densidade de massa aparente aos 28 dias do UHPC reforçado com fibras de carbono, uma vez que são propriedades correlacionadas. Os resultados do ensaio de absorção total indicam que valores maiores no consumo de cimento, que consequentemente aumentam o volume da matriz, estão relacionados aos maiores volumes de poros permeáveis. De modo geral, maiores valores de absorção e menores densidades estão associados a menores resistências à compressão, tendência que pode ser observada no gráfico da Figura 5.17.

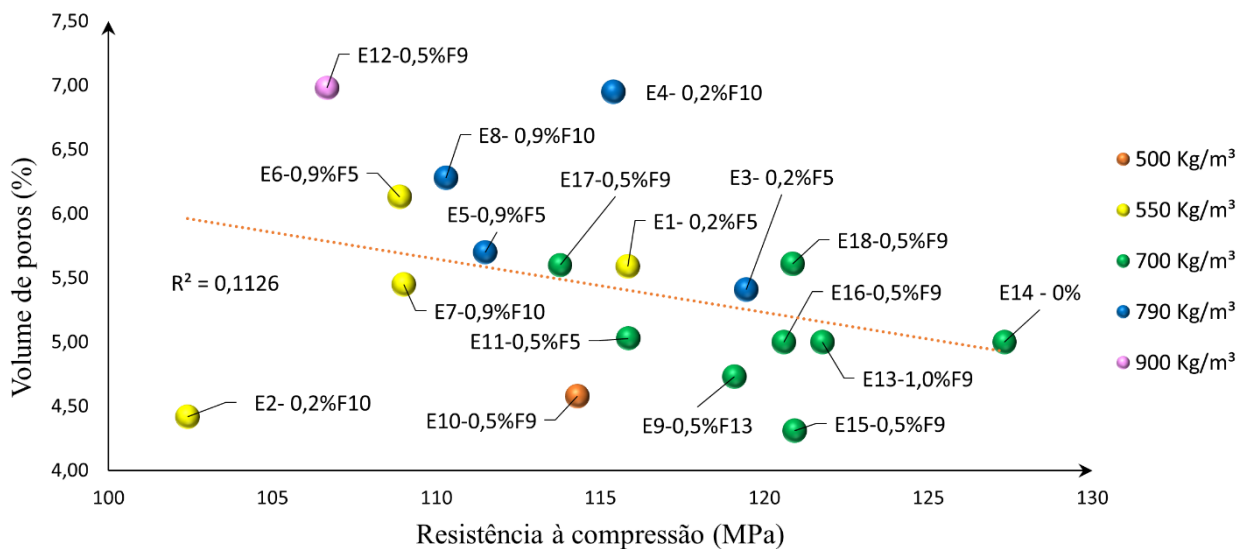
Tabela 5.8: Média de volume de poros obtida por ensaio de absorção total aos 28 dias

Experimentos	Consumo de cimento (kg/m ³)	Média do volume de poros (%)	Resistência à compressão média (MPa)	Densidade de massa aparente (g/cm ³)
E10-0,5%F9-500	500	4,58±0,03	114,29±2,24	2,48
E1- 0,2%F5-550	550	5,59±0,05	115,83±0,32	2,49
E2- 0,2%F10-550		4,42±0,10	102,41±3,46	2,51
E6-0,9%F5-550		6,13±0,15	108,88±3,13	2,47
E7-0,9%F10-550		5,45±0,15	109±0,90	2,49
E9-0,5%F13-700	700	4,73±0,04	119,08±0,23	2,48
E11-0,5%F5-700		5,03±0,05	115,85±10,10	2,46
E13-1,0%F9 - 700		5,00±0,18	121,77±3,00	2,45
E14 - 0%F0-700		5,00±0,10	127,32±1,14	2,48
E15-0,5%F9-700		4,31±0,14	120,92±4,05	2,45
E16-0,5%F9-700		5,00±0,17	120,59±0,88	2,47
E17-0,5%F9-700		5,60±0,16	113,77±1,66	2,48
E18-0,5%F9-700		5,61±0,11	120,86±0,37	2,47
E3- 0,2%F5-790	790	5,41±0,17	119,45±1,17	2,46
E4- 0,2%F10-790		6,95±0,36	115,39±1,03	2,43
E5-0,9%F5-790		5,70±0,04	111,49±3,22	2,40
E8- 0,9%F10-790		6,28±0,19	110,29±5,11	2,38
E12-0,5%F9-900	900	6,98±0,07	106,66±3,82	2,34

Fonte: Autora, 2026.

As misturas *E5-0,9%F5-790* e *E8- 0,9%F10-790* possuem teores elevados de fibras o que consequentemente aumenta o número de vazios na pasta e o volume de poros global. Todavia, observa-se uma faixa de dosagem otimizada, com consumo de cimento em torno de 700 kg/m^3 , na qual valores mais baixos e estáveis de volume de poros foram obtidos, acompanhados por desempenho mecânico satisfatório em termos de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Figura 5.17: Relação entre o volume de poros e a resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Autora, 2026.

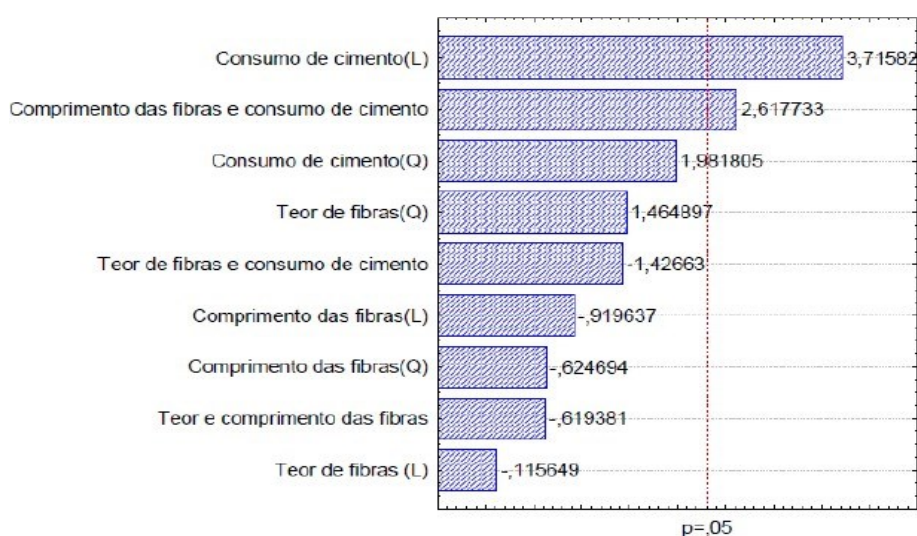
A variável dependente porosidade (V =volume de poros permeáveis em %) foi modelada por meio de regressão linear múltipla, resultando em uma equação de segundo grau apresentada na Equação 5.1. As variáveis independentes consideradas são: X_1 = teor de fibras (%), X_2 = Comprimento das fibras (mm) e X_3 = Consumo de cimento (kg/m^3).

O modelo obtido apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,78, indicando bom ajuste aos dados experimentais.

$$V(\%) = 4,9567 + 0,3376x_1 - 0,0896x_2 + 1,0828x_3 + 0,2445x_1^2 + 0,00470x_2^2 + 0,5909x_3^2 - 0,0223x_1x_2 - 0,3027x_1x_3 + 0,1813x_2x_3 \quad (5.1)$$

O gráfico de Pareto fornecido pelo *software Statistica 12*, permite identificar de forma rápida as variáveis que exercem influência estatisticamente significativa sobre a resposta analisada, considerando-se significativos os efeitos cujos retângulos estiverem à direita da linha divisória ($p = 0,05$). Nesse contexto, a Figura 5.18 apresenta o gráfico de Pareto correspondente à análise do volume de poros da mistura aos 28 dias.

Figura 5.18: Variáveis significativas para volume de poros aos 28 dias

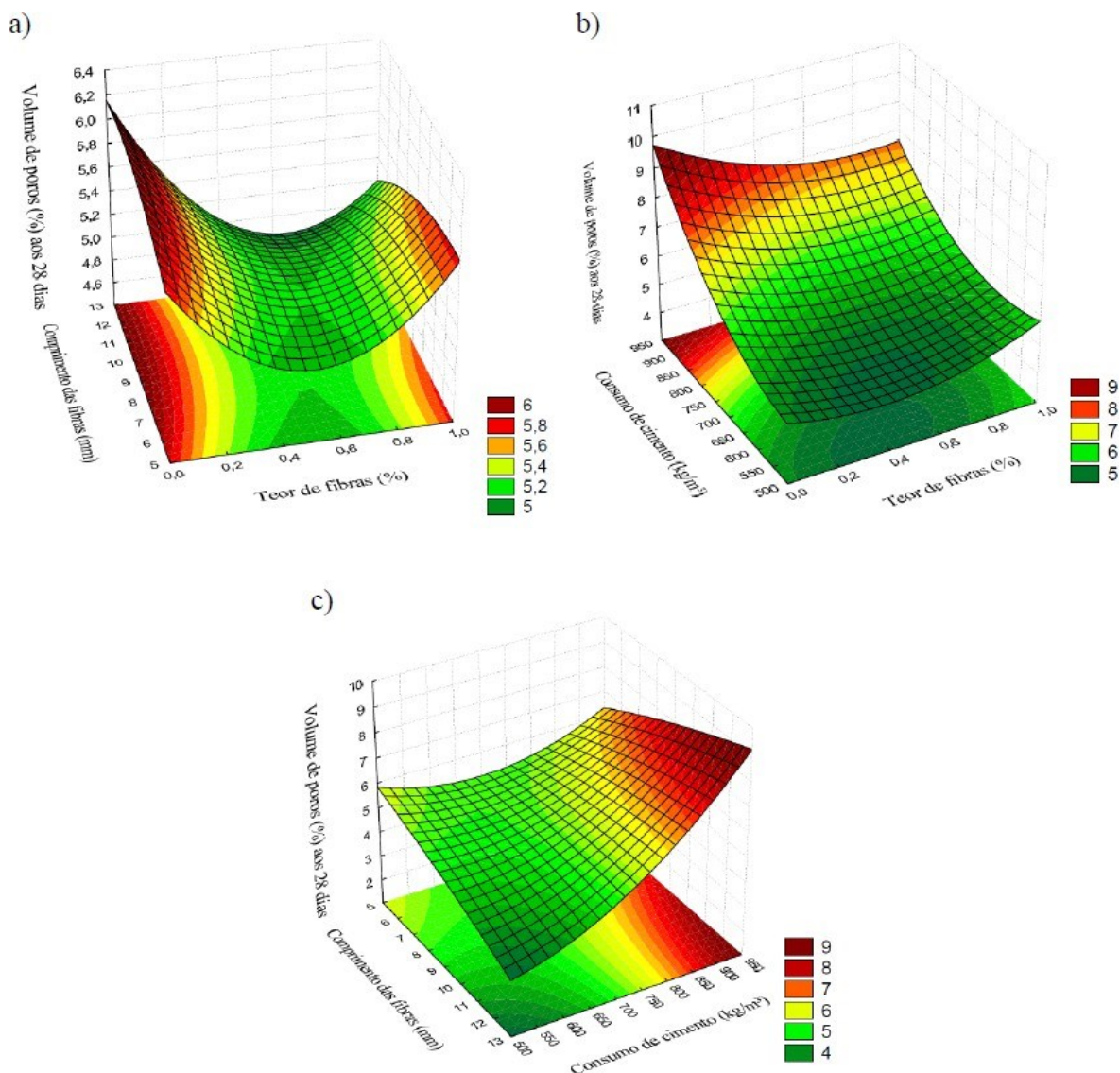


Fonte: Autora, 2026.

Observa-se de maneira concisa que o consumo de cimento (efeito linear) e a interação entre o comprimento das fibras e o consumo de cimento influenciam o volume de poros permeáveis. As superfícies de respostas da Figura 5.19 indica como é a relação entre as variáveis.

A análise das superfícies de resposta indica que o aumento do consumo de cimento e do comprimento das fibras está associado a um incremento no volume de poros permeáveis. O aumento do teor de cimento implica, necessariamente, em maior pastna mistura, o que pode favorecer a formação de vazios. Além disso, as fibras exercem influência significativa sobre a porosidade do compósito, uma vez que, quando não se encontram adequadamente dispersas na matriz cimentícia, podem originar poros e vazios de maiores dimensões, decorrentes de aglomerações e dificuldades de adensamento, conforme observado por C. Wang *et al.* (2008).

Figura 5.19: Superfícies de respostas para volume de poros aos 28 dias



Fonte: Autora, 2026.

5.3.5 Resistividade elétrica

As resistividades elétricas volumétricas para as idades de 28 e 56 dias, estão descritas na Tabela 5.9, com os resultados em Ωm , como a média dos três corpos de prova prismáticos saturados seguidas de seus respectivos desvios padrão. Nesta tabela também estão compilados os resultados de resistência à compressão nas duas idades de ensaio, em razão de sua correlação com a resistividade elétrica, em que as menores resistividades estão associadas diretamente aos maiores consumos de cimento, como indica o gráfico da Figura 5.20.

Tabela 5.9: Resistividade volumétrica medida nos experimentos aos 28 e 56 dias

Experimento	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistividade média aos 28 dias (Ω m)	Resistividade média aos 56 dias (Ω m)	Resistência à compressão média (MPa) aos 28 dias	Resistência à compressão média (MPa) aos 56 dias
E10-0,5%F9-500	500	288±0,12	405±1,01	114,29±2,24	120,22±1,49
E1- 0,2%F5-550	550	297±0,56	495±0,10	115,83±0,32	108,43±0,35
E2- 0,2%F10-550		280±0,45	438±0,57	102,41±3,46	122,87±0,24
E6-0,9%F5-550		258±0,04	491± 0,92	108,88±3,13	114,26±0,28
E7-0,9%F10-550		263±0,75	468 ± 1,34	109±0,90	122,76±3,08
E9-0,5%F13-700	700	369±0,22	561±0,60	119,08±0,23	128,67±0,27
E11-0,5%F5-700		342±0,58	462±0,54	115,85±10,10	134,53±0,52
E13-1,0%F9 - 700		289±0,07	359±2,41	121,77±3,00	129,61±2,80
E14 - 0%F0-700		289±0,22	590±1,52	127,32±1,14	128,97±0,24
E15-0,5%F9-700		425 ± 0,98	473 ±0,23	120,92±4,05	129,34±0,19
E16-0,5%F9-700		335 ±0,50	471 ± 0,91	120,59±0,88	126,88±7,53
E17-0,5%F9-700		326 ±0,21	566 ±0,68	113,77±1,66	131,7±0,34
E18-0,5%F9-700		368 ± 0,73	553 ±1,37	120,86±0,37	121,06±1,08
E3- 0,2%F5-790	790	77±1,76	85,46±1,76	119,45±1,17	124,3±3,24
E4- 0,2%F10-790		77±0,39	81,68 ± 0,28	115,39±1,03	122,42±5,78
E5-0,9%F5-790		54±0,72	39±0,49	111,49±3,22	123,66±0,23
E8- 0,9%F10-790		32±0,23	66±1,12	110,29±5,11	118,73±0,82
E12-0,5%F9-900	900	7±0,01	11±0,30	106,66±3,82	101,12±2,07

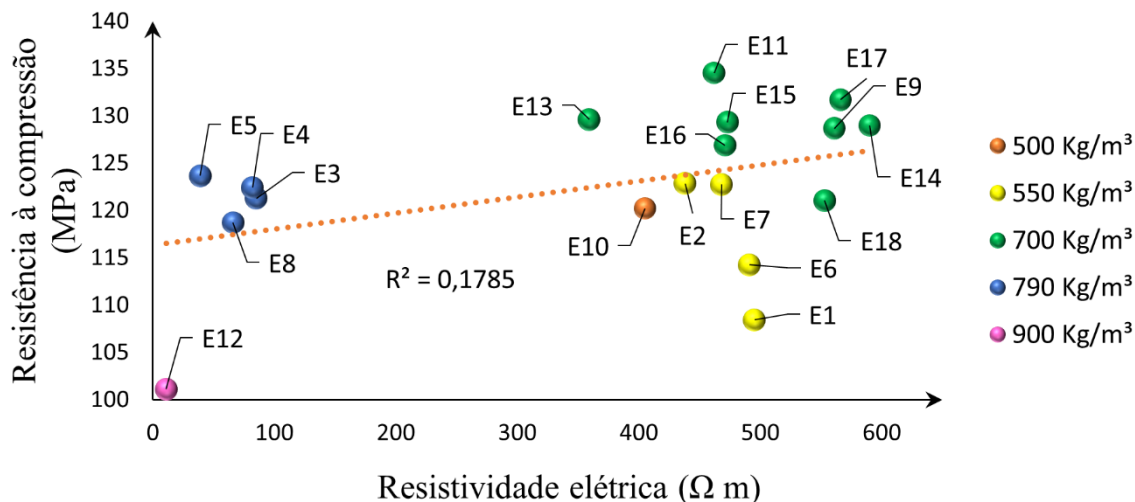
Fonte: Autora, 2026.

Os resultados de resistividade elétrica dos compósitos alcançam acréscimos significativos entre as idades de 28 e 56 dias, principalmente para as misturas de matrizes mais densas como a *E6-0,9%F5-550*, *E7-0,9%F10-550* e *E14-0%F0-700*, com bons resultados também nos pontos centrais, principalmente em *E17-0,5%F9-700* e *E18-0,5%F9-700*. Esse aumento indicia boa continuidade no processo de hidratação, com refinamento de poros e conseqüentemente melhora na densificação da matriz com a idade.

Resistividades inferiores a 100 Ω m estão relacionadas aos menores valores de resistência à compressão observados. Misturas com consumos de cimento acima de 790kg/m³ mostraram queda abrupta dos resultados de resistividade, sugerindo que nestas misturas há uma alta conectividade entre os poros saturados e em consequência a facilidade

da passagem de corrente elétrica é maior.

Figura 5.20: Correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão aos 56 dias



Fonte: Autora, 2026.

Estas misturas também estão associadas às menores densidades aparentes, reforçando a teoria de que as matrizes, principalmente das misturas *E8- 0,9%F10-790* e *E12-0,5%F9-900* são menos compactas, pelo excesso de cimento, dificuldade de adensamento, gerando maior teor de vazios. Visto isso, induz-se que o aumento excessivo de consumo de cimento na mistura pode comprometer negativamente o aspecto da matriz e em consequência o desempenho do compósito.

Em relação às fibras de carbono, que são materiais eletricamente condutores, observa-se que teores intermediários, da ordem de 0,5%, não comprometeram a resistividade elétrica das misturas, uma vez que, nessas condições, foram obtidos os maiores valores de resistividade aos 56 dias. Embora, do ponto de vista teórico, o aumento do teor de fibras condutoras pudesse levar à redução da resistividade elétrica do compósito, os resultados experimentais indicam que os teores de fibras de carbono investigados não exerceram influência direta sobre esse parâmetro. O comportamento observado está associado, predominantemente, ao refinamento e à conectividade do sistema de poros da matriz cimentícia, que se mostrou determinante no controle da resistividade elétrica.

A análise estatística dos resultados de Resistividade Elétrica Volumétrica (R_e) indicou a presença de variáveis estatisticamente significativas tanto aos 28 dias quanto aos 56 dias de idade do UHPC. Dessa forma, a otimização dessa variável resposta é descrita

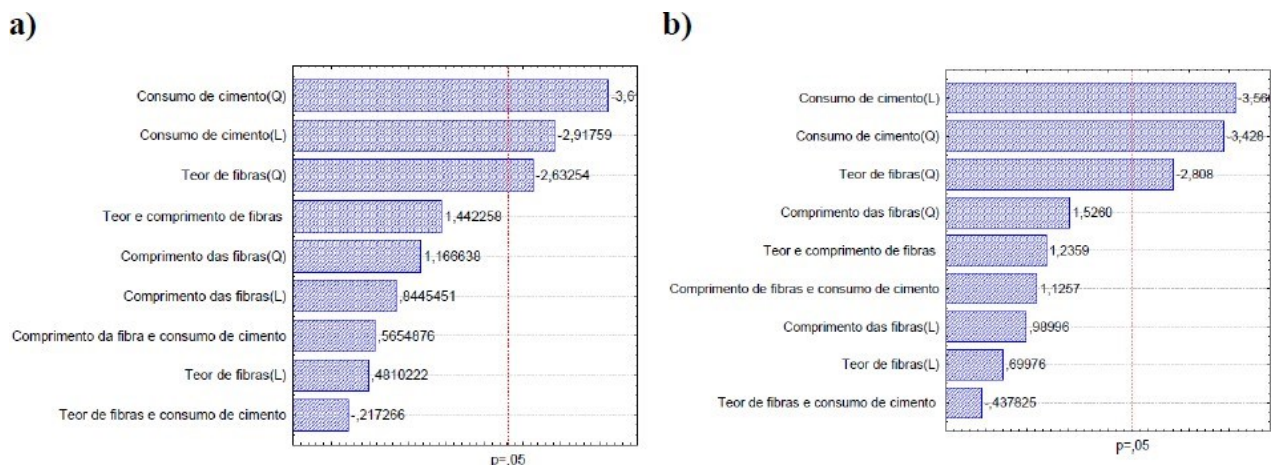
pelas Equações 5.6 e 5.7, correspondentes às duas idades, respectivamente. O modelo matemático ajustado aos 28 dias apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,86, enquanto o modelo aos 56 dias resultou em $R^2=0,88$, indicando boa correlação e adequado ajuste aos dados experimentais.

$$(R_e) = 359,5739 - 29,8850 x_1 + 9,4268 x_2 - 144,7687 x_3 - 189,4358 x_1^2 + 1,2355 x_2^2 - 151,5493 x_3^2 + 12,7873 x_1 x_2 - 11,3552 x_1 x_3 - 5,5135 x_2 x_3 \quad (5.6)$$

$$(R_e) = 525,5854 + 60,3549 x_1 + 15,3401 x_2 - 245,6883 x_3 - 280,5759 x_1^2 + 2,2436 x_2^2 - 199,7869 x_3^2 + 15,2125 x_1 x_2 - 31,7667 x_1 x_3 + 15,2379 x_2 x_3 \quad (5.7)$$

Portanto, as variáveis estatisticamente significativas podem ser visualizadas de forma mais objetiva por meio dos gráficos de Pareto apresentados na Figura 5.21, sendo a Figura 5.21-a referente aos resultados aos 28 dias e a Figura 5.21-b correspondente aos 56 dias de idade.

Figura 5.21: Variáveis significativas para resistividade volumétrica a) aos 28 dias b) aos 56 dias



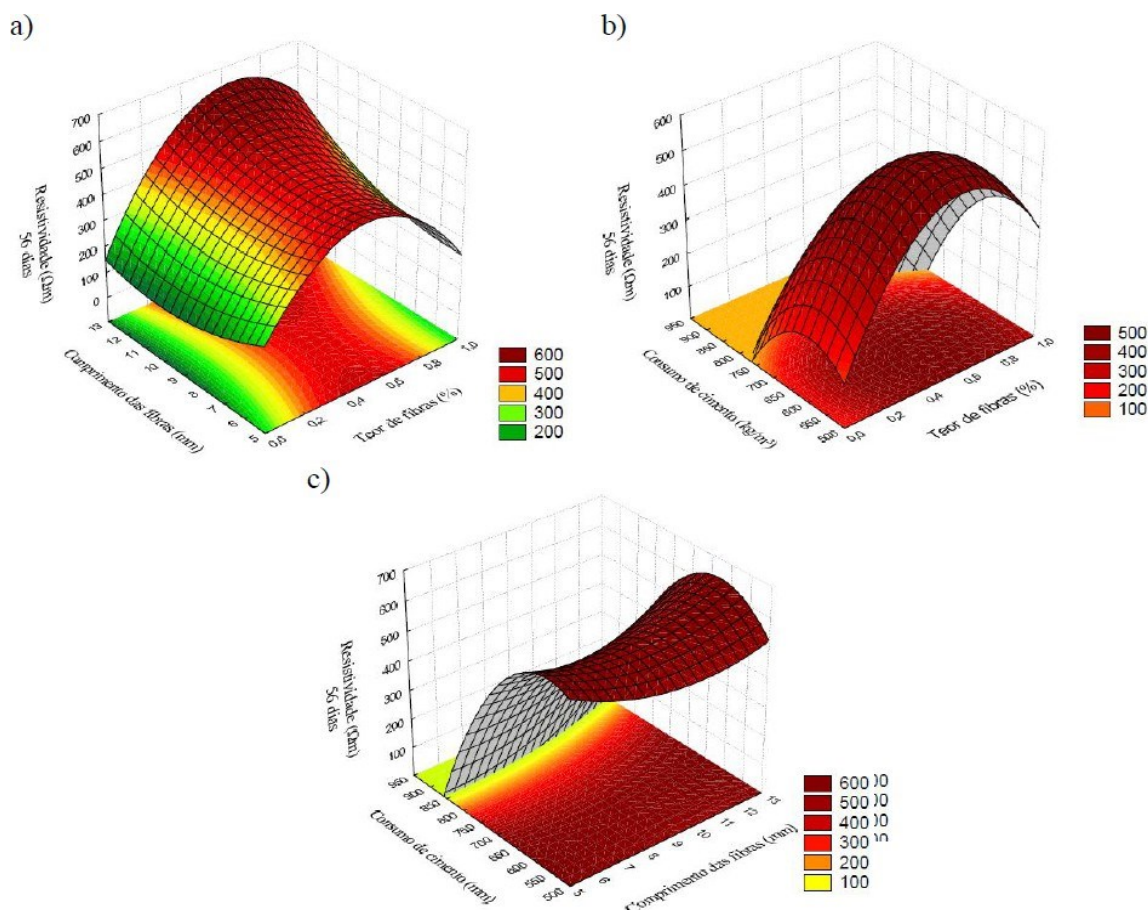
Fonte: Autora, 2026.

A comparação entre as equações ajustadas e os gráficos correspondentes às duas idades evidencia similaridade, indicando que as variáveis estatisticamente significativas para a resistividade elétrica volumétrica permanecem o consumo de cimento e o teor de fibras. Dessa forma, observa-se que a hierarquia de influência das variáveis sobre essa propriedade se mantém ao longo do tempo.

Essa constatação demonstra que, embora ocorra um incremento dos valores absolutos de resistividade com o avanço da idade, os mecanismos associados à densificação da matriz e à conectividade dos poros continuam sendo predominantemente governados pelas mesmas variáveis de dosagem, resultando em modelos estatísticos estruturalmente semelhantes.

Dessa forma, o padrão das superfícies de resposta mantém-se semelhante nas duas idades avaliadas. A Figura 5.22 ilustra esse padrão aos 56 dias, apresentando a mesma configuração observada aos 28 dias, porém com valores absolutos mais elevados.

Figura 5.22: Superfícies de respostas para a resistividade aos 56 dias

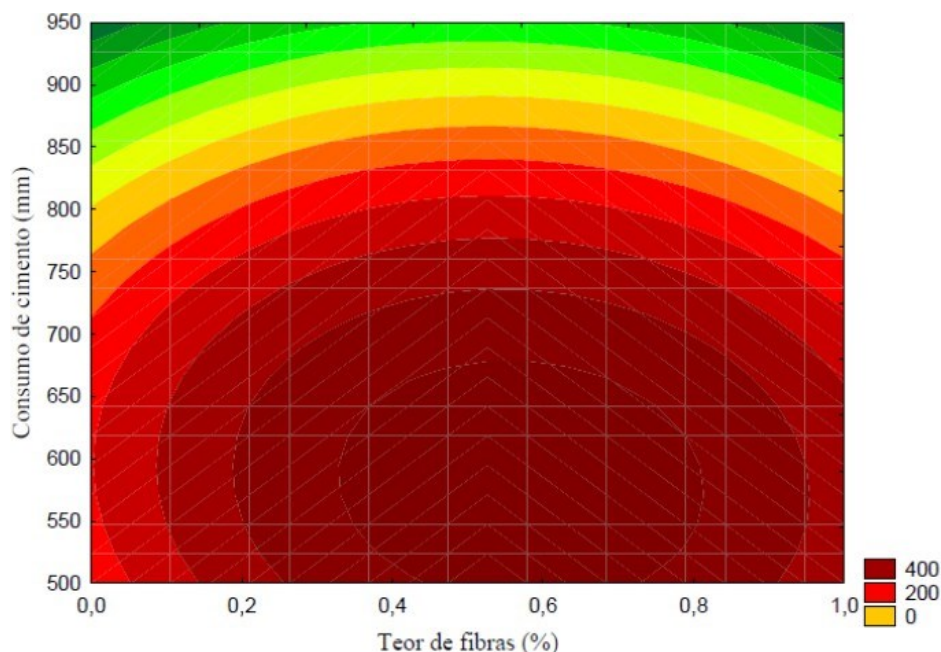


Fonte: Autora, 2026.

A partir da análise estatística, verifica-se a existência de valores ótimos para a maximização da resistividade elétrica, caso esse seja o objetivo. A superfície de resposta apresentada na Figura 5.22-b ilustra o teor ótimo de fibras e os consumos de cimento associados à resposta otimizada. Este plano de ótimo pode ser visualizado de forma mais

clara na Figura 5.23.

Figura 5.23: Região ótima para a resistividade elétrica



Fonte: Autora, 2026.

Sendo assim, para misturas com teor de fibras de carbono igual a 0,6% e consumo de cimento inferior a 700kg/m^3 , obtêm-se UHPC com elevados valores de resistividade elétrica. Em outras palavras, como a resistividade é governada pelo refinamento da estrutura porosa e pela densidade da matriz cimentícia, essas combinações de teor de fibras e consumo de cimento resultam em misturas com estrutura mais densa e menor conectividade entre os poros.

Caso o objetivo seja a obtenção de um compósito com maior condutividade elétrica, devem-se adotar consumos de cimento superiores a 700kg/m^3 , associados a uma matriz menos densa e a maiores teores de fibras, os quais contribuem para o aumento da condutividade elétrica do material.

5.5 Caracterização microestrutural

A análise microestrutural das formulações estudadas foi conduzida com o objetivo de correlacionar a morfologia e a composição química da matriz ao desempenho mecânico e físico previamente observado, por meio de análises por MEV associadas ao EDS em regiões internas e externas das amostras.

5.5.1 Matriz cimentícia: porosidade e hidratação

O objetivo do UHPC é a obtenção de uma matriz cimentícia altamente densa e compacta, com poros predominantemente isolados e sem conectividade, de modo a dificultar a penetração de água e de agentes agressivos e a alcançar boa resistência mecânica e a durabilidade do material.

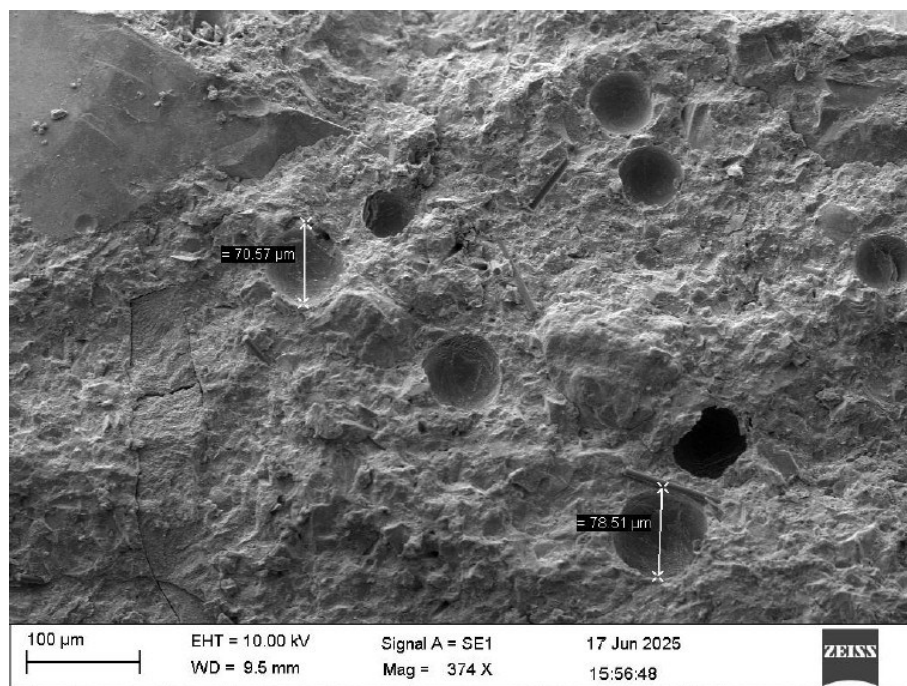
As imagens obtidas por MEV evidenciam que todos os compósitos analisados, independentemente do teor de aditivo e da idade de ensaio, apresentaram vazios com morfologia predominantemente esférica e distribuição isolada, sem formação de coalescências, caracterizando poros associados à incorporação de ar decorrente do elevado teor de aditivo polifuncional. A Figura 24 apresenta um exemplo representativo desse tipo de vazio, referente à mistura *E1- 0,2%F5-550* aos 28 dias.

Em relação ao avanço da hidratação, a Figura 5.25 compara a microestrutura de uma amostra mais jovem, ensaiada aos 28 dias com consumo de cimento de 700kg/m^3 – (*E14-0%F0-700-a*), na qual se observa uma matriz predominantemente composta por gel C-S-H, com produtos de hidratação em estágio intermediário de desenvolvimento e ausência de cristais bem definidos.

Em sequência, a microestrutura da amostra ensaiada aos 56 dias (*E6-0,9%F5-550*), com consumo de cimento de 550kg/m^3 (Figura 5.25-b), evidencia a formação localizada fases cristalinas com morfologia lamelar e aspecto prismático, apresentando faces relativamente planas e bem definidas, frequentemente associadas a regiões com maior disponibilidade de espaço para crescimento, como o interior de poros residuais. Tais feições são compatíveis com produtos hidratados mais cristalinos, como fases do tipo AFm (monossulfoaluminato de cálcio hidratado) e AFt (etringita) que pode aparecer de forma mais compactada, dependendo do espaço disponível (Mehta; Monteiro, 2008).

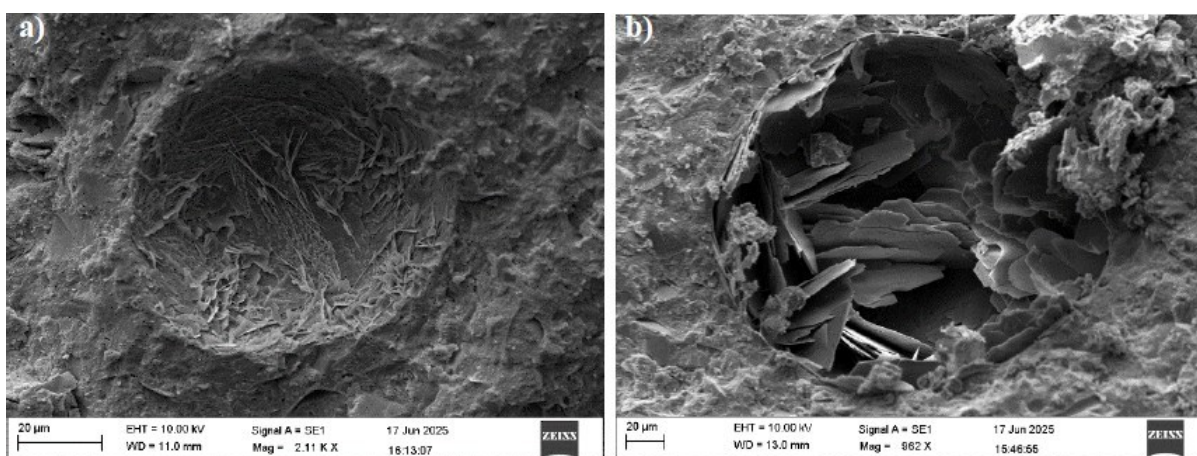
Essas diferenças indicam a evolução dos produtos de hidratação ao longo do tempo, evidenciando que o aumento da idade de cura favorece a reorganização microestrutural e o desenvolvimento de fases mais cristalinas, independentemente do maior consumo de cimento nas idades iniciais.

Figura 5.24: Macroporos no UHPC com fibras de carbono – E1- 0,2%F5 aos 28 dias



Fonte: Autora, 2026.

Figura 5.25: Formação de produtos hidratados a) aos 28 dias b) aos 56 dias

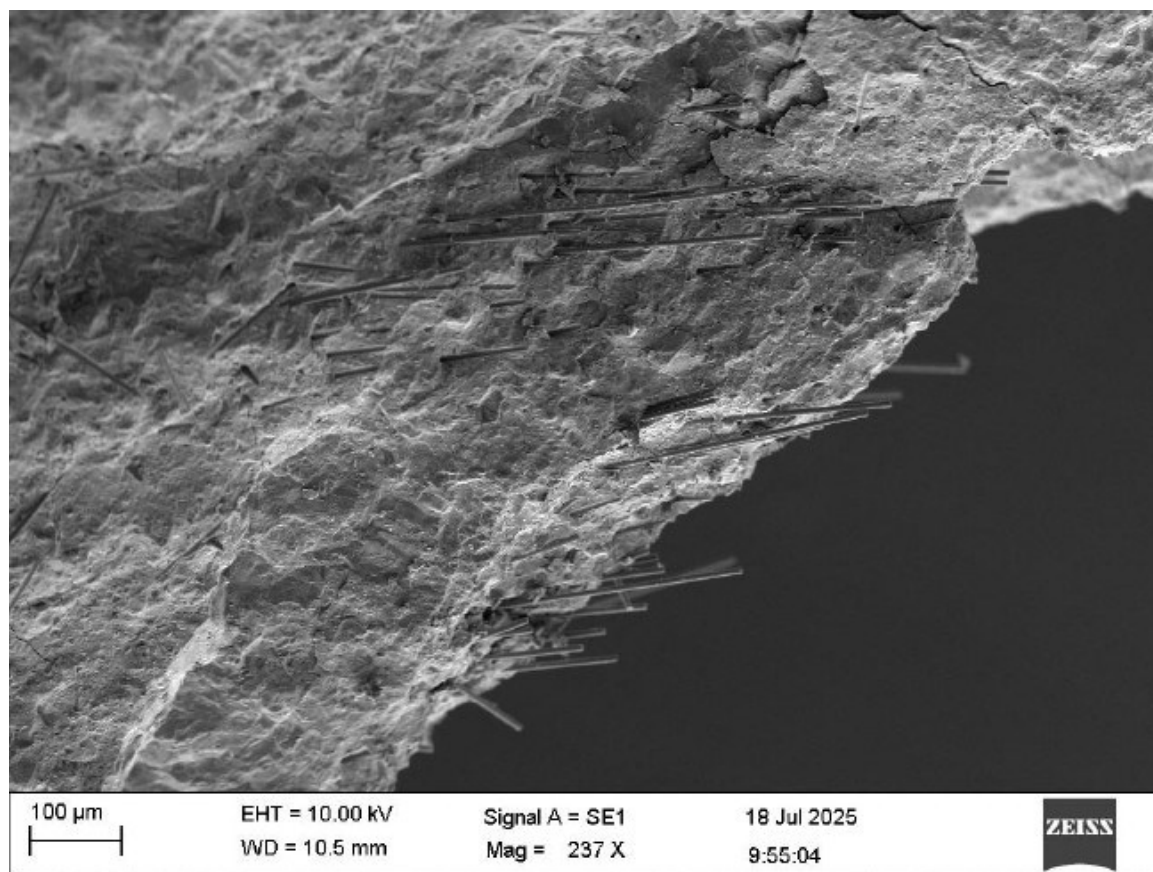


Fonte: Autora, 2026.

5.5.2 Dispersão das fibras e interação entre fibra e matriz

Uma adequada dispersão das fibras de carbono é fundamental para alcançar a eficiência na transferência de tensões entre a matriz e as fibras. Nesse contexto, após a aplicação dos processos de dispersão, observa-se, nas micrografias de maior ampliação (Figura 5.26), referentes à amostra do experimento *E5-0,9%F5-790* aos 56 dias, que as fibras de carbono se mostram individualizadas, evidenciando uma separação efetiva das interfaces fibra-fibra. Ressalta-se que essa mistura apresentou um dos maiores valores de resistência à tração na flexão nesta idade, dentre todas as composições avaliadas, o que sugere uma relação positiva entre a eficiência da dispersão das fibras e o desempenho mecânico do compósito.

Figura 5.26: Dispersão das fibras de carbono



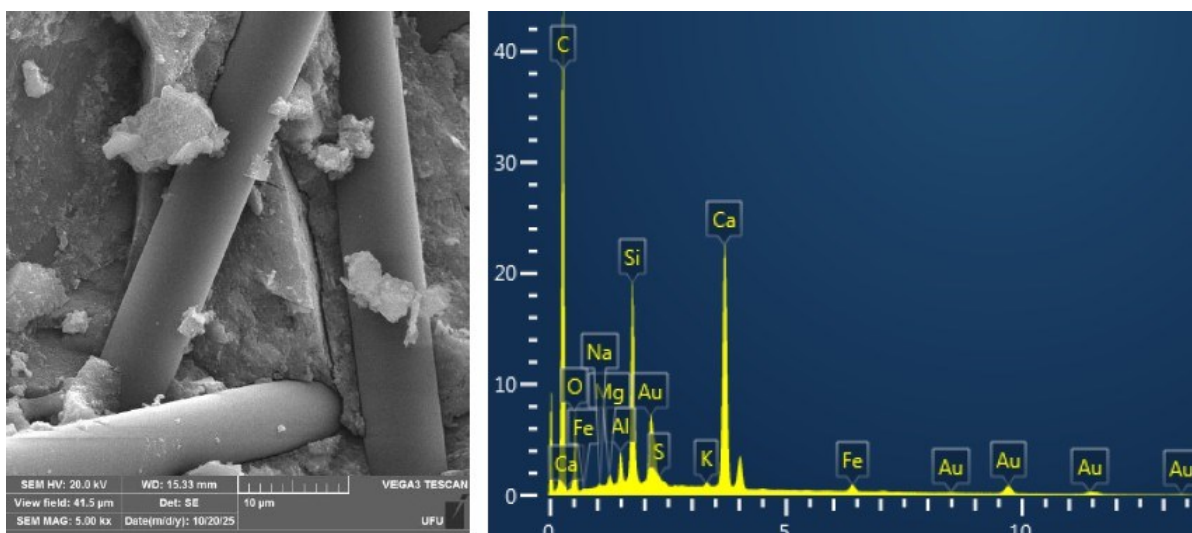
Fonte: Autora, 2026.

Quanto à aderência da fibra à matriz, a imagem apresentada na Figura 5.27 representa de forma clara a boa interação da superfície da fibra com os produtos de hidratação. A análise por EDS confirma a predominância de silicatos e compostos ricos

em Ca-Si-O na região interfacial, evidenciando a formação de produtos de hidratação densamente distribuídos ao redor das fibras de carbono.

Essa composição indica o desenvolvimento de uma matriz altamente compacta, com elevada densidade na interface fibra-matriz e ausência de zona de transição. Essa microestrutura favorece a transferência eficiente de tensões e contribui para a ancoragem efetiva das fibras na matriz cimentícia, condição essencial para o desempenho pós-fissuração e o aumento da tenacidade do compósito.

Figura 5.27: Aderência das fibras de carbono na matriz do concreto

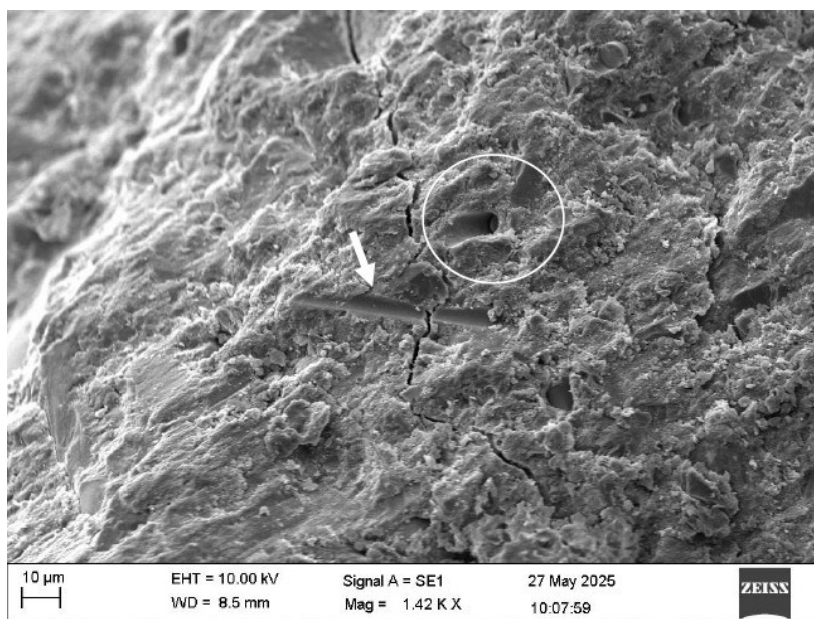


Fonte: Autora, 2026.

5.5.3 Mecanismos de fissuração e transferência de tensões

A análise microestrutural evidenciou a ocorrência do mecanismo de arrancamento (*pull-out*) das fibras de carbono em regiões de abertura de fissuras, conforme ilustrado na Figura 5.28. A seta indica o local onde a fibra foi extraída da matriz na seção de ruptura, enquanto a região circulada evidencia a ruptura da fibra, com o segmento remanescente ainda aderido à matriz. A coexistência desses mecanismos contribui de forma significativa para o aumento da tenacidade e para a melhoria do desempenho pós-fissuração do compósito.

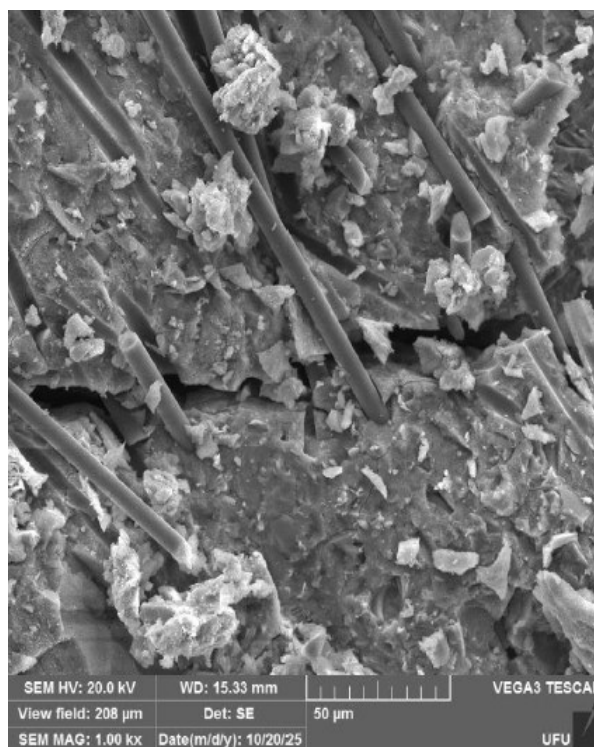
Figura 5.28: Efeito de arrancamento das fibras na fissuração



Fonte: Autora, 2026.

A Figura 5.28 comprova a atuação das fibras no controle da abertura e da propagação de fissuras, nas quais as fibras atuam costurando as fissuras.

Figura 5.29: Efeito de ponteamto das fibras de carbono nas fissuras do concreto



Fonte: Autora, 2026.

Esse efeito contribui para a dissipação de energia durante o processo de fissuração, resultando no aumento da tenacidade e na melhoria do comportamento pós-pico. Visto isto, tem-se que estas análises microestruturais estão coerentes com o desempenho mecânico apresentado nos tópicos anteriores.

5.6 Investigação complementar baseada nas tendências das superfícies de resposta

De acordo com os resultados obtidos para as respostas de resistência à tração na flexão e tenacidade, verificou-se que, no intervalo experimental inicialmente analisado, apenas o consumo de cimento apresentou influência estatisticamente significativa sobre essas propriedades. Esse resultado indica que os teores de fibras avaliados se situam abaixo da faixa ótima, sendo insuficientes para promover incrementos relevantes no regime pós-pico de fissuração, especialmente no que se refere à deformação e à absorção de energia.

Com o objetivo de incrementar a resistência à tração na flexão e promover um comportamento pós-pico com maiores deslocamentos, resultando em maior tenacidade, foram elaboradas três misturas adicionais com consumo de cimento igual a 850kg/m³. A definição desse consumo baseou-se nas superfícies de resposta, que indicaram valores superiores a 800kg/m³ associados a respostas otimizadas de resistência à tração e tenacidade.

Essa estratégia experimental também é respaldada pelos resultados apresentados por Banthia e Sheng (1990), ilustrados na Figura 2.7 do capítulo de revisão bibliográfica, o qual indicaram que o aumento da quantidade de fibras de carbono contribui para uma maior capacidade de absorção de energia durante o esforço, resultando em maior ductilidade. Em vista disso, foram utilizados os teores de fibras de carbono de 1,5%, 2,0% e 3,7%.

A proporção em massa calculada para as novas misturas foi de 1:0,15:0,03:1,64 (cimento: sílica: pó de quartzo: pó de pedra). As misturas foram denominadas de acordo com a seguinte nomenclatura: *EC* refere-se a experimento complementar; o número subsequente indica o teor de fibras adotado; e a letra *F*, acompanhada de um número, corresponde ao comprimento da fibra empregada na mistura.

Os resultados obtidos no estado fresco encontram-se apresentados na Tabela 5.10, juntamente com os resultados das misturas anteriores com maior teor de fibras, de modo a facilitar a comparação.

Tabela 5.10: Propriedades das misturas complementares no estado fresco

Experimento	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de aditivo (%)	Densidade da massa (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)	Índice de consistência (mm)
E6-0,9%F5-550	550	6	2,43	1,25	182
E7-0,9%F10-550		6	2,43	0,50	188
E13-1,0%F9 - 700	700	2,5	2,37	0,79	164
E14 - 0%F0-700		2,5	2,42	0	262
E5-0,9%F5-790	790	2,5	2,31	2,35	139
E8- 0,9%F10-790		2,5	2,31	2,21	141
EC-1,5%F9-850	850	3	2,36	4,03	125
EC-2,0%F9-850		3	2,36	3,10	125
EC-3,7%F13-850		4	2,34	2,09	125

Fonte: Autora, 2026.

As propriedades das misturas complementares no estado fresco, apresentadas na Tabela 5.10, evidenciam alterações significativas em função do aumento do consumo de cimento e, sobretudo, do incremento do teor de fibras de carbono. Observa-se que as misturas complementares, com consumo de cimento de 850kg/m³, apresentaram menores valores de densidade de massa aparente quando comparadas às misturas com menores consumos de cimento. Esse resultado está associado à maior incorporação de ar no sistema, promovida pela elevada quantidade de fibras e pela maior complexidade da matriz fresca.

O teor de ar incorporado atingiu valores expressivos nas misturas complementares como já esperado, em função do alto volume de fibras, que tende a dificultar o empacotamento da matriz e a favorecer a retenção de bolhas de ar durante o processo de mistura. A Figura 5.30 apresenta o volume de fibras de carbono dispersas após tratamento ultrassônico, incorporadas à mistura *EC-3,7%F13-850*, evidenciando visualmente a elevada quantidade de fibras.

Quanto ao índice de consistência, observa-se que todas as misturas complementares resultaram em 125mm, valor correspondente ao limite mínimo mensurável do ensaio,

indicando ausência de trabalhabilidade. Esse resultado reflete a maior rigidez da mistura no estado fresco em relação às demais, atribuída à combinação de alto teor de fibras, elevada área específica e maior demanda reológica da matriz, mesmo com o ajuste do teor de aditivo polifuncional.

Figura 5.30: Volume de fibras adicionado à mistura *EC-3,7%F13-850*



Fonte: Autora, 2026.

Os mesmos ensaios no estado endurecido foram realizados nas idades de 28 e 56 dias para as misturas complementares. Os resultados das propriedades no estado endurecido estão compilados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Propriedades no estado endurecido das misturas complementares

Experimentos	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Tenacidade (kJ/m ²)	Volume de poros (%)	Resistividade (Ω m)
E6-0,9%F5-550	550	106,67	9,07	0,37	6,13	258
E7-0,9%F10-550		105,44	6,98	0,24	5,45	263
E13-1,0%F9 - 700	700	119,59	8,69	0,26	5,00	289
E14-0%F0-700		127,32	6,84	0,17	5,00	452
E5-0,9%F5-790	790	109,22	6,06	0,13	5,70	26
E8- 0,9%F10-790		109,10	9,25	0,32	6,28	32
EC-1,5%F9-850	850	98,95	9,42	1,13	6,65	9
EC-2,0%F9-850		113,78	11,36	0,84	6,27	15
EC-3,7%F13-850		118,94	11,48	0,63	6,73	25
Experimentos	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Tenacidade (kJ/m ²)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistividade (Ω m)
E6-0,9%F5-550	550	113,60	8,49	0,30	51,84	491
E7-0,9%F10-550		120,46	7,61	0,25	54,03	468
E13-1,0%F9 - 700	700	127,27	9,45	0,49	52,64	359
E14-0%F0-700		128,97	8,53	0,31	55,67	590
E5-0,9%F5-790	790	121,27	9,61	0,50	47,73	39
E8- 0,9%F10-790		112,73	9,99	0,35	48,94	66
EC-1,5%F9-850	850	114,30	10,44	0,54	47,09	29
EC-2,0%F9-850		114,83	10,54	0,50	46,69	17
EC-3,7%F13-850		112,17	12,05	0,71	46,08	31

Fonte: Autora, 2026.

A avaliação dos resultados apresentados na Tabela 5.11 indica que a resistência à compressão das misturas complementares não apresentou incremento significativo com o aumento do teor de fibras, tanto aos 28 quanto aos 56 dias, reafirmando que a adição de fibras de carbono exerce pouca ou nenhuma influência direta sobre essa propriedade mecânica.

Quanto à resistência à tração e a tenacidade, tanto aos 28 quanto aos 56 dias, as três misturas complementares, com maior volume de fibras, expressaram os maiores valores, como pode ser notado na Figura 5.7 (d). Esse resultado indica que o incremento do teor de fibras de carbono no UHPC contribui significativamente para o aumento da ductilidade do compósito, promovendo um mecanismo mais eficiente de ponteamto das fissuras e retardando a sua propagação.

Em relação ao volume de poros permeáveis, aos 28 dias observa-se uma tendência de aumento do teor de porosidade com o incremento do teor de fibras, especialmente nas misturas com maior consumo de cimento. Esse resultado pode estar associado às dificuldades de dispersão e ao empacotamento das fibras em maiores dosagens, o que pode comprometer a compactação e favorecer a incorporação de vazios.

A partir disso, obtém-se uma matriz mais condutiva, com maior número de caminhos para a passagem da corrente elétrica, de modo que as misturas com consumo de cimento superior a 790kg/m^3 apresentaram valores significativamente menores de resistividade elétrica nas duas idades ensaiadas. Adicionalmente, a natureza condutiva das fibras exerce influência direta nesse resultado, uma vez que, nas misturas com maior teor de fibras, há a tendência de formação de caminhos preferenciais para a condução elétrica no compósito, contribuindo para a redução da resistividade mesmo em idades mais avançadas.

Aos 56 dias, observa-se ainda que o módulo de elasticidade apresentou valores mais elevados nas misturas com menor teor ou ausência de fibras, reafirmando que o aumento do conteúdo fibroso tende a reduzir a rigidez global do material, em função do aumento da heterogeneidade interna e da maior porosidade associada às altas dosagens de fibras.

6 Conclusões

Neste estudo, foram desenvolvidas misturas de UHPC reforçado com fibras de carbono, variando o teor e o comprimento das fibras e o consumo de cimento, utilizando-se a técnica estatística de planejamento de experimentos por delineamento composto central, associada à otimização do empacotamento granulométrico dos materiais constituintes. O programa experimental contemplou a realização de ensaios em corpos de prova, permitindo avaliar de forma sistemática a influência das fibras de carbono no desempenho do compósito, com base em propriedades mecânicas e microestruturais, incluindo resistência à compressão, resistência à tração, tenacidade, módulo de elasticidade e volume de poros permeáveis. Adicionalmente, a microestrutura da matriz cimentícia foi analisada por meio de imagens obtidas por MEV, as quais forneceram subsídios para a interpretação dos mecanismos associados às tendências observadas.

Os resultados dos ensaios permitem estabelecer as seguintes conclusões:

- i. Os ensaios no estado fresco indicam que as misturas com consumo de cimento igual a 700kg/m^3 , particularmente aquelas correspondentes às repetições do ponto central, contendo 0,5% de fibras de carbono com comprimento de 9mm, apresentam maior compatibilidade entre fluidez, densidade e teor de ar incorporado. Em contraste, a mistura *E12-0,5%F9-900*, embora apresente o mesmo teor e comprimento de fibras, demonstrou desempenho inferior no estado fresco, associado ao elevado consumo de cimento de 900kg/m^3 . Esses resultados sugerem que a distribuição granulométrica da matriz exerce papel relevante na mobilidade da mistura, repercutindo em sua resposta reológica e na trabalhabilidade do UHPC.
- ii. As respostas obtidas no estado endurecido dos dezoito experimentos definidos pelo delineamento composto central indicaram a existência de misturas com desempenho global satisfatório para o conjunto de propriedades avaliadas. Dentre elas, destaca-se a mistura *E11-0,5%F5-700*, que apresentou a maior resistência à compressão aos 56 dias, associada a valores intermediários para as demais propriedades analisadas. Ressalta-se, entretanto, que a definição da mistura ótima depende diretamente da finalidade estrutural pretendida. Para projetos nos quais a resistência à compressão

constitui o principal requisito, misturas com consumo de cimento igual a 700kg/m^3 e teor de fibras de 0,5% mostraram-se adequadas. Por outro lado, quando se busca o incremento da resistência à tração e da tenacidade, misturas com consumo de cimento superior a 700kg/m^3 apresentam desempenho mais favorável, embora associadas a menores valores de módulo de elasticidade. Para aplicações que demandam matrizes mais densas, caracterizadas por menor volume de poros permeáveis e, consequentemente, maior resistividade elétrica, misturas com consumo de cimento inferior a 700kg/m^3 mostraram-se mais apropriadas. Por fim, quando o objetivo é a aplicação do compósito como elemento estrutural inteligente, explorando-se a condutividade elétrica proporcionada pelas fibras de carbono, misturas com consumo de cimento superior a 700kg/m^3 apresentaram resultados particularmente favoráveis para essa finalidade.

- iii. Do ponto de vista microestrutural, observa-se a presença de macroporos distribuídos de forma dispersa na matriz cimentícia, sem evidências de interconectividade. As análises por MEV revelam uma estrutura globalmente compacta, corroborando a continuidade dos processos de hidratação e a formação progressiva de diferentes produtos hidratados ao longo do tempo. A etapa inicial de dispersão das fibras, realizada com auxílio de tratamento ultrassônico, mostrou-se eficaz, uma vez que as imagens evidenciam fibras individualizadas e bem distribuídas. Adicionalmente, as imagens de MEV confirmam os mecanismos de arrancamento e de ponteamto (*bridging*) das fibras na matriz cimentícia, evidenciando sua contribuição para a transferência de tensões e para o controle da propagação de fissuras.
- iv. As superfícies de resposta indicaram o consumo de cimento como a variável de maior influência sobre as propriedades mecânicas e microestruturais analisadas. O teor de fibras não apresentou significância estatística para as respostas de resistência à tração e tenacidade no domínio das misturas otimizadas, o que difere parcialmente da tendência inicialmente esperada. Nesse contexto, a avaliação das misturas complementares mostrou-se relevante, uma vez que indicou que a incorporação de teores mais elevados de fibras, como o valor máximo de 3,7% em volume adotado neste estudo, está associada a incrementos expressivos na resistência à tração e na tenacidade, alcançando níveis superiores aos observados nas misturas otimizadas,

indicando a influência do efeito combinado entre o consumo de cimento e o teor de fibras de carbono, que influenciam diretamente nestas análises. Por outro lado, os compósitos com elevados teores de fibras, representados pelas misturas complementares, resultam em estruturas mais porosas e menores valores de resistividade elétrica, mesmo considerando o refinamento progressivo da porosidade ao longo do tempo. Assim, em uma análise global de desempenho, a mistura EC-3,7%F13-850 apresentou resultado satisfatório à compressão e desempenho superior em resistência à tração e tenacidade. Embora tenha apresentado valores inferiores de módulo de elasticidade em comparação às demais misturas, esse resultado é considerado aceitável no contexto do desempenho global do compósito avaliado.

- v. Os resultados das propriedades no estado endurecido demonstram que é possível produzir UHPC com consumos reduzidos de cimento (500 e 550 kg/m^3), mantendo elevado desempenho mecânico, compatível com diversas aplicações estruturais. As misturas com menor consumo de cimento apresentaram valores de resistência à compressão, resistência à tração e tenacidade muito próximos aos observados nas composições com maiores consumos (790 e 900 kg/m^3). Adicionalmente, os módulos de elasticidade dessas misturas foram até $8,5 \text{ GPa}$ superiores aos das composições mais ricas em cimento. Esse resultado evidencia o potencial de otimização do material, permitindo reduções expressivas no consumo de cimento, de até 400 kg/m^3 , sem prejuízo significativo do desempenho mecânico, o que representa uma contribuição relevante sob os pontos de vista técnico, econômico e ambiental.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Considerando a relevância da distribuição granulométrica para o desempenho do UHPC, recomenda-se que, em estudos futuros ou em aplicações práticas de dosagem, seja dada especial atenção à complementaridade granulométrica dos materiais constituintes. No presente trabalho, observou-se a existência de um intervalo granulométrico que poderia ser melhor preenchido por materiais adicionais, com potencial para aprimorar o empacotamento de partículas e a ocupação dos vazios entre o agregado e o cimento. Nesse sentido, a seleção de materiais com faixas granulométricas complementares pode contribuir

para a redução da porosidade, o refinamento da microestrutura e a melhoria do desempenho global do UHPC.

Para trabalhos futuros, considera-se de grande interesse para a comunidade acadêmica a investigação do desempenho deste compósito com a utilização de fibras híbridas, combinando fibras de carbono e fibras de aço. As fibras de aço, comumente empregadas em matrizes de UHPC, podem contribuir para o aumento da resistência à compressão, bem como para a melhoria da tenacidade e do efeito de ponteamto de fissuras. Dessa forma, a combinação de diferentes tipos de fibras apresenta potencial para o desenvolvimento de um compósito com microestrutura mais compacta e desempenho mecânico superior, sobretudo no que se refere à resposta pós-fissuração e à capacidade de absorção de energia.

Sugere-se, como continuidade desta pesquisa, a investigação de composições de UHPC com teores de cimento ainda mais reduzidos, buscando ampliar os limites de otimização do material sem comprometer seu desempenho mecânico e durabilidade. Nesse contexto, recomenda-se explorar diferentes estratégias de substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares, bem como ajustes finos na distribuição granulométrica e no empacotamento de partículas, de modo a maximizar a eficiência da matriz. Adicionalmente, é pertinente avaliar a influência desses teores reduzidos em propriedades de longo prazo, como retração, fluência e durabilidade frente a agentes agressivos, além de analisar o comportamento reológico e a dispersão de fibras. Tais investigações podem contribuir significativamente para o desenvolvimento de UHPCs ainda mais sustentáveis, com menor pegada ambiental e maior viabilidade técnica e econômica.

Referências bibliográficas

AHMED, S. L. *et al.* Enhancement of Ultrahigh Performance Concrete Material Properties with Carbon Nanofiber. **Advances in Civil Engineering**, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/854729>

ALI, M. A.; MAJUMDAR, A. J.; RAYMENT, D. L. Carbon fiber reinforcement of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 2, p. 201–212, 1972. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(72\)90042-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(72)90042-7)

ALSALMAN, A. *et al.* Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 918–928, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158>

ALYAMI, M. *et al.* Predicting the shield effectiveness of carbon fiber reinforced mortars utilizing metaheuristic algorithms. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, e04357, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04357>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING e MATERIALS. **ASTM C642-21: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**. West Conshohocken, PA: [s. n.], 2021.

ANDREASSEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern. **Kolloid Z.**, v. 50, p. 217–228, 1930. <https://doi.org/10.1007/BF01422986>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta — Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916: Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054: Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17086: Cimento Portland — Análise química — Parte 6: Determinação da perda ao fogo.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17246-1: Concreto de ultra-alto desempenho — Parte 1: Classificação, requisitos e especificação.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5738:2015 - Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2015. Versão corrigida em 28 jun. 2016, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2019.

AZMEE, N. M.; SHAFIQ, N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>

BANTHIA, N. Pitch-based carbon fiber reinforced cements: structure, performance, applications, and research needs. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 19, p. 26–38, 1991. <https://doi.org/10.1139/192-003>

BANTHIA, N.; SHENG, J. Micro-reinforced cementitious materials. In: MINDESS, S.; SKALNY, J. (ed.). **Materials Research Society Symposium Proceedings**. Boston, MA: [s. n.], 1990. v. 211, p. 25–32. <https://doi.org/10.1557/PROC-211-25>

BANTHIA, N.; TROTTIER, J.-F. Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: some concerns and a proposition. **ACI Materials Journal**, vi.92, n. 1, p. 48–57, 1995. https://doi.org/10.1501/Tipfak_0000000364

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 2001. ISBN 978-85-7780-713-0.

BATISTA, L. A. P. S. **Reciclagem de compósitos estruturais de resina epóxi e fibra de carbono visando aplicações no setor automotivo**. 2023. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo. Acesso em: 3 set. 2025. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/67460>.

BELLI, A. *et al.* Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 109, p. 103569, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103569>

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2nd. London, United Kingdom: Taylor & Francis, 2006. (Modern Concrete Technology). ISBN 9780415250481. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>

BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. Precast, Prestressed Pedestrian Bridge — World's First Reactive. **PCI Journal**, v. 44, n. 5, p. 60–71, 1999. <https://doi.org/10.15554/pci.09011999.60.71>

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309–319, 1938. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-papers, 2003. ISBN 85-87922-83-1.

CALLISTER JR., W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 9. ed. [S. l.]: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2018. ISBN 978-85-216-3236-8.

CHEN, P. W.; CHUNG, D. D. L. Carbon fiber reinforced concrete as a smart material. **Smart Materials and Structures**, v. 2, n. 1, p. 22–29, 1993. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/2/1/004>

CHUNG, D. D. L. Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. **Composites Part B: Engineering**, v. 31, n. 6–7, p. 511–526, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00071-2](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00071-2)

CIMESA, M.; MOUSTAFA, M. A. Experimental characterization and analytical assessment of compressive behavior of carbon nanofibers enhanced UHPC. **Case Studies in Construction Materials**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01487>

COLEMAN, John N. *et al.* Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites. **Carbon**, v. 44, p. 1624–1652, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.02.038>

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)

DING, M.; YU, R.; FENG, Y.; WANG, S.; ZHOU, F.; SHUI, Z.; GAO, X.; HE, Y.; CHEN, L. **Possibility and advantages of producing an ultra-high-performance concrete (UHPC) with ultra-low cement content**. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 122023, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122023>.

DINGER, D. R.; FUNK, J. E. Particle packing Part I – Fundamentals of particle packing monodisperse spheres. **Interceram**, v. 41, n. 1, p. 10–14, 1992.

DONG, S. *et al.* Influence of early thermal curing regimes on properties of ultra-high performance concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110494>

DU, J. *et al.* New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). **Composites Part B: Engineering**, v. 224, p. 109220, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>

FANG, Y. *et al.* Performance enhancement of silica fume blended mortars using bio-functionalized nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 312, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125467>

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007.

FEHLING, E. *et al.* **Ultra-High Performance Concrete (UHPC)**. Berlin: Ernst & Sohn, 2014. <https://doi.org/10.1002/9783433604076>

FERABOLI, P. *et al.* Recyclability and reutilization of carbon fiber fabric/epoxy composites. **Journal of Composite Materials**, v. 46, n. 12, p. 1459–1473, 2011. <https://doi.org/10.1177/0021998311420604>

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FUJIWARA, K.; MATSUURA, S. Prediction variance of a central composite design with missing observation. **Communications in Statistics – Theory and Methods**, p. 1–16, 2019. <https://doi.org/10.1080/03610926.2019.1625925>

GAGG, Colin R. **Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis**. Reino Unido: The Open University, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>

GCCA. **Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete**. London, United Kingdom: Global Cement e Concrete Association, 2021.

GONG, J. *et al.* **Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review**. China, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109995>

Graybeal, B.A. **Material property characterization of ultra-high performance concrete**. United States. Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, 2006.

GRAYBEAL, B. A. **Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community**. [S. l.], 2014.

GUO, Z. *et al.* Mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete (CFRC) after exposure to high temperatures. **Composite Structures**, v. 256, p. 113072, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113072>

GWON, S.; KIM, H.; SHIN, M. Self-heating characteristics of electrically conductive cement composites with carbon black and carbon fiber. **Cement and Concrete Composites**, v. 137, p. 104942, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104942>

HABEL, K. *et al.* Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1362–1370, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.009>

HASAN, T. M.; LEVI, G.; SRINIVAS, A. Effect of Fine Aggregate Particle Size on Ultra High Performance Concrete Properties. *In*: SECOND International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete, 2019. <https://doi.org/10.21838/uhpc.9674>

HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 1993. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

EL-HELOU, R. G.; GRAYBEAL, B. A. Flexural Behavior and Design of Ultrahigh-Performance Concrete Beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 148, n. 4, 2022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003246)

HUANG, H. *et al.* Interfacial bond between modified micro carbon fiber and high-strength cement paste in UHPC: Bond-slip tests and molecular dynamic simulation. **Cement and Concrete Composites**, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105168>

JUNG, M. *et al.* Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high-performance concrete (UHPC): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE). **Cement and Concrete Research**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106017>

KATHIRVEL, P.; SREEKUMARAN, S. Sustainable development of ultra high performance concrete using geopolymers technology. **Journal of Building Engineering**, v. 39, p. 102267, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102267>

KIMM, Magdalena *et al.* Potential of using recycled carbon fibers as reinforcing material for fiber concrete. In: SERNA, P. *et al.* (ed.). **BEFIB 2020 – Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete Structures**. Cham: Springer, 2021. v. 30. (RILEM Bookseries), p. 949–960. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5_83

KRAHL, Pablo Augusto. **Lateral stability of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with emphasis in transitory phases**. 2018. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

LADANI, R. B. *et al.* Multi-scale toughening of fibre composites using carbon nanofibres and z-pins. **Composite Science and Technology**, v. 131, p. 98–109, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.06.005>

LAMBA, N.; RAJ, R.; SINGH, P. Mechanical response of recycled carbon fiber reinforced polymer fibers in high-strength concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 78, p. 603–607, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.477>

LI, W. *et al.* Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix. **Construction and Building Materials**, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.137>

LIMA, K. U. **Desenvolvimento de concreto de ultra-alto desempenho: influência da relação água/cimento e aditivos superplastificantes**. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. Acesso em: 5 jan. 2025. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/30128/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20VERS%C3%83O%20FINAL%20BIBLIOTECA%20%20KARLA%20ULISSES%20LIMA.pdf>>.

LIU, G. *et al.* Experimental Study on the Salt Freezing Durability of Multi-Walled Carbon Nanotube Ultra-High-Performance Concrete. **Materials**, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15093188>

MAKAR, J.; MARGESON, J.; LUH, J. Carbon nanotube / cement composites – early results and potential applications. In: INTERNATIONAL conference on construction materials: performance, innovations and structural implications. Vancouver: [s. n.], 2005.

MARTINIE, L.; ROSSI, P.; ROUSSEL, N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 226–234, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.032>

MASTALI, M.; DALVAND, A.; SATTARIFARD, A. The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. **Composites Part B: Engineering**, v. 112, p. 74–92, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.029>

MCSWAIN, A. C. *et al.* Confinement effects on fiber pullout forces for ultra-high-performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 91, p. 53–58, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.04.011>

MEHTA, P. K.; AİTCIN, P.-C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement, Concrete & Aggregates**, v. 12, n. 2, p. 70–78, 1990. <https://doi.org/10.1520/CCA10274J>

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

MENG, W.; KHAYAT, K. H. Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC. **Cement and Concrete Research**, v. 105, p. 64–71, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.001>

NAAMAN, A. E. High-performance fiber reinforced cement composites. *In*: MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (ed.). **High-Performance Construction Materials: Science and Applications**. Michigan, Ann Arbor: University of Michigan, 2008. p. 91–150.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OERTEL, T. *et al.* Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 58, p. 121–130, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.006>

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5–15, abr. 2003. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>

OVERHAGE, V. *et al.* Investigation of pull-out and mechanical performance of fibre reinforced concrete with recycled carbon fibres. **Materials and Structures**, v. 57, p. 184, 2024. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02453-4>

PARK, G. *et al.* Influence of carbon fiber on the electromagnetic shielding effectiveness of high-performance fiber-reinforced cementitious composites. **Journal of Building Engineering**, v. 35, p. 101982, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101982>

PATCHEN, A.; YOUNG, S.; PENUMADU, D. An investigation of mechanical properties of recycled carbon fiber reinforced ultra-high-performance concrete. **Materials**, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma16010314>

PÉREZ, F. L. **Planejamento de Experimentos**. [S. l.: s. n.], 2024. <http://leg.ufpr.br/~lucambio/DoE/DoE10.html>. Acesso em: 16 jan. 2025.

PERRY, V. H.; PARSEKIAN, G. A.; SHRIVE, N. G. Inovação em estruturas com concreto de ultra-alto desempenho na América do Norte. **Revista IBRACON Concreto e Construções**, p. 50–56, 2017.

PERRY, V. H.; ZAKARIASEN, D. Overview of UHPC technology, materials, properties, markets and manufacturing. *In*: PROCEEDINGS of the 2003 Concrete Bridge Conference. [S. l.: s. n.], 2003. p. 1–38.

PEYVANDI, A. *et al.* Effect of the cementitious paste density on the performance efficiency of carbon nanofiber in concrete nanocomposite. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 265–269, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.094>

PIMENTA, S.; PINHO, S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. **Waste Management**, v. 31, n. 2, p. 378–392, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.019>

POWERS, T. C. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. **Journal of American Ceramic Society**, v. 41, n. 1, p. 1–6, 1958. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb13495.x>

REDA, M. M.; SHRIVE, N. G.; GILLOTT, J. E. Microstructural investigation of innovative UHPC. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 323–329, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00225-7)

REPORT on Ultra-High-Performance Concrete. Farmington Hills, 2012.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1994. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)

RILEM. Technical Committee 49 TRF – Test for determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement section. **Materials and Structures**, v. 17, n. 102, p. 441–443, 1989.

ROMPA, D. D.; GIDRÃO, G. de M. S. Caracterização mecânica da rigidez e resistência do concreto de ultra alto desempenho reforçado por fibras (UHPFRC). **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 73–88, abr./jun. 2020. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000200388>

ROMUALDI, J. P.; BATSON, G. B. Mechanics of crack arrest in concrete. *In*: PROC. ASCE. [S. l.: s. n.], 1963. 89 EM3, p. 147–168. Citado por Zollo, Ronaldo F. Fiber-reinforced Concrete: na Overview after 30 Years of Development, 1996. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000381>

SANTOS, L. C. P. *et al.* Optimization of the Percentage of Cellulose, Latex and Metakao-lin in the Production of Cementitious Composites. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 4, p. 45–58, 2019. <https://doi.org/10.22161/ijaers.6.4.5>

SCHACHINGER, I.; SCHUBERT, J.; MAZANEC, O. Effect of Mixing and Placement Methods on Fresh and Hardened UHPC. *In*: 1º International Symposium on UHPC. Kassel, Germany: [s. n.], 2004. p. 575–586.

SCHIEBL, P. *et al.* Rheology of UHPC-Effect of superplasticizer and silica fume on mixing and workability of UHPC. *In*: 3RD fib International Congress. Washington D.C., USA: [s. n.], mai. 2010.

SHAH, S.; AHMAD, S. **High performance concretes and applications**. 1. ed. Lon-don: Taylor & Francis, 1994. <https://doi.org/10.1201/9781482267426>

SHIINO, M. Y.; REZENDE, M. C. Materiais compósitos: desafios da reciclagem e reuso. *In*: VILANOVA, M. R. N.; SHIINO, M. Y. (ed.). **Fronteiras da engenharia e ciên-cias ambientais: perspectivas multidisciplinares**. São Paulo: Editora UNESP, 2020. p. 163–185. <https://doi.org/10.7476/9786557140093.0008>

SILVA, L. C. *et al.* Optimization of metakaolin-based GeopolymerComposite using Sisal Fibers, response Surface Methodology, and Canonical Analysis. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 4, p. 32–44, 2019. <https://doi.org/10.22161/ijaers.6.4.4>

SOROKA, I. **Durability of concrete**. London: Palgrave, 1979. https://doi.org/10.1007/978-1-349-03994-4_10

SOUZA, A. A.; MOTTA, L. A. de C. UHPC with nanomaterials and carbon fibers: a review. *In*: BRAZILIAN Conference on Composite Materials. Brasília: [s. n.], 2024.

SOUZA, B. R. **Estudo de processos de reciclagem para compósitos termoplásticos reforçados com fibras de carbono**. 2023. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/69347>. Acesso em: 3 set. 2025.

TORREGROSA, E. C. **Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties**. 2013. Tese (Doutorado) – Universitat Politècnica de València.

TORRES, C. A. B. **Efeito da orientação de fibras de aço e propriedades da interface fibra matriz no comportamento do concreto autoadensável de alta resistência**. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 36, p. 1553–1610.

ULTRA-HIGH-PERFORMANCE Concrete: An Emerging Technology. Farmington Hills, 2018.

VANDERLEI, Romel D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

WANG, C. *et al.* Effect of carbon fiber dispersion on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced cement-based composites. **Materials Science and Engineering A**, v. 487, p. 52–57, 2008. <https://doi.org/10.3167/fcl.2008.520104>

WANG, L. *et al.* Preparation and properties of nano-carbon black modified ultra-high-performance concrete. **Case Studies in Construction Materials**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01378>

WANG, W. *et al.* Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under progressive aging. **Cement and Concrete Research**, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.008>

WILLE, K.; NAAMAN, A. E. Pullout behavior of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. **ACI Materials Journal**, v. 109, n. 4, p. 479–487, 2012. <https://doi.org/10.14359/51683923>

YOO, D. Y. *et al.* Electromagnetic interference shielding of multi-cracked high-performance fiber-reinforced cement composites: effects of matrix strength and carbon fiber. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 119949, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119949>