



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL

LUIS HENRIQUE PEREIRA FRANÇA

**CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO NÃO
LINEAR DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM
FIBRAS METÁLICAS**

FORTALEZA

2021

LUIS HENRIQUE PEREIRA FRANÇA

CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO NÃO
LINEAR DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS
METÁLICAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Marcelo S. Medeiros Júnior PhD,

Coorientador: Prof. Antônio Eduardo B. Cabral Dr,

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F881c França, Luis Henrique Pereira.

Caracterização e modelagem numérica do comportamento não linear do concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras metálicas / Luis Henrique Pereira França. – 2021.
156 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior.

Coorientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral .

1. Concreto de Ultra-Alto Desempenho. 2. Não Linearidade Física. 3. Dano Contínuo. 4. Caracterização Mecânica. 5. Concrete Damaged Plasticity. I. Título.

CDD 624.1

LUIS HENRIQUE PEREIRA FRANÇA

CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO NÃO
LINEAR DO CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS
METÁLICAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Estruturas

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo S. Medeiros Júnior PhD, (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Antônio Eduardo B. Cabral Dr, (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Alexandre Miranda Mont'Alverne Dr,
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. André Luís Gamino Dr,
Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium
(UNISALESIANO)

À minha mãe, Eni Pereira, por ser minha fortaleza, base, sustento, por acreditar e investir em mim.

AGRADECIMENTOS

À Deus que, mesmo nos meus momentos de pouca fé, sempre, esteve comigo nessa jornada.

Ao meu orientador, Prof. PhD. Marcelo Silva Medeiros Júnior, por seu empenho e dedicação nessa pesquisa. Meus sinceros agradecimentos, sem a sua orientação esse trabalho não seria possível. Sempre terei na lembrança um orientador motivador mesmo sabendo das dificuldades dos alunos. Sou extremamente grato por tudo que fez por mim. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, por todo suporte durante essa pesquisa.

Agradeço a minha mãe que mesmo não sabendo da importância dos meus estudos, sempre, me apoiou. A minha irmã, Liliane, que sempre se fez presente e vivenciou a idealização desse sonho comigo.

Ao Matheus Santana, amigo que o mestrado me deu. Sou muito grato em toda ajuda no entendimento das modelagens e, também, por todo divertimento que tivemos ao longo dessa caminhada, em Fortaleza e em Teresina.

Meus agradecimentos se estendem às pessoas que estiveram distantes fisicamente, mas, mesmo assim, participaram dessa jornada comigo. Meus grandes amigos, Jônatas e Fabricio, obrigado por cada palavra de motivação. Ao Prof. Dr. André Luís Gamino, por ser um exemplo de docente, sou grato pela amizade desenvolvida ao longo desses anos, essa amizade nutriu meu interesse pela área de estruturas. Agradeço as minhas amigas Ayuri e Leticia por cada palavra de motivação.

Aos meus amigos, David, Danuth, Mariana, Kayque e Eduardo, obrigado por fazerem parte dessa caminhada. Tenho convicção que com vocês essa jornada se tornou mais leve. Obrigado por todo carinho. Agradeço aos meus amigos Vinicius e Pedro, pois tornaram minha estadia em Fortaleza mais alegre e feliz.

Agradeço a todos os professores do PEC, todos os colaboradores do DEECC, técnicos do LMCC e, em especial, a Josi pelos momentos de descontração nesses anos. Por todo aprendizado adquirido nesse tempo. À UFC por toda estrutura disponível para realização dessa pesquisa.

Meus agradecimentos se estendem a todos que me ajudaram de forma direta e indireta.

“The cost of care is always lower than the cost of repair.”

(Marina Silva)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivos principais o desenvolvimento e a caracterização experimental do comportamento mecânico de concretos de alta performance. Nesse sentido, foram desenvolvidos traços de concreto de ultra-alto desempenho ($f_{ck} = 150$ MPa), reforçados com fibras metálicas. Os teores de fibra variaram de 0%, 1% e 2%. Para garantir um bom desempenho e a elevada durabilidade, os traços foram produzidos por meio da otimização da estrutura granulométrica e utilização de aditivos de terceira geração. Também foi utilizado o metacaulim, que é considerado um material cimentício secundário. O metacaulim preenchem os vazios existentes entre os grãos de cimento. O programa experimental desenvolvido, neste trabalho, teve como objetivo obter as propriedades constitutivas fundamentais para análise numérica não-linear. Foram obtidos, por meio de ensaios experimentais, propriedades como o módulo de elasticidade estático e dinâmico, resistência à compressão, à tração direta e indireta, energia de fratura, módulo de flexão e a curva de dano dúctil à tração. Desse modo, a não-linearidade física foi obtida para validação da modelagem numérica. Após o término do programa experimental foram realizadas modelagens numéricas via elementos finitos dos ensaios de tração direta e flexão de quatro pontos no *software* ABAQUS utilizando o modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Com base nos resultados, pode-se afirmar que, o material apresenta elevada resistência à compressão e à tração, elevada durabilidade e alto módulo de elasticidade. Percebeu-se que as modelagens numéricas conseguiram representar satisfatoriamente a não-linearidade física do material, nesse sentido, o modelo constitutivo CDP pode ser utilizado com sucesso na representação do comportamento do concreto de alta performance.

Palavras-chave: Concreto de ultra-alto desempenho. Não linearidade física. Dano contínuo. Caracterização mecânica. Concrete Damaged Plasticity.

ABSTRACT

This work had as main objectives the development and experimental characterization of the mechanical behavior of high-performance concretes. In this sense, ultra-high performance concrete mixes ($f_{ck} = 150$ MPa) reinforced with metallic fibers were developed. Fiber contents ranged from 0%, 1% and 2%. To ensure good performance and high durability, the lines were produced by optimizing the particle size structure and using third-generation additives. Metakaolin, which is considered a secondary cementitious material, was also used. Metakaolin fills the gaps between the cement grains. The experimental program developed in this work aimed to obtain the fundamental constitutive properties for non-linear numerical analysis. Through experimental tests, properties such as static and dynamic modulus of elasticity, compressive strength, direct and indirect tensile strength, fracture energy, flexural modulus and the ductile tensile damage curve were obtained. Thus, the physical nonlinearity was obtained to validate the numerical modeling. After the end of the experimental program, numerical modeling via finite elements of the tests of direct traction and four-point bending in the *software* ABAQUS was carried out using the constitutive model *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Based on the results, it can be stated that the material has high resistance to compression and traction, high durability and high modulus of elasticity. It was noticed that the numerical models were able to satisfactorily represent the physical non-linearity of the material, in this sense, the constitutive model CDP can be used successfully in the representation of the behavior of high-performance concrete.

Keywords: Ultra-high performance concrete. Physical nonlinearity. Continuous damage. Mechanical characterization. Concrete Damaged Plasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das principais fases do concreto	20
Figura 2 – Microestrutura do Elemento Representativo de Volume.	22
Figura 3 – Microestrutura do UHPC.	23
Figura 4 – Densidade dos agregados e disposição da sílica na matriz.	25
Figura 5 – Evolução do UHPFRC.	26
Figura 6 – Utilização de UHPC como reforço estrutural.	27
Figura 7 – Macrofissuras e microfissuras em UHPFRC	29
Figura 8 – Tipos de fibras de aço.	33
Figura 9 – Curva força-deslocamento em testes de flexão com adição de 1% e 2% de fibras.	34
Figura 10 – Comparação da microestrutura do UHPC com sílica e metacaulim.	36
Figura 11 – Aumento do E_{ci} conforme a resistência do concreto.	42
Figura 12 – Mistura proposta para UHPC.	47
Figura 13 – Metodologia de secagem dos materiais.	48
Figura 14 – Cura úmida dos corpos de prova.	49
Figura 15 – Cura térmica dos corpos de prova.	49
Figura 16 – Ensaio de saturação do hiperplastificante.	50
Figura 17 – Curva granulométrica do agregado miúdo.	51
Figura 18 – Distribuição das partículas do cimento CPV-ARI e do Metacaulim.	52
Figura 19 – Fibras DRAMIX 3D 45/50 BL.	53
Figura 20 – Maquinário disponível no LMCC.	55
Figura 21 – Metodologia do ensaio de resistência à compressão.	57
Figura 22 – Moldagem e retificação dos CPs.	58
Figura 23 – Moldagem, plano de corte e ruptura dos CPs.	58
Figura 24 – Metodologia realizada no ensaio de resistência à tração direta.	60
Figura 25 – Aparato desenvolvido para o ensaio de tração direta.	60
Figura 26 – Ensaio de tração por compressão diametral.	62
Figura 27 – Fases para obtenção do módulo estático de elasticidade.	63
Figura 28 – Metodologia de transmissão da onda ultrassônica.	64
Figura 29 – Fases para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico.	65
Figura 30 – Análise da velocidade de propagação da onda.	65

Figura 31 – Instrumentação do ensaio de flexão.	67
Figura 32 – Marcação e colagem da chapa no terço médio	67
Figura 33 – Vista lateral da instrumentação e posicionamento dos LVDTs.	68
Figura 34 – Metodologia do ensaio de tração na flexão.	70
Figura 35 – Detalhamento da armadura.	71
Figura 36 – Moldagem do concreto convencional.	72
Figura 37 – Camada de 1 cm de UHPFRC como reforço.	72
Figura 38 – Determinação da massa saturada e imersa.	74
Figura 39 – Procedimento de fervura.	74
Figura 40 – Procedimento de secagem e identificação das amostras.	76
Figura 41 – Determinação da massa saturada.	76
Figura 42 – Ensaio de compressão diâmetral.	77
Figura 43 – Resposta do concreto ao carregamento uniaxial.	79
Figura 44 – Demonstração da deformação de fissuração.	81
Figura 45 – Definição da compressão inelástica ou esmagamento por compressão.	82
Figura 46 – Demonstração da deformação de fissuração.	84
Figura 47 – Superfície de escoamento no plano desviador.	86
Figura 48 – Superfície de escoamento no estado plano de tensões.	86
Figura 49 – Elemento finito C3D8R.	88
Figura 50 – Relação tensão-deformação na compressão uniaxial do UHPC e UHPFRC.	89
Figura 51 – Calibração do modelo de Saenz (1964).	92
Figura 52 – Calibração do modelo de Carreira e Chu (1985).	93
Figura 53 – Modelo de Dano, Plasticidade e Plasticidade-Dano.	95
Figura 54 – Modelos de dano analisados.	96
Figura 55 – Relação tensão-deslocamento.	97
Figura 56 – Relação tensão-energia de fratura.	98
Figura 57 – Modelo físico do ensaio de tração direta.	100
Figura 58 – Modelo físico do ensaio de tração na flexão.	101
Figura 59 – Resistência à compressão em cura padrão.	104
Figura 60 – Ruptura do UHPFRC.	105
Figura 61 – Relação tensão x deformação do UHPC-0% sujeito à compressão axial na cura padrão.	105

Figura 62 – Relação tensão x deformação do UHPFRC-1% sujeito à compressão axial na cura padrão.	106
Figura 63 – Relação tensão x deformação do UHPFRC-2% sujeito à compressão axial na cura padrão.	106
Figura 64 – Resistência à compressão em banho maria.	108
Figura 65 – Relação tensão x deformação do UHPC-0% sujeito à compressão axial na cura térmica.	108
Figura 66 – Relação tensão x deformação do UHPFRC-1% sujeito à compressão axial na cura térmica.	109
Figura 67 – Relação tensão x deformação do UHPFRC-2% sujeito à compressão axial na cura térmica.	109
Figura 68 – Ruptura dos CPs por compressão diametral.	111
Figura 69 – Relação força x deslocamento do UHPFRC-1% sujeito à tração direta.	111
Figura 70 – Relação força x deslocamento do UHPFRC-2% sujeito à tração direta.	112
Figura 71 – Comparação entre a resistência à tração direta e indireta.	113
Figura 72 – Ruptura do UHPC.	113
Figura 73 – Verificação do posicionamento das fibras.	114
Figura 74 – Ruptura suave do UHPFRC.	115
Figura 75 – Módulo de elasticidade do UHPC.	117
Figura 76 – Análise empírica da evolução do módulo de elasticidade.	118
Figura 77 – Comparação do módulo de elasticidade do UHPC.	122
Figura 78 – Correlação do E_c em função do E_{cd}	123
Figura 79 – Curva força x deslocamento do UHPC-0%.	124
Figura 80 – Curva força x deslocamento do UHPFRC-1%.	125
Figura 81 – Curva força x deslocamento do UHPFRC-2%.	125
Figura 82 – Ruptura na flexão.	126
Figura 83 – Ancoragem das fibras.	126
Figura 84 – Fissuração nas vigas curtas.	128
Figura 85 – Compatibilidade entre o índice de vazios e a absorção.	131
Figura 86 – Estabilização da massa.	133
Figura 87 – Evolução da capilaridade.	134
Figura 88 – Carga x deslocamento pós-pico - Tração direta (normalizado) [1% de fibras].	135

Figura 89 – Carga x deslocamento pós-pico - Tração direta (normalizado) [2% de fibras].	136
Figura 90 – Resultados numéricos - Tração direta [1% de fibras].	137
Figura 91 – Carga x deslocamento pós-pico - Tenacidade (normalizado) [1% de fibras]. .	138
Figura 92 – Carga x deslocamento pós-pico - Tenacidade (normalizado) [2% de fibras]. .	139
Figura 93 – Resultados numéricos - flexão [2% de fibras], tensão.	140
Figura 94 – Resultados numéricos - flexão [2% de fibras], deslocamento.	140
Figura 95 – Resultados numéricos - flexão [2% de fibras], dano na tração.	141
Figura 96 – Resultados numéricos - flexão [2% de fibras], dano na compressão.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Traços em massa do UHPC e UHPFRC	48
Tabela 2 – Propriedades das fibras	52
Tabela 3 – Traço em massa do concreto convencional	71
Tabela 4 – Parâmetros utilizados para representar a matriz do concreto.	98
Tabela 5 – Resistência à compressão do UHPC com 0%, 1% e 2% de fibras	103
Tabela 6 – Resistência à compressão do UHPC com 0%, 1% e 2% de fibras.	107
Tabela 7 – Tração indireta do UHPC.	110
Tabela 8 – Tração direta do UHPFRC-1% e UHPFRC-2%.	112
Tabela 9 – Módulo de elasticidade experimental do UHPC.	116
Tabela 10 – Velocidade da onda ultrassônica aos 28 dias	120
Tabela 11 – Avaliação da qualidade do concreto	121
Tabela 12 – Resistência à tração na flexão do UHPC-0%, UHPFRC-1% e UHPFRC-2%.	124
Tabela 13 – Resistência à compressão do concreto convencional (CC).	127
Tabela 14 – Comparação da resistência à flexão	128
Tabela 15 – Massas obtidas.	129
Tabela 16 – Índice de vazios, absorção e massa específica.	130
Tabela 17 – Verificação da massa seca e saturada.	132
Tabela 18 – Capilaridade em função do tempo.	133

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos Gerais	18
1.1.1	<i>Objetivos específicos</i>	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Microestrutura do concreto	20
2.2	Zona de transição do concreto	21
2.3	Fase agregado	21
2.4	Pasta de cimento hidratada	23
2.5	Concreto de Ultra-Alto Desempenho	26
2.5.1	<i>Composição - Concreto de Ultra-Alto de Desempenho</i>	29
2.5.1.1	<i>Agregados, adições, aditivos</i>	30
2.5.1.1.1	<i>Hiperplastificante de terceira geração</i>	31
2.5.1.2	<i>Fibras</i>	33
2.5.1.2.1	<i>Adição de metacaulim (MK)</i>	35
2.6	Durabilidade	37
2.7	Caracterização das propriedades mecânicas	39
2.7.1	<i>Compressão axial</i>	39
2.7.2	<i>Capacidade resistente à flexão</i>	41
2.7.3	<i>Previsões do módulo de elasticidade para o UHPC</i>	41
2.8	Modelos de empacotamento de partículas	43
2.8.1	<i>Modelo de Furnas</i>	44
2.8.2	<i>Modelo de Andreassen e Andersen Modificado</i>	44
3	MATERIAIS	46
3.1	Materiais	47
3.1.1	<i>Agregados e adições</i>	49
3.1.2	<i>Fibras</i>	52
4	METODOLOGIA	54
4.0.1	<i>Preparo do concreto</i>	54
4.0.2	<i>Resistência à compressão axial</i>	56
4.0.3	<i>Resistência à tração</i>	59

4.0.3.1	<i>Resistência à tração direta</i>	59
4.0.3.2	<i>Resistência à tração indireta</i>	61
4.0.4	<i>Módulo de elasticidade</i>	62
4.0.4.1	<i>Módulo estático de elasticidade</i>	62
4.0.4.2	<i>Módulo de elasticidade dinâmico</i>	63
4.0.5	<i>Resistência à tração na flexão</i>	66
4.0.6	<i>Reforço estrutural via técnica Externally Bonded Reinforcement (EBR)</i>	69
4.0.7	<i>Ensaio de durabilidade</i>	73
4.0.7.1	<i>Absorção de água, índice de vazios e massa específica</i>	73
4.0.7.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	75
5	APLICAÇÕES NUMÉRICAS	78
5.1	<i>Concrete damaged plasticity</i>	78
5.1.1	<i>Comportamento mecânico</i>	78
5.1.2	<i>Falha na tração</i>	80
5.1.3	<i>Definindo o comportamento na compressão</i>	82
5.1.4	<i>Definindo a recuperação do dano e rigidez</i>	83
5.1.4.1	<i>Recuperação da rigidez</i>	83
5.1.5	<i>Plasticidade do concreto</i>	84
5.1.6	<i>Função de escoamento</i>	85
5.1.7	<i>Regularização da viscosidade</i>	87
5.2	Modelagem da matriz do UHPC	87
5.2.1	<i>Elementos finitos</i>	88
5.2.2	<i>Comportamento uniaxial do concreto na tração e compressão</i>	88
5.2.3	<i>Variáveis de dano</i>	94
5.2.4	<i>Energia de Fratura</i>	97
5.2.5	<i>Parâmetros complementares utilizados no CDP</i>	98
5.3	Validação dos modelos numéricos	99
5.3.1	<i>Simulação numérica do ensaio de tração uniaxial</i>	99
5.3.2	<i>Simulação numérica do ensaio de flexão com quatro pontos</i>	100
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	102
6.1	Resistência à compressão	102
6.1.1	<i>UHPC em cura padrão</i>	102

6.1.2	<i>UHPC em banho maria a 80°C</i>	106
6.2	Resistência à tração do UHPC	109
6.2.1	<i>Tração indireta por compressão diametral</i>	110
6.2.2	<i>Tração direta</i>	111
6.3	Módulo estático de elasticidade à compressão	115
6.3.1	<i>Módulo de elasticidade do UHPC</i>	116
6.3.1.1	<i>Análise analítica do módulo de elasticidade do UHPC</i>	117
6.4	Módulo de elasticidade dinâmico do UHPC	119
6.5	Correlação do Módulo de Elasticidade Estático com o Módulo Dinâmico	122
6.6	Tração na flexão	123
6.6.1	<i>Tração na flexão - UHPC</i>	124
6.7	Reforço estrutural	127
6.8	Durabilidade do UHPC	129
6.8.1	<i>Massa específica, absorção, índice de vazios</i>	129
6.8.2	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	131
6.9	Resultados da análise numérica	134
6.9.1	<i>Simulação numérica do ensaio de tração direta</i>	134
6.9.2	<i>Simulação numérica do ensaio de flexão com quatro pontos</i>	137
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	142
	REFERÊNCIAS	144

1 INTRODUÇÃO

A inovação na construção civil passa obrigatoriamente pelo desenvolvimento de novos materiais, que permitem expandir a capacidade portante das estruturas com maior leveza e durabilidade. O concreto de cimento Portland tem como característica mais relevante a sua elevada resistência à compressão. Porém, mesmo esta grande resistência pode continuar sendo insuficiente em estruturas modernas de pontes, passarelas e arranha-céus. Dessa forma, pesquisadores tem promovido pesquisas para melhorar ainda mais as propriedades mecânicas e aumentar a qualidade dos materiais utilizados na construção civil. Desse modo, obras cada vez mais ousadas e inovadoras podem continuar surgindo.

No Brasil, não existem parâmetros normativos que regulamentem o Concreto de Ultra-Alto Desempenho ou *Ultra High Performance Concrete* (UHPC). A NBR 6118 (ABNT, 2014) que trata de projetos estruturais em concreto, apresenta modelo constitutivo apenas para concreto com resistência à compressão (f_{ck}) até 90 MPa. Entretanto, a literatura que são considerados como UHPC, os concretos que apresentam $f_{ck} > 150$ MPa (ALKAYSI; EL-TAWIL, 2015; XU *et al.*, 2019). Porém, segundo Huang *et al.* (2017), o UHPC é todo concreto com resistência à compressão superior à 120 MPa. De acordo com o Comitê 363 do ACI (ACI, 2010), além da resistência à compressão, o desempenho está relacionado com a durabilidade, materiais constituintes, acabamento e, bem como, a integridade estrutural.

O bom comportamento mecânico do UHPC deve-se a sua microestrutura e materiais constituintes (ZHANG *et al.*, 2020). Na composição do UHPC não há presença de agregado graúdo e apresenta baixíssima relação água/cimento (a/c), sendo inferior a 0,28 (KARTHIKEYAN *et al.*, 2018). Devido à composição do UHPC, esse compósito cimentício apresenta maior durabilidade, aumento da resistência à compressão e alta resistência à tração quando comparado ao concreto convencional.

Para alcançar uma maior tenacidade, podem ser incorporadas fibras ao concreto com o intuito de melhorar a resposta dúctil no regime de pós-fissuração. De acordo com Zollo (1997), a contribuição das fibras para a resistência à tração depende de sua densidade, comprimento, diâmetro e aderência à matriz de cimento. Reconhece-se também que existe um aumento proporcional da resistência à flexão do UHPC em função do aumento do volume de fibras (YAO *et al.*, 2003). Vários autores também afirmam que o comportamento à tração dos concretos reforçados com fibras depende tanto do volume, quanto do fator de forma e da sua distribuição e orientação, além das propriedades mecânicas da matriz de cimento. Sabe-se que há uma relação

inversa entre resistência à compressão e ductilidade, desse modo, o UHPC quando não reforçado possui baixa ductilidade, por consequência, as fibras metálicas são incorporadas ao material visando mitigar essa deficiência (ABBASS; KHAN, 2018; FEHLING *et al.*, 2014). Isso confere ao material a capacidade de resistir melhor ao processo de microfissuração e propagação de microfissuras e macrofissuras (SAHOO *et al.*, 2019).

Do ponto de vista financeiro, o UHPC é um material com elevado custo de produção, entretanto, é necessário uma análise global do custo da estrutura para tomada de decisão. O UHPC reforçado com fibra metálica é considerado três vezes mais leve que o concreto protendido e quatro vezes mais leve que o concreto armado, considerando a mesma capacidade portante (FEHLING *et al.*, 2014). Desse modo, as propriedades do UHPC permitem uma estrutura mais leve, devido à diminuição das seções transversais, tornando esse tipo de concreto uma opção economicamente viável nas construções, combinando leveza, durabilidade, elevada resistência à compressão e, conseqüentemente, à tração (ZHAO *et al.*, 2018).

Existem vários modelos constitutivos para análise de estruturas construídas com UHPC (CEB-FIP, 1990; FEHLING *et al.*, 2014; LU; ZHAO, 2010). Porém, não existe consenso sobre qual modelo representa de maneira efetiva e mais fidedigna o comportamento do concreto sob carregamento monotônico e cíclico. No entanto, sabe-se que a incorporação de fibras e sua proporção podem dificultar a modelagem numérica. Adicionalmente, percebe-se que a obtenção dos parâmetros de entrada é um desafio na utilização de modelos constitutivos não lineares. Desse modo, o presente trabalho visou caracterizar o comportamento não linear do UHPC fornecendo dados de entrada para análise numérica. Li *et al.* (2018) fizeram um estudo experimental com análise analítica, onde estabeleceram um modelo constitutivo que representa o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras metálicas, entretanto sua aplicação está restrita ao concreto convencional e concreto de alto desempenho.

O comportamento do concreto foi estudado por diversos pesquisadores, Dragon e Mroz (1979), Lubliner *et al.* (1989), Ottosen (1979) estudaram o comportamento do concreto tendo como base a plasticidade, Bažant (1994), Carpinteri *et al.* (1997) analisaram o comportamento do concreto via à mecânica da fratura, Desprez *et al.* (2013), Grassl e Jirásek (2006), Jin *et al.* (2017), Jirásek (2004), Mazars e Pijaudier-Cabot (1989), Mazars *et al.* (2015), Prisco e Mazars (1996), Ragueneau *et al.* (2000), Simo e Ju (1987) analisaram via à mecânica do dano contínuo e Grassl *et al.* (2013), Jason *et al.* (2006), Lee e Fenves (1998) formularam um modelo acoplado de plasticidade e dano. Porém, os parâmetros de entrada para tais modelos não é de

fácil obtenção, principalmente, para as classes de concreto tratadas neste trabalho.

Para facilitar o emprego dos modelos numéricos não lineares na análise mecânica de estruturas de concreto, principalmente de concretos de alta performance desenvolvidos no Brasil, o presente trabalho visou caracterizar as propriedades mecânicas (resistência à compressão, tração direta, módulo de flexão) e físicas (módulo de elasticidade, curvas de dano dúctil e energia de fratura) do UHPC e do *Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete* (UHPFRC) por meio de um extenso programa experimental.

1.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho teve como objetivo global o desenvolvimento de traços, análise e caracterização do comportamento mecânico e físico do UHPC, principalmente, no que se refere à obtenção de propriedades fundamentais via ensaios experimentais variando os teores de fibras metálicas incorporadas. Para, posteriormente, validação do modelo numérico.

1.1.1 Objetivos específicos

Para obtenção das grandes metas estabelecidas, nos objetivos gerais, foram realizados os seguintes passos:

- Desenvolvimento de dois traços de concreto utilizando materiais obtidos localmente. O primeiro é referente ao concreto convencional e o segundo referente ao UHPC;
- Obtenção e análise das propriedades mecânicas e físicas do UHPC por meio de ensaios experimentais de resistência à compressão axial, resistência à tração direta, resistência à tração indireta, módulo de elasticidade estático e dinâmico, resistência à tração na flexão, energia de fratura e dano contínuo;
- Desenvolvimento de um método e um aparato de ensaio de tração direta visando à obtenção da resistência à tração direta, energia de fratura e curvas de dano contínuo para o UHPC, por consequência, da melhoria da ductilidade;
- Análise e quantificação da evolução do dano, em ensaio de tração direta;
- Comparação do desempenho do UHPC frente ao carregamento monotônico com variação dos teores de fibras metálicas;
- Realização de ensaios estruturais em modelos de vigas curtas com concreto convencional reforçadas com UHPFRC-2%;

- Análise da durabilidade do UHPC e UHPFRC por meio de ensaio de absorção, capilaridade e índice de vazios;
- Calibração do modelo constitutivo *concrete damaged plasticity* (CDP);
- Validação das simulações numéricas.

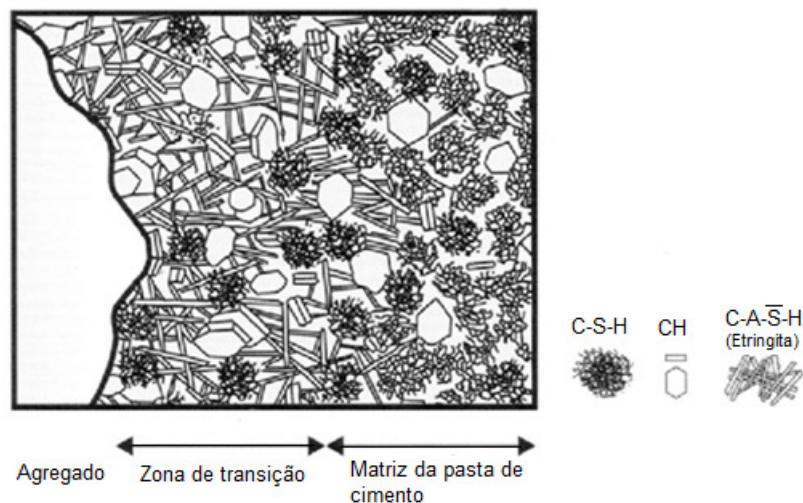
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos maiores desafios desse trabalho é a obtenção de traços de concreto que possuam baixa porosidade, baixa permeabilidade, com f_{ck} superior a 150 MPa, alta durabilidade e bom desempenho. Para isso, foi realizado uma revisão bibliográfica priorizando à microestrutura, empacotamento de partículas e o comportamento do concreto de alta performance.

2.1 Microestrutura do concreto

O concreto é um material heterogêneo e possui uma microestrutura muito complexa. A microestrutura é composta pela pasta de cimento hidratada e zona de transição na interface, como mostra a Figura 1. A zona de transição na interface está situada próxima do agregado graúdo em forma de uma camada delgada, ela tem forte influência nas propriedades mecânicas do concreto.

Figura 1 – Representação das principais fases do concreto



Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 2017).

As fases, algumas aspectos da microestrutura e do comportamento do concreto serão discutidos ao longo desta seção. Isto se torna necessário, uma vez que as propriedades do concreto estão diretamente relacionadas com a sua microestrutura. Especialmente em se tratando do concreto de ultra-alto desempenho, a microestrutura se torna mais densa e mais sensível a variação granular dos materiais constituintes.

2.2 Zona de transição do concreto

A zona de transição está situada entre o agregado e a matriz da pasta de cimento e é justamente nessa região que algumas propriedades do concreto são definidas. A zona de transição na interface é considerada um elo frágil, pois não precisa de muita energia (apenas 50% da carga última) para continuar o processo de microfissuração. Logo, a zona de transição na interface pode afetar, negativamente, a resistência mecânica do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2017).

Com carga superior a 70% da carga última começa na matriz da pasta o processo de fissuração, com o aumento contínuo da tensão, as fissuras que eram localizadas apenas na matriz passam a se propagar na zona de transição da interface ocasionando a falha do material. Quando o concreto é submetido à compressão é necessário mais energia para enfraquecer a matriz da pasta e, conseqüentemente, o processo de fissuração é lento. Porém, quando o concreto está sujeito à tensão de tração não é necessário alta taxa de tensão aplicada, pois o processo de microfissuração é acelerado (CHEN; SALEEB, 1982; CHEN; HAN, 2007).

Logo, o UHPC tem como característica a ruptura frágil e não avisada, diferentemente, do concreto convencional que tem maior ductilidade (LIU *et al.*, 2019). Este processo ocorre devido à microestrutura densa do UPHC. Sendo a ductilidade do concreto inversamente proporcional a sua resistência. Ou seja, quanto maior a carga aplicada mais frágil será o processo de ruptura do material.

2.3 Fase agregado

Esta fase é a responsável por propriedades como estabilidade dimensional do concreto e módulo de elasticidade. O volume do agregado, seu tamanho, porosidade, textura, forma e distribuição dos poros são características físicas que influenciam diretamente a resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2017).

Agregados graúdos com diâmetros maiores podem afetar negativamente a resistência do concreto, pois a irregularidade dos mesmos acumulam um filme de água junto à superfície enfraquecendo a zona de transição na interface da pasta-agregado, além disso, torna a matriz menos densa (LIU *et al.*, 2019).

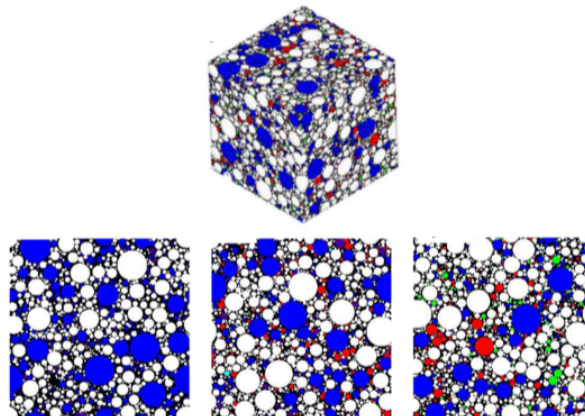
No UHPC deve-se utilizar apenas partículas finas com tamanho médio de 0,2 mm, conseqüentemente, acarreta no consumo elevado de adições minerais (AÏTCIN; LESSARD,

2019). Do ponto de vista granulométrico o UHPC é considerado uma argamassa, entretanto o termo concreto prevaleceu devido às propriedades serem compatíveis, embora em nível mais elevado.

Quando elimina-se os agregados graúdos há diminuição dos vazios internos e principalmente diminuição da zona de transição. Sabe-se que quanto menor for os agregados maior será a superfície específica (AİTCIN, 2007). Deste modo, a pasta é mais homogênea, com maior reatividade química e, por consequência, mais numerosas serão as ligações de superfície oriundas das forças de van der Waals.

Como mostra a Figura 2, a mistura é mais homogênea, desse modo, as tensões que antes eram concentradas no agregado graúdo são distribuídas nos grãos. A distribuição das tensões retarda à falha do concreto. Além disso, a utilização apenas de agregados finos reduz o contato e o atrito entre os grãos evitando falhas locais na microestrutura (AİTCIN, 2007; ARORA *et al.*, 2018).

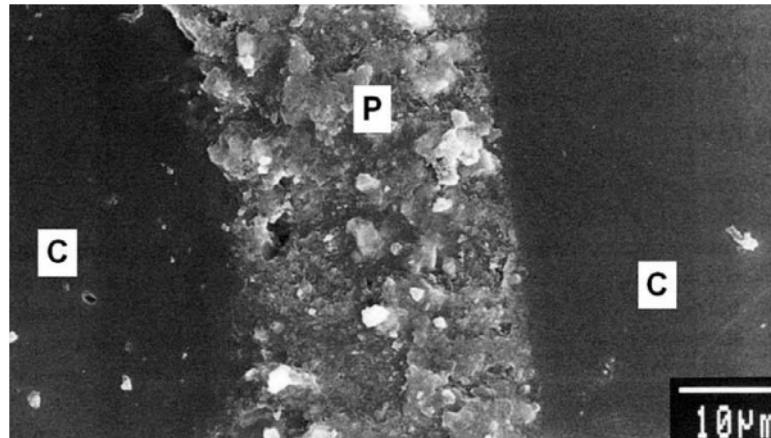
Figura 2 – Microestrutura do Elemento Representativo de Volume.



Fonte: (ARORA *et al.*, 2018).

Conforme já foi dito, a ausência de agregados graúdos torna necessário adições minerais para garantir compacidade e homogeneidade. Na Figura 2, a cor azul representa a cinza volante, a cor branca representa o Cimento Portland, a cor vermelha é metacaulim e a cor verde representa o cálcario. A utilização de finos com diferentes diâmetros faz com que haja maior empacotamento. Na Figura 3 é possível visualizar a ausência da zona de transição na fase agregado. Sendo que C são grãos de cimento isolado e P é a pasta do cimento.

Figura 3 – Microestrutura do UHPC.



Fonte: (AÏTCIN, 2007).

Nos trabalhos que retratam a reologia do UHPC como o de, Khayat *et al.* (2019), Sadrmomtazi *et al.* (2018) e Wang *et al.* (2017) afirmam que o diâmetro máximo das partículas deve ser de 0.6 mm para garantir unicidade e baixa permeabilidade.

2.4 Pasta de cimento hidratada

A microestrutura da pasta de cimento hidratada é composta por quatro fases sólidas: silicato de cálcio hidratada, hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer não hidratados (BAUER, 2019; MEHTA; MONTEIRO, 2017).

- Silicato de cálcio hidratada (C-S-H):

É a fase mais importante, pois corresponde entre 50% a 60% do volume dos sólidos, logo determina às propriedades da pasta.

- Hidróxido de cálcio:

É uma fase secundária que corresponde entre 20% a 25% do volume dos sólidos na pasta de cimento hidratada. Quando comparado com o C-S-H apresenta pequena área superficial.

- Sulfoaluminatos de cálcio:

Também representa uma fase secundária que varia de 15% a 20% do volume dos sólidos na pasta de cimento hidratada, nessa fase há favorecimento da formação de etringita em pasta de cimento puro, a presença de etringita torna o concreto suscetível a ataque por sulfatos.

- Grãos de clínquer não hidratados:

No processo de hidratação as partículas menores de clínquer se dissolvem e as partículas maiores diminuem de tamanho. Porém, as partículas de clínquer não hidratados tornam o produto com hidratação muito densa.

Os materiais constituintes podem afetar a pasta de cimento hidratada, quando os materiais cimentícios secundários (SCM) são incorporados podem aumentar a produção de C-S-H por meio das reações pozolânicas (CAREY *et al.*, 2020). Segundo Wu *et al.* (2018) e Sidodikromo *et al.* (2019), o UHPC é produzido com alto teor de cimento, por isso, muitos estudos foram realizados para melhorar seu desempenho e a relação custo-benefício. A substituição parcial do Cimento Portland por materiais cimentícios secundários como: escória de alto forno, sílica ativa, metacaulim e cinzas volantes são opções sustentáveis e viáveis que aumentam a durabilidade do UHPC.

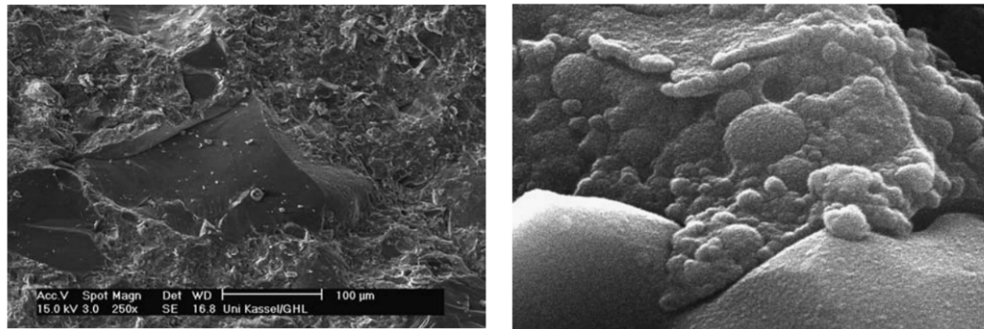
Os grãos de metacaulim (MK) preenchem os vazios entre o cimento e a sílica ativa, pois possuem granulometria maior e menor, respectivamente. O metacaulim é um SCM que contribui na melhoria da resistência à compressão, aumento da durabilidade, redução da retração autógena (causada pelas reações químicas de hidratação do cimento ao longo do tempo) e devido à elevada compacidade há redução da absorção de água. A utilização do MK é benéfica para pasta de cimento hidratada e seu uso é justificável por ser de baixo custo e alta disponibilidade (SIDODIKROMO *et al.*, 2019).

A sílica ativa que é uma pozolana reativa é um subproduto oriundo da produção de metais silício e suas ligas de ferro-silício. A substituição parcial do cimento por sílica tem como vantagem a redução do consumo de cimento. A sílica ativa possui diâmetro médio de $0,2 \mu\text{m}$ e a proporção ideal de adição é de 20% a 35% em relação à massa do cimento (SIDODIKROMO *et al.*, 2019). A adição de sílica ativa aumenta a resistência final do material, além de acelerar as reações pozolânicas que produz o C-S-H. Sabe-se que a menor relação água/cimento requer um menor teor de sílica ativa. Quando a sílica ativa não está no produto de hidratação pode resultar na diminuição da resistência à compressão e a formação de uma estrutura porosa (ALSALMAN *et al.*, 2020). A depender do teor de carbono presente na sílica ativa pode ocorrer redução da fluidez do UHPC. A elevada quantidade de carvão não queimado presente na sílica ativa pode ser uma desvantagem estética, pois a superfície tem tonalidade escura, além de possuir custo elevado entre 4-7 vezes mais caro que o cimento (ALSALMAN *et al.*, 2020; CAREY *et al.*, 2020).

Com o avanço da nanotecnologia, nanomateriais como a sílica e o metacaulim passaram a ser utilizados como adições contribuindo para o elevado desempenho e durabilidade do UHPC (SEIFAN *et al.*, 2020). Na Figura 4-a é possível visualizar a ausência de poros tornando a microestrutura do UHPC praticamente impermeável. Na Figura 4-b esta uma das justificativas do UHPC apresentar resistência na ordem de 10% a 20% inferior quando submetido

a cura úmida, pois como é analisado na Figura 4-b os grãos de sílica não se encontram hidratados.

Figura 4 – Densidade dos agregados e disposição da sílica na matriz.



(a) Densidade dos agregados na microestrutura do UHPC

(b) Sílica na matriz do UHPC

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

A substituição do cimento por cinzas volantes não é isolada, normalmente, é misturado com outro SCM. A substituição integrada de escória granulada de alto forno (GGBFS) com cinzas volantes ocasiona em elevada resistência à compressão e aumento significativo da resistência à flexão (CAREY *et al.*, 2020). A cura também interfere na resistência à compressão dessas misturas. Concretos submetidos à cura térmica apresentam resistência à compressão 25% maior, quando comparado com misturas sujeitas a cura padrão (úmida e temperatura ambiente), além de diminuir a porosidade do UHPC (SEIFAN *et al.*, 2020). A adição acima de 30% de cinzas volantes pode influenciar, negativamente, no módulo de elasticidade. Uma vantagem é o baixo custo das cinzas volantes, quando comparado com o cimento. A adição de cinzas volantes tendem a reduzir o calor de hidratação, retardam o ganho de resistência mecânica nas idades iniciais e a absorção secundária, embora as reações pozolânicas aumentem a produção de C-S-H ao longo do tempo (ALSALMAN *et al.*, 2020; SEIFAN *et al.*, 2020).

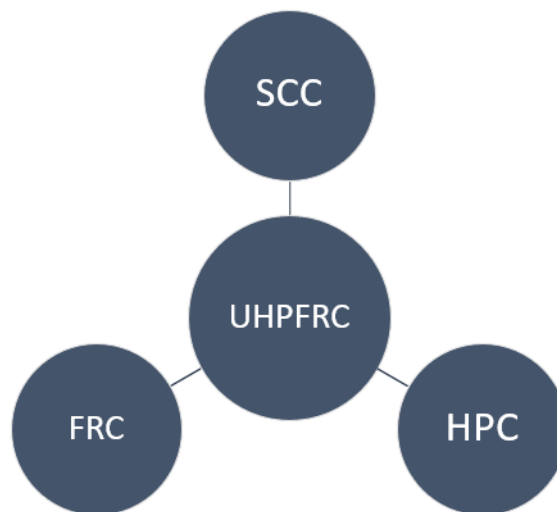
Diante disso, a microestrutura densa e a alta resistência do UHPC é garantida pela baixa relação água/ligante cerca de 0,20 (AÏTCIN, 2016). As partículas ultrafinas com granulometria $<125 \mu\text{m}$ quando combinadas com SCM se aglutinam tornando a mistura mais empacotada (FEHLING *et al.*, 2014). Em suma, a presença de materiais cimentícios secundários e a otimização da relação água/ligante é presente em concretos que possuem baixa permeabilidade e alta resistência mecânica.

2.5 Concreto de Ultra-Alto Desempenho

Diante dos avanços tecnológicos e do cálculo estrutural muitos estudos na área da mecânica dos materiais possibilitaram um maior conhecimento sobre o comportamento do concreto e aço, diante disso, concretos especiais surgiram com o intuito de unir alta resistência, economia, bom comportamento mecânico e alta durabilidade.

O *Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete* (UHPFRC) é a evolução e combinação do *self-compacting concrete* (SCC), *fiber reinforced concrete* (FRC) e *high-performance concrete* (HPC) como pode ser visualizado na Figura 5. Segundo Fehling *et al.* (2014), o UHPFRC é influenciado pela orientação e distribuição das fibras, logo a sua resposta a tensão é sensível à proporção e distribuição das fibras. Em síntese, o UHPFRC fornece a ductilidade que é inexistente no UHPC. Entretanto, há um desafio em tornar o UHPFRC economicamente viável e de fácil aplicação em obras. No Brasil, não há centrais misturadoras o que dificulta a disseminação do UHPFRC no país.

Figura 5 – Evolução do UHPFRC.



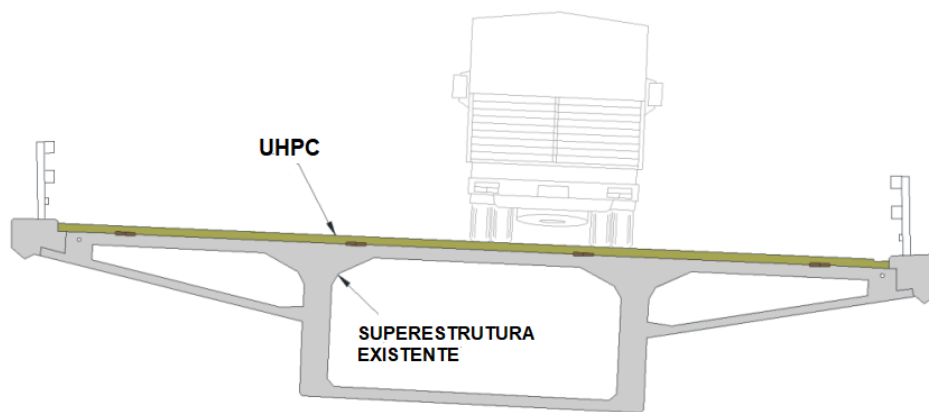
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A relação água/cimento (a/c) é um dos principais fatores responsáveis por garantir um concreto de alta resistência e elevada durabilidade. Entretanto, há várias pesquisas que empregam adição de materiais pozzolânicos com o intuito de atingir os requisitos de desempenho mecânico, sem comprometer as propriedades do concreto em seu estado fresco e endurecido. Atualmente, no Brasil, não há normas que retratam requisitos de projeto, procedimento de mistura, dentre outros. O UHPFRC apresenta alta durabilidade em virtude da baixíssima porosidade e tamanho

dos poros, sendo que cerca de 75% dos vazios estão situados no interior da estrutura do C-S-H.

Diante do exposto, o UHPFRC pode ser utilizado como reforço estrutural principalmente em situações que exigem baixa permeabilidade, porosidade e resistência à corrosão, como no caso de pontes rodoviárias (Figura 6). Em complemento à elevada durabilidade do UHPFRC pode-se destacar que a resistência ao ataque de cloretos, ductilidade, estética e velocidade de execução são alguns fatores que justificam seu uso. O ciclo de vida é um fator importante a ser considerado, pois devido à alta durabilidade do UHPC é necessário menos intervenções e reparos ao longo da vida útil da estrutura. Portanto, é uma solução para mitigar custos futuros, bem como evitar interrupções no tráfego em caso de pontes e passarelas (DOIRON, 2016).

Figura 6 – Utilização de UHPC como reforço estrutural.



Fonte: adaptado de Haber *et al.* (2018).

Segundo Buttignol *et al.* (2017), após a caracterização do UHPFRC em ensaios experimentais é possível calibrar os resultados para serem utilizados e extrapolados em elementos estruturais com geometria semelhante. A utilização do UHPFRC necessita de cuidados especiais no traço, procedimento de mistura e nas condições ambientais. A empregabilidade de UHPFRC em elementos estruturais necessita de maior conhecimento das características desse material e, bem como, dos coeficientes de segurança empregados em estruturas de concreto. Normalmente é realizado adaptações nos coeficientes de segurança com as ações permanentes e variáveis. Conforme Fehling *et al.* (2014), os principais desafios de projeto e usabilidade do UHPC em obras são:

- UHPC é extremamente sensível à variação dos materiais constituintes. A exigência elevada na qualidade da produção e monitoramento do UHPC e, bem como, na fabricação de elementos pré-moldados acarreta em uma defasagem do UHPFRC no estado fresco. Porém, essa defasagem pode ser compensada pela elevada resistência à compressão e leveza deste material,

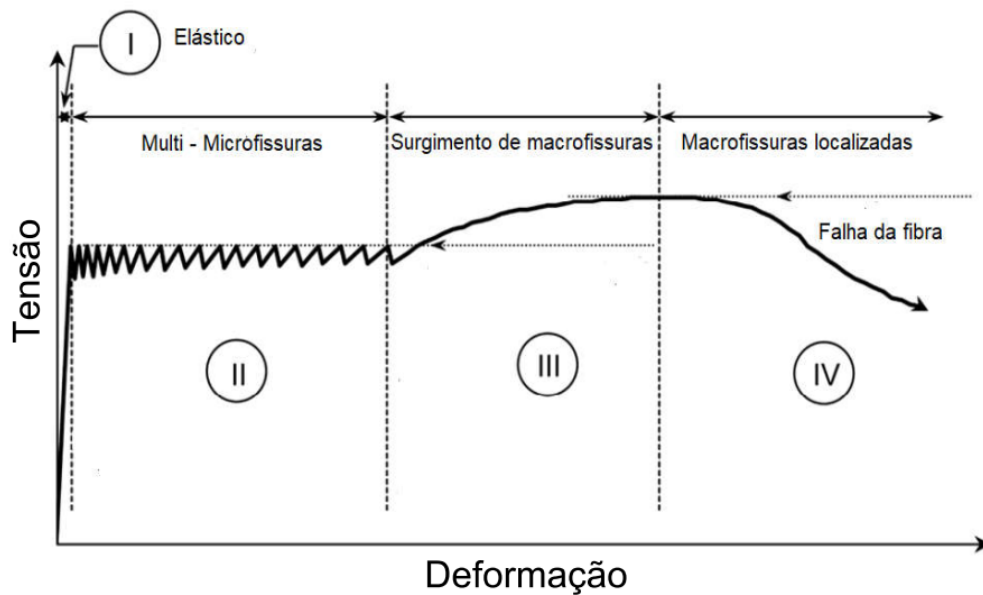
que possibilita redução dos coeficientes de segurança. A medida que a resistência à compressão aumenta, a variação da resistência à compressão (γ_c) diminui. γ_c é subdividido em permanente e acidental, de modo que, o γ_c acidental é 0,20 menor que o permanente. γ_c é utilizado para carga permanente em condições normais, entretanto com controle da qualidade e monitoramento ($\gamma_c = 1,35$) e sem controle tecnológico ($\gamma_c = 1,50$).

- Quando comparado com o concreto convencional, o UHPC apresenta ruptura frágil, assim sendo, a ductilidade do UHPC é obtida com adição de fibras. No caminho pós-pico deve-se diferenciar quebradiço de suficientemente dúctil, para isto é necessário estabelecer um critério de armadura mínima. Se a ductilidade não é atingida é necessário utilizar um novo fator de segurança.

- A incorporação de fibras melhora o desempenho e a ductilidade do UHPC, tendo a possibilidade de ser empregado como reforço estrutural. Nesta condição, a distribuição e a orientação das fibras deve ser uniforme, logo em análise para o estado limite último as fibras devem passar por rigoroso controle tecnológico na mistura. Além disto, deficiências locais podem causar falhas imediatas necessitando de um fator de segurança maior.

O UHPC é um compósito promissor na utilização em pontes de concreto, devido à sua elevada durabilidade, resistência à agentes químicos, à compressão e à tração entre 10-15 MPa, características obtidas por meio do empacotamento de partículas e pela relação comprimento-diâmetro da fibra (GUNES *et al.*, 2012). Nas verificações de projeto, a dissipação de energia entre a matriz e a fibra deve ser analisada. O UHPC tem elevada capacidade de dissipação de energia, mesmo após o processo de microfissuração inicial, estruturas de UHPC são capazes de suportar cargas de flexão e tração. Dessa maneira, a capacidade resistente permite o dimensionamento de seções transversais sem armadura passiva ou estribos, logo há economia de custo, de trabalho e redução da seção transversal. Segundo Graybeal e Baby (2013), quando o UHPC é submetido à tração direta, a análise da tensão-deformação é dividida em quatro fases, como pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Macrofissuras e microfissuras em UHPFRC



Fonte: adaptado de Graybeal e Baby (2013).

A resistência da matriz e o comportamento elástico representam a primeira fase. Na segunda fase há propagação de microfissuras na matriz, as macrofissuras irão surgir se a tensão for superior a resistência à tração da matriz. A penúltima fase é caracterizada pelo aumento de macrofissuras e propagação acelerada de microfissuras, podendo assim, surgir novas macrofissuras individuais. A quarta fase é a falha do material, as fibras são puxadas para fora da matriz e as macrofissuras passam a ser localizadas. Segundo Gu *et al.* (2015), a análise do comportamento pós-pico da curva tensão-deformação de tração irá depender da quantidade, tipo e orientação das fibras. Por exemplo, UHPC com baixo teor de fibras ou até mesmo sem fibras não irão possuir as fases II, III e IV.

2.5.1 Composição - Concreto de Ultra-Alto de Desempenho

O UHPC anteriormente conhecido como o concreto de pós reativos, é considerado uma evolução do concreto de alto desempenho, pois possui apenas partículas finas. Sua composição inclui o cimento Portland, areia fina, sílica ativa, quartzo, metacaulim, hiperplastificante, polifuncional e fibras metálicas. Há algumas recomendações para as proporções e materiais constituintes do UHPFRC, tais como (ABBAS *et al.*, 2015):

- Cimento deve possuir um módulo de finura moderada;
- Baixo teor de entrigita (C_3A), uma taxa inferior a 8%;
- A sílica deve ter baixo teor de carbono em sua composição;

- A adição de 25% de sílica e metacaulim em relação à massa de cimento é considerado um teor elevado;

- Baixo teor de água, relação a/c ente 0,15 e 0,28;

- Adição de fibras de aço com taxa máxima de 3,0% do volume total.

Em síntese, o grau de finura do cimento deve ser elevado e a concentração de C_3S também. A concentração de C_3A e C_3AF , obrigatoriamente, deve ser baixa e possuir estrutura de polimorfo cúbico (SHAIKH *et al.*, 2020). O UHPC entra em colapso quando os agregados apresentam falha.

Devido à ausência de agregado graúdo na mistura, há diminuição do índice de vazios e, conseqüentemente, ganho de resistência mecânica, principalmente à compressão, tração e aumento do módulo de elasticidade. O UHPC é uma opção viável em reforço de estruturas deterioradas, o baixo índice de vazios reduz à penetração de cloretos, sulfatos, água e agentes químicos, logo ocorre baixa incidência de manifestações patológicas oriundas da corrosão das armaduras e maresia.

2.5.1.1 Agregados, adições, aditivos

Conforme discutido, a ausência do agregado graúdo favorece na diminuição dos vazios, conseqüentemente da porosidade, ou seja, para atingir elevada resistência torna-se necessário novas adições que tendem a contribuir no desempenho mecânico. A adição de metacaulim tem como função aumentar à densidade da matriz cimentícia, bem como proporcionar maior resistência mecânica e elevar o processo de hidratação do UHPC (LIU *et al.*, 2018). O empacotamento é necessário devido à unicidade dos agregados finos e ultrafinos, para atingir resistência característica à compressão (f_{ck}) superior a 150 MPa, limitando o diâmetro dos finos em 0,6 mm (ALKAYSI; EL-TAWIL, 2015).

Em consequência do baixíssimo teor de água presente na mistura é necessário adições químicas (hiperplastificante e polifuncional) para garantir trabalhabilidade e consistência do UHPC. O uso de hiperplastificante deve ser limitado, pois adições elevadas podem retardar o início da pega, aumento da exsudação, da retração plástica e, além disso, podem causar segregação da mistura e elevar a perda de consistência.

A variação de temperatura pode acarretar em futuros danos ao UHPC devido à quantidade de poros que são criados nos ciclos de congelamento/descongelamento (FEO *et al.*, 2020). A baixa relação água/cimento exige medidas que tendem a mitigar os efeitos secundários

como, por exemplo, a retração da superfície e retração autógena, por causa da ausência de exsudação. Para reduzir os efeitos secundários, a literatura indica que pode ser realizado o controle do tamanho e da distribuição dos grãos de cimento, adição de fibras metálicas, utilização de aditivo redutor de retração (ARR) e uso de cimentos expansivos (CHRIST *et al.*, 2019). A compacidade da microestrutura do UHPC é obtida, pois o espaçamento entre as partículas do cimento é pequeno. A aglutinação dos grãos resultam em uma microestrutura mais densa, proporcionando maior resistência nas primeiras idades e menor porosidade.

O cimento influencia na resistência da pasta e na aderência da pasta-agregado. Propriedades como composição química, seu módulo de finura e sua compatibilidade com os aditivos são fatores a serem observados, haja vista que, essas propriedades irão interferir na resistência do concreto. Normalmente é utilizado o cimento disponível comercialmente na região, entretanto existem algumas recomendações de cimentos a serem utilizados em UHPC. Prioriza-se a empregabilidade de cimento CP V ARI na produção de UHPC por possuir partículas ultrafinas e alta resistência inicial (KUMAR; RAI, 2018).

Os constituintes dos cimentos são responsáveis pelo aumento ou redução da resistência final pasta. O aumento dos Silicatos de Cálcio (C_2S e C_3S) nos cimentos favorece no aumento da resistência da pasta. Com o aumento do C_2S e C_3S deve-se reduzir o aluminato de tricálcico e ferroaluminato tetracálcico (C_3A e C_4AF , respectivamente), pois pouco contribuem na resistência mecânica final da pasta (AÏTCIN; LESSARD, 2019).

2.5.1.1.1 Hiperplastificante de terceira geração

A diminuição da exsudação interna melhora a zona de transição e a hidratação da pasta de cimento, as adições minerais e a baixa relação a/c contribuem para esse efeito. E o hiperplastificante de terceira geração são conhecidos como redutores de água, conseqüentemente, contribuem na trabalhabilidade da mistura e são responsáveis pela baixa relação a/c no UHPC. Desse modo, é necessário determinar o ponto de saturação do aditivo com o cimento. Conforme Schleiting *et al.* (2020), as principais funções dos hiperplastificantes são:

- Garantir consistência reduzindo a demanda de água;
- Aumentar a durabilidade da mistura;
- Reduzir o consumo do cimento.

O *High-Range Water Reducer* (HRWR), principalmente policarboxilato à base de éter (PCE), é um componente essencial para garantir a trabalhabilidade do UHPC, pois o

HRWR permite a redução de água almejada e necessária do UHPC. Hiperplastificante à base de éter garante a fluidez de concreto com alta compactação. Devido à estrutura química do policarboxilato à base de éter é possível reduzir em até 40% o teor de água. A dispersão de partículas é possível com baixíssimo teor de HRWR (0,15%-0,30%) em relação à massa do cimento (SIDODIKROMO *et al.*, 2019). Em consonância, Wang *et al.* (2017), He *et al.* (2018), Shen *et al.* (2019) e Yin *et al.* (2020) dispõem que o hiperplastificante policarboxílico permite a redução de mais de 30% da água presente no UHPC. A escória de cobre, sílica ativa, metacaulim e a escória de cobre granulado quando adicionado na mistura do UHPC reduz o teor hiperplastificante a ser adicionado, pois as adições minerais fornecem maior fluidez.

O cimento não pode ser o único fator limitante do tipo de hiperplastificante a ser utilizado, os PCE são comumente empregados, mas há consenso que o hiperplastificante ideal é aquele que desaglomera adequadamente os cimentos, partículas finas e os SCM (KIM; WANG, 2019). O teor recomendável para adição de HRWR varia de 0,6%-1,2% em relação aos materiais ligantes (FEHLING *et al.*, 2014; KARTHIKEYAN *et al.*, 2018; SCHLEITING *et al.*, 2020). Para Wang *et al.* (2017) o teor recomendável varia entre 1,4%-1,8%.

O teor de sólidos presente nos hiperplastificantes deve-se limitar entre 20% e 40% (YIN *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2017; WU *et al.*, 2018). O baixo teor de sólidos presente nos hiperplastificantes ocasiona uma maior capacidade de redução de água em torno de 30%. O elevado teor de hiperplastificante afeta a emanção do calor de hidratação. Conforme Liu *et al.* (2019) e Shaikh *et al.* (2020), o elevado teor de hiperplastificante (2%-4%) pode reduzir a resistência à compressão, além de retardar a hidratação inicial de ligante do UHPC.

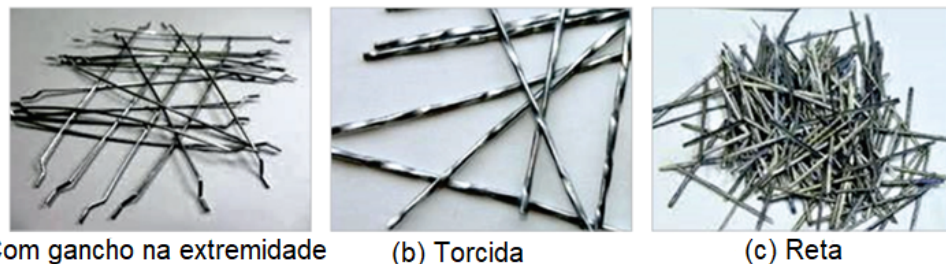
No trabalho de Li *et al.* (2017) foram relatados os efeitos do PCE quando adicionados em mistura de UHPC. Foi constatado que o uso de PCE pode reduzir em até 40% o consumo de água. A trabalhabilidade do concreto pode ser determinada pela capacidade de dispersão e de retenção do hiperplastificante. O teor elevado de PCE atrasa a hidratação, o atraso é contínuo, mesmo após o ponto de saturação. A estrutura química do PCE pode afetar à adsorção do mesmo e, conseqüentemente, afetar de maneira distinta a hidratação. Uma das formas de diminuir esse efeito é a utilização de nanomateriais, pois diminui o efeito de retardamento da hidratação causado pelo alto teor de PCE.

2.5.1.2 Fibras

A proporção da adição de fibras metálicas pode interferir na ductilidade do conjunto (ALSALMAN *et al.*, 2020; WILLE *et al.*, 2011; WILLE; NAAMAN, 2013). As fibras adicionadas no UHPC proporcionam maior módulo de elasticidade, elevada dissipação de energia e diminuição da propagação de abertura de microfissuras. A superfície, o diâmetro e o comprimento são fatores que podem influenciar na magnitude dos efeitos mecânicos e físicos do UHPFRC, isto é, no estado fresco e endurecido.

De acordo com Yoo e Banthia (2016), há diferentes tipologias de fibras, podendo ser longas, curtas, retas, torcidas, lisas e, além disso, com ou sem gancho. As fibras metálicas, como demonstrado na Figura 8, são comumente utilizadas em UHPC. Em síntese, a adição de fibras deve estar correlacionada com a carga aplicada, pois a tipologia da fibra pode apresentar comportamento distinto.

Figura 8 – Tipos de fibras de aço.



(a) Com gancho na extremidade

(b) Torcida

(c) Reta

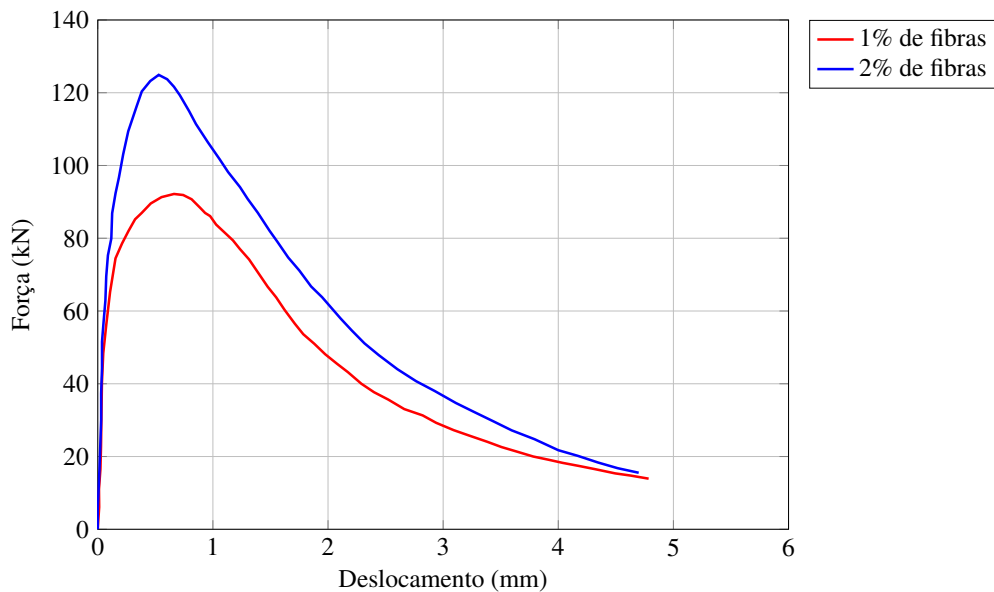
Fonte: adaptado de Buttignol *et al.* (2017).

Além das características mecânicas é necessário considerar a consistência e a trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco, por exemplo, a incorporação do elevado teor de fibra tende a diminuir a trabalhabilidade do mesmo. Existem diversas pesquisas nesse sentido, nas quais a incorporação entre 1% a 2% em relação ao volume total é recomendada (AFROUGH-SABET *et al.*, 2016; BUTTIGNOL *et al.*, 2017; RAHEEM *et al.*, 2019). É considerado o limite máximo 3% de adição de fibras para se garantir boa resistência mecânica, bom desempenho e trabalhabilidade.

Um fator que deve ser analisado é a relação comprimento/diâmetro (L/d), essa relação deve ficar entre 50 mm a 100 mm para manter uma boa ligação entre a matriz e a fibra, garantindo assim a ancoragem e a transferência de esforços (NIS, 2018). Krahl *et al.* (2018) estudaram a evolução do dano por meio do carregamento cíclico em ensaios de compressão, flexão e tração direta, variando o teor de fibra metálica em 1% e 2% no UHPC. As fibras de aço

possuíam diâmetro de 0,2 mm e comprimento de 12,7 mm, a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade das fibras foram de 2850 MPa e 200 GPa, respectivamente. Os testes foram realizados por meio do controle dos deslocamentos, os passos foram parametrizados em 0,05 mm para cada ciclo a carga era reduzida próxima a zero. Como mostra a Figura 9, a adição de fibras faz com que o processo de ruptura não seja brusco, sendo possível determinar as propriedades e comportamento mecânico além do regime elástico.

Figura 9 – Curva força-deslocamento em testes de flexão com adição de 1% e 2% de fibras.



Fonte: adaptado de Krahl *et al.* (2018).

Além disso, devido à alta concentração de partículas de finos e baixa permeabilidade, a matriz do UHPC torna-se mais rígida, conseqüentemente, a interface matriz-fibra torna-se mais resistente. A distribuição e a orientação das fibras podem aumentar a resistência da matriz, as fibras orientadas no sentido longitudinal apresentam melhor comportamento mecânico (BARROS, 2011; PEREIRA *et al.*, 2008; RAHEEM *et al.*, 2019; SOLTANZADEH *et al.*, 2015).

De acordo com Sartorti *et al.* (2020), as microfibras possuem diâmetro de 10 a 30 μm e comprimento entre 3 a 18 mm. As microfibras são utilizadas para mitigar os efeitos de retração e fissuração da matriz no comportamento plástico do concreto, ou seja, a adição de fibras curtas está associada à mecânica do contínuo. As macrofibras possuem diâmetro superior a 30 μm e comprimento entre 30 a 60 mm. As fibras alongadas aumentam a ductilidade do concreto, conferindo maior resistência residual e estão associadas às macrofissuras e, por conseqüência, relaciona-se à mecânica da fratura.

A adição de fibras deve levar em consideração algumas propriedades, tais como:

sua superfície, o teor de fibras incorporadas e, principalmente, a relação comprimento/diâmetro. Fibras com superfícies lisas tendem a diminuir a ancoragem entre a fibra e a matriz. O elevado teor de fibra diminui a trabalhabilidade do concreto e inviabiliza financeiramente. A orientação das fibras pode influenciar na resistência do UHPC, atualmente as técnicas mais estudadas é o da orientação magnética e o método da orientação centrífuga. Conforme Li *et al.* (2018), a orientação das fibras por meio do campo magnético pode dobrar a resistência ao cisalhamento quando comparado com fibras dispostas aleatoriamente. Contudo, na prática as fibras são lançadas na mistura aleatoriamente.

2.5.1.2.1 Adição de metacaulim (MK)

A temperatura da calcinação do metacaulim é responsável pelo controle da reatividade pozolânica. O uso de partículas ultrafinas de metacaulim podem reduzir a retração autógena, além de refinar a estrutura dos poros e melhorar a resistência nas primeiras idades. A disponibilidade e o baixo preço favorece seu uso na fabricação do UHPC.

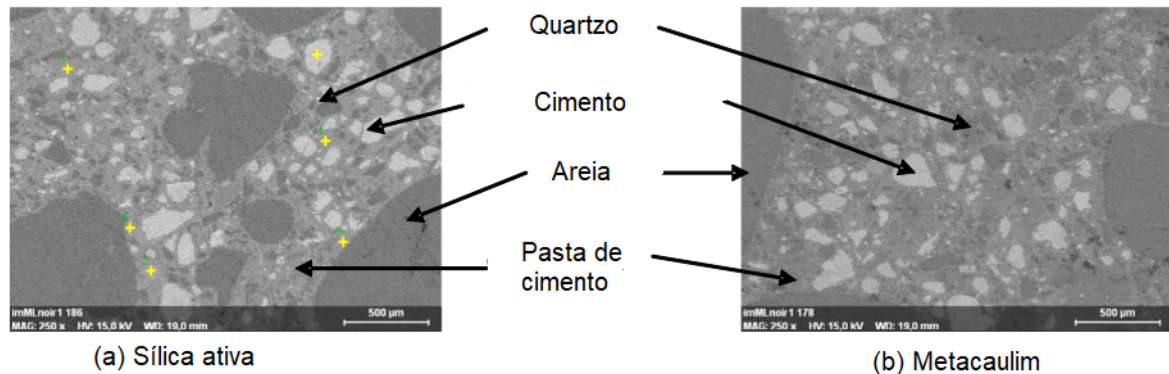
Segundo Bastos *et al.* (2016), além do excelente efeito de empacotamento, o MK torna a matriz do cimento mais leve, melhora a trabalhabilidade da pasta, por ser reativo, apresenta melhoria na resistência ao ataque químico, reduz os efeitos da reatividade álcali-sílica e, bem como, da eflorescência. Há divergência quanto ao benefício estético da cor branca do metacaulim no concreto (BASTOS *et al.*, 2016; SHI *et al.*, 2015).

No estudo realizado por Taфраoui *et al.* (2016), em análise comparativa da adição de sílica e metacaulim, observou-se que o tempo de mistura da pasta com MK é maior. Em consonância, Taфраoui *et al.* (2009) afirmam que o tempo de mistura para UHPC não deve ser superior a 20 minutos. Existe uma pequena diferença na porosidade de UHPC que contém sílica e metacaulim (SHI *et al.*, 2015). Conforme Bastos *et al.* (2016), essa diferença pode estar associada à maior quantidade de vazios e maior densidade do UHPC com metacaulim, entretanto apresentam melhor absorção de água quando comparado ao UHPC contendo sílica. Taфраoui *et al.* (2016) estudou a degradação do UHPC ao longo do tempo, quando adiciona-se sílica e metacaulim, ambos apresentaram elevada durabilidade, logo se justifica o uso desses materiais em misturas de UHPC. No Brasil, não há centrais misturadoras, logo o estudo sobre fabricação, moldagem, procedimento de mistura, cura e caracterização das propriedades físicas e mecânicas do UHPC se dá para fins acadêmicos.

Na Figura 10 é possível analisar o ensaio de difração de raio-X realizado por Taфраoui

et al. (2016) em UHPC com sílica e metacaulim. O único hidratado cristalizado é o cimento Portland, o cimento fica mais evidente na mistura com sílica, evidenciando um dos motivos que a mistura com metacaulim apresenta reatividade pozolânica superior, tal fato pode ser ocasionado pela transformação do cimento em C-S-H ou C-A-S-H. Em suma, para fins técnicos e econômicos, o metacaulim apresenta desempenho superior, quando comparado com a sílica.

Figura 10 – Comparação da microestrutura do UHPC com sílica e metacaulim.



Fonte: adaptado de Tafraoui *et al.* (2016).

Segundo Norhasri *et al.* (2016), o aumento da resistência mecânica é garantido quando adiciona-se sílica e metacaulim, a adição da sílica apresenta uma ligeira melhora quando comparado com o metacaulim, entretanto o MK apresenta melhor durabilidade. O acréscimo de nanopartículas de metacaulim ($> 3\%$) não é garantia de melhoria da resistência, pois a reação pozolânica é reduzida, de modo que não seja suficiente para elevar a resistência. No entanto, conforme Arora *et al.* (2018) para o UHPC é permitido adições elevadas (20% a 30%) de SCM para melhorar o desempenho mecânico. Os limites das adições são realizados para garantir a dispersão dos grãos, no UHPC o teor limite de MK é de 25% em relação à massa do cimento (TAFRAOUI *et al.*, 2009).

Conforme Tafraoui *et al.* (2009) e Shi *et al.* (2015), a resistência à flexão do UHPC com metacaulim é semelhante quando o UHPC têm sílica ativa, qualquer que seja o tipo de cura e se tem adição ou não de fibras. Em consonância ao discutido nessa seção, a resistência à compressão da mistura com metacaulim tende a ser ligeiramente menor quando comparado com misturas que possuem sílica.

2.6 Durabilidade

As estruturas de concreto armado possuem vida útil de projeto e precisam de manutenções para que suas características iniciais, as que foram dimensionadas, assim permaneçam. Nesse sentido, a NBR 6118 (ABNT, 2014) define durabilidade como as características de projeto e vida útil, quando não há grandes intervenções na estrutura.

Existe uma relação entre elevada durabilidade e baixa permeabilidade, pois a baixa porosidade e permeabilidade resultam na maior durabilidade. A durabilidade do UHPC, a alta densidade e o baixo teor de vazios reduzem o transporte de íons que percolam na matriz, desse modo, as propriedades são melhoradas. Além disso, a presença de *fillers* que são partículas ultrafinas e sua distribuição permitem o crescimento de produtos de hidratação na sua superfície, por consequência, a microestrutura se torna mais densa. A hidratação e a cura ao longo do tempo podem interferir na durabilidade e nas propriedades mecânicas do UHPC, a maioria dos estudos têm testado a penetração de íons até aos 28 dias. Em testes de resistividade elétrica realizado por Mosavinejad *et al.* (2020) considerando a cura térmica, padrão, com pressão e água quente, percebeu-se que a cura padrão apresenta melhor desempenho quando comparado com a cura em água quente devido o processo de hidratação lenta e uniforme ao longo do tempo.

Segundo Bae e Pyo (2020), há ganho de ductilidade e aumento da durabilidade no UHPC quando se adiciona fibras. Diferentemente do concreto convencional, o UHPC apresenta o comportamento de encruamento mesmo reduzindo a tensão de tração. Após a primeira fissura o processo de microfissuração é contínuo evidenciando uma falha quebradiça, em suma, a expansão da largura da fissura afeta, negativamente, a durabilidade.

Nesse contexto, nanomateriais quando utilizados como materiais cimentícios secundários na fabricação de UHPC resultam no bom desempenho mecânico e elevada durabilidade. A água de absorção capilar também é um fator a ser considerado na durabilidade, por exemplo, a adição de cinzas volantes retardam a absorção secundária (SEIFAN *et al.*, 2020).

Segundo Fang *et al.* (2020), a durabilidade do UHPFRC colabora na redução da seção transversal e da armadura tradicional. A elevada durabilidade está condicionada com a baixa relação água/ligante, entretanto o baixíssimo consumo de água acarreta na retração por secagem. Em comparação com o concreto convencional, o UHPC em idades avançadas pode apresentar retração autógena severa.

Em síntese, a durabilidade do UHPC está diretamente relacionada com a microestrutura que envolve a densidade, a redução da relação água/cimento e elevado teor de ligante.

É importante salientar que a resistência, a permeabilidade e a porosidade são características importantes no desempenho do concreto ao longo do tempo.

As Eqs. 2.1 a 2.4 abordam os modelos de Balsin, Hasselmann, Ryshkevitch e Shiller, que ajudam obter a previsão da resistência à compressão (f_c) por meio da porosidade. A redução dos poros, como já foi abordado, é um fator relevante para garantir a elevada durabilidade (FANG *et al.*, 2020).

Equação de Balsin:

$$f_c = f_{c,0} (1 - P)^n \quad (2.1)$$

Equação de Hasselmann:

$$f_c = f_{c,0} (1 - AP) \quad (2.2)$$

Equação de Ryshkevitch:

$$f_c = f_{c,0} \exp(-BP) \quad (2.3)$$

Equação de Shiller:

$$f_c = D \ln \frac{P_0}{P} \quad (2.4)$$

Ryshkevitch e Schiller fizeram previsões com equação exponencial e logarítmica respectivamente, com a porosidade variando de 0% a 100%. Nas Eqs. 2.1 - 2.4:

- $f_{c,0}$ é a força quando a porosidade é nula;
- f_c é a força quando a porosidade é P;
- P_0 é a porosidade quando a força é nula;
- P é a porosidade;
- n é um coeficiente a ser determinado;
- A, B e D são as constantes empíricas.

Em consonância ao apresentado ao longo desta seção, Mehta e Monteiro (2017) definem permeabilidade como a capacidade de um fluido percolar sobre um sólido, a permeabilidade é um fator primário na definição da durabilidade. Concreto com baixa relação água/cimento (a/c)

possuem baixa permeabilidade, conseqüentemente, maior durabilidade. Um concreto com baixa permeabilidade possui uma microestrutura quase que impermeável, essa é uma característica do concreto que ficou conhecido como pós reativo (atualmente conhecido como concreto de ultra-alto desempenho), que relaciona durabilidade, permeabilidade e baixa relação a/c. Com o aumento do grau da hidratação a permeabilidade sofre uma grande redução.

2.7 Caracterização das propriedades mecânicas

Ensaio de compressão axial, tração diametral, tração direta, flexão e módulo de elasticidade foram realizados para obtenção das propriedades mecânicas sob carregamento monotônico. Vários autores analisaram as propriedades do UHPC e UHPRFC, assunto a ser discutido nesta seção. O comportamento mecânico do UHPC e UHPRFC são diferentes.

Segundo Buttignol *et al.* (2017), o UHPC e o UHPRFC apresentam processo de hidratação lento e, por consequência, ocorre evolução das propriedades mecânicas ao longo do tempo. Nas idades iniciais apresentam alta resistência mecânica, normalmente o grau de hidratação ideal é atingido após 90 dias de idade, por consequência, são ensaiados com idade superior ao concreto convencional (AZMEE; SHAFIQ, 2018; KUMAR; RAI, 2018; LI *et al.*, 2020).

Elementos estruturais moldados com UHPC apresentam algumas desvantagens. Em consequência da hidratação lenta, a aplicação de pré-tensão, remoção de fôrmas e o controle da abertura de fissuras são afetados negativamente, pois o processo de evaporação da água é acelerado, de tal forma que, a superfície do elemento enrijece mais rapidamente que o interior do elemento estrutural (YOO; BANTHIA, 2016).

Além da idade, a baixa porosidade e a cura térmica sob pressão são responsáveis por garantir elevada resistência aos 28 dias, tornando a mistura mais densa e acelerando o processo de hidratação (ALSALMAN *et al.*, 2020; BUTTIGNOL *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2020; YOO; BANTHIA, 2016).

2.7.1 Compressão axial

Jones e Cather (2005), para UHPRFC propuseram uma relação entre tensão e resistência à compressão. Analisaram o efeito linear elástico e o começo da plastificação do

material, como mostra a Eq 2.5.

$$\sigma_c = \frac{\alpha f_{ck}}{\theta \gamma_b} \quad (2.5)$$

Onde:

α é uma constante;

f_{ck} é a resistência característica à compressão;

θ é o coeficiente para cargas transientes;

γ_b é um fator de segurança, com valor de 1,4.

O coeficiente α apresentado pela Eq 2.6 é composto por três coeficientes, sendo η_t o coeficiente que está relacionado com a duração da carga aplicada, em regra tem valor igual a 1; η_{f1} considera o limite de deformação devido à carga axial, o coeficiente assume o valor de 0,85; η_{f2} considera o comportamento estrutural e possui o valor de 0,67 (BRÜHWILER, 2016).

$$\alpha = \eta_t \eta_{f1} \eta_{f2} \quad (2.6)$$

Para elementos pré-moldados, Almansour *et al.* (2008) propuseram um modelo constitutivo de tensão-deformação considerando o regime linear-plástico. Nesse modelo a resistência à compressão última (f_{cu}) é limitada em 65%, como mostra a Eq 2.7.

$$f_{cu} = 0.65 f_c \quad (2.7)$$

O desvio padrão é definido por meio da Eq 2.8.

$$S \leq 10 f_{ck} \quad (2.8)$$

Segundo Graybeal e Davis (2008), a evolução da resistência do UHPC é dada em função do tempo (t), como mostra a Eq 2.9.

$$f_c(t) = f_c [1 - \exp(-((t - 0.9)/3)^{0.6})] \quad (2.9)$$

2.7.2 Capacidade resistente à flexão

A maior resistência à flexão e a maior deformabilidade estão diretamente relacionada com o aumento da incorporação de fibras. Naaman (2008) apresentou uma relação linear da capacidade resistente à flexão. Essa relação é dada pela Eq 2.10.

$$\sigma_{bf} = A\sigma_{bf0}(1 - V_f) + \frac{BV_f l_f}{d_f} \quad (2.10)$$

Onde:

σ_{bf} é a resistência à flexão do concreto reforçado com fibras;

σ_{bf0} é a resistência à flexão do concreto sem fibras;

A e B são constantes empíricas;

V_f é o volume de fibras na mistura;

l_f é o comprimento da fibra utilizado;

d_f é o diâmetro da fibra utilizado.

A relação comprimento/diâmetro (L/d) da fibra deve ser obrigatoriamente entre 50 mm e 100 mm. A relação utilizada por Naaman (2008) foi de 65.

2.7.3 Previsões do módulo de elasticidade para o UHPC

O módulo de elasticidade é uma propriedade que está diretamente relacionada com às deformações dos elementos estruturais. Existem várias metodologias para obtenção desse parâmetro, seja por meio da resistência à compressão, relação a/c, a/ag ou da resistência do agregado graúdo. No presente trabalho, a NBR 8522 (ABNT, 2017) foi utilizada para determinação dos módulos de elasticidade e de deformação à compressão. O CEB-FIP Model Code 2010 (BÉTON, 2010a) estabelece à relação entre f_{ck} x E. O módulo de elasticidade tangente (E_{ci}) é obtido pela Eq. 2.11.

$$E_{ci} = E_{c0} \alpha_E (f_{cm}/10)^{1/3} \quad (2.11)$$

onde:

$E_{c0} = 21,5 \cdot 10^3$ MPa;

α_E é o coeficiente em função do tipo de agregado;

f_{cm} é a resistência média à compressão aos 28 dias em MPa.

Na análise elástica, onde se considera apenas as deformações plásticas iniciais, pode ser utilizado o módulo de elasticidade reduzido E_c , onde, E_{ci} é o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias.

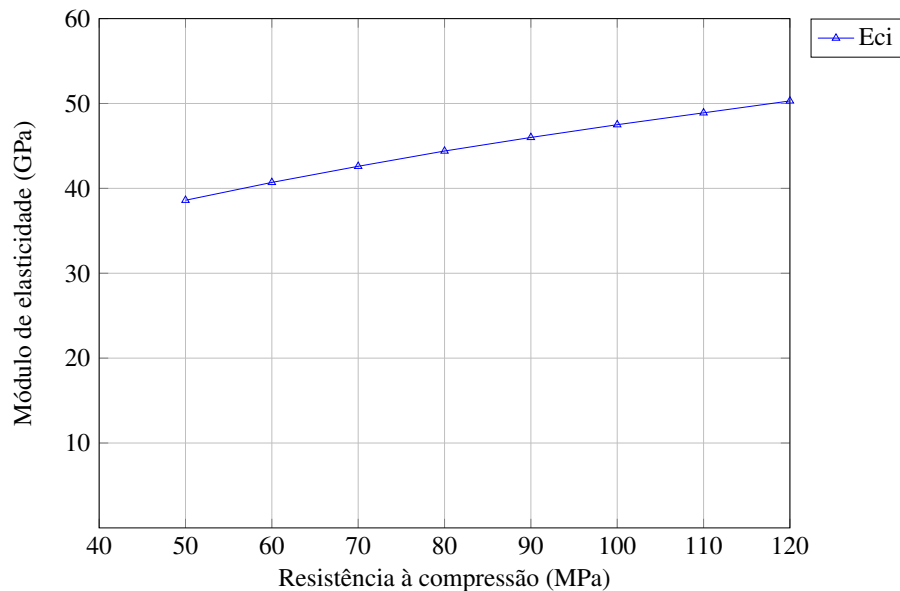
$$E_c = \alpha_i E_{ci} \quad (2.12)$$

onde:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 (f_{cm}/88) \quad (2.13)$$

Em suma, o módulo de elasticidade tangente tende a aumentar proporcionalmente a resistência do concreto. Para concreto com resistência superior a 80 MPa, o módulo de elasticidade reduzido passa a ser igual ao tangente. Em síntese, há uma relação diretamente proporcional entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. Na Figura 11 é possível analisar a evolução do E_{ci} conforme a resistência do concreto. O UHPC tem módulo de elasticidade entre 40-55 GPa.

Figura 11 – Aumento do E_{ci} conforme a resistência do concreto.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Segundo Fehling *et al.* (2014), o módulo de elasticidade (E_c) pode ser obtido em função da resistência à compressão (f_c) e é dado pela Eq. 2.14 e Eq. 2.15.

Para UHPC apenas com partículas finas:

$$E_c = 8800 f_c^{1/3} \quad (2.14)$$

Para UHPC com basalto:

$$E_c = 10200 f_c^{1/3} \quad (2.15)$$

A resistência à compressão (f_c) é obtida em função da resistência característica à compressão (f_{ck}), onde:

$$f_c = f_{ck} + 8 \quad (2.16)$$

A Eq. 2.16 não leva em consideração o desvio padrão que está relacionado com o processo de dosagem, no entanto, a NBR 12655 (ABNT, 2015a) considera o desvio padrão, mas não contempla concreto de alta e ultra-alto desempenho. Conforme o EN 1992 (CODE, 2005), a resistência à compressão considera o tempo de ensaio (3-28 dias), quando o concreto é ensaiado após os 28 dias tem-se que $f_c = f_{ck}$.

Na curva de tensão-deformação para concreto convencional o trecho linear é até $0,30f_c$, no UHPC esse valor corresponde a $0,80f_c$. Fehling *et al.* (2014) dispõem de algumas estimativas para o coeficiente de Poisson, quando se utiliza apenas finos varia entre 0,18-0,19. Para UHPC com agregado graúdo o coeficiente passa a ser 0,21 e 0,30 quando há falha do material. Todavia, esses valores são estimativas, por isso a caracterização do material é necessária.

2.8 Modelos de empacotamento de partículas

A microestrutura densa do UHPC é obtida por meio da teoria do empacotamento de partículas. Sendo assim, responsável pela elevada resistência à compressão, maior módulo de elasticidade, menor exsudação, menor fluência, menor retração e, principalmente, maior durabilidade (DAMINELI *et al.*, 2017; YU *et al.*, 1996). Os principais modelos de empacotamento de partículas são: Furnas (1929), Andreasen (1930), Toufar *et al.* (1976), Larrard e Sedran (1994), Larrard (1999), Larrard e Sedran (2002) e Alfred, Funk e Dinger (1994). Alguns modelos tratam às partículas como distribuições discretas, no entanto, outros como distribuições contínuas.

2.8.1 Modelo de Furnas

O modelo de Furnas (1929) considera a distribuição granulométrica de forma discreta, ou seja, o empacotamento perfeito é obtido quando as partículas menores preenchem todos os vazios existentes. Furnas (1929) generalizou sua teoria que prevê a distribuição de máxima densidade de empacotamento por meio de uma progressão geométrica, conforme a Eq. 2.17.

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \quad (2.17)$$

Sendo:

CPFT é a porcentagem acumulada passante de finos;

D_p é o diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

D_s é o diâmetro da menor partícula do empacotamento;

D_L é o diâmetro da maior partícula do empacotamento;

r é a razão entre os volumes de partículas retidas em uma malha de peneira e o volume da malha imediatamente inferior.

Pela teoria de Furnas há generalização para qualquer mistura com infinitos diâmetros diferentes, anteriormente, era considerado apenas para misturas binárias. O empacotamento ideal ocorre quando todos os vazios são preenchidos (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

2.8.2 Modelo de Andreassen e Andersen Modificado

O modelo de Alfred, Funk e Dinger (1994) é conhecido como o Modelo de Andreassen e Andersen Modificado, nesse modelo as partículas têm uma distribuição contínua. De acordo com Andreasen (1930), o empacotamento ideal irá ocorrer quando o menor diâmetro da partícula for próximo de zero, ou seja, algo que não acontece na prática (DAMINELI *et al.*, 2017). No modelo original, Andreasen (1930) propôs uma similaridade entre duas partículas que possuem tamanhos distintos. Essa similaridade é dada pela Eq. 2.18:

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \quad (2.18)$$

Sendo:

CPFT é a porcentagem acumulada passante de finos;

D_p é o diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

D_L é o diâmetro da maior partícula analisada no empacotamento;

q é o coeficiente de empacotamento;

Segundo a lei de potência, o coeficiente de empacotamento que garante o empacotamento perfeito é de 0,37 para esferas geometricamente perfeitas. Porém, como já foi discutido, é um modelo teórico.

O modelo de Alfred, Funk e Dinger (1994) contempla a união, comparação e o aperfeiçoamento dos modelos de Andreasen e de Furnas. Esse modelo prova matematicamente a convergência dos dois modelos citados anteriormente. Na Eq. 2.19 o conceito do tamanho mínimo de partículas é incorporado.

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (2.19)$$

Sendo:

$CPFT$ é a porcentagem acumulada de finos;

D_p é o diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

D_s é o diâmetro da menor partícula do empacotamento;

D_L é o diâmetro da maior partícula do empacotamento;

q é o coeficiente de empacotamento.

3 MATERIAIS

O presente trabalho foi dividido em três etapas. A primeira trata do desenvolvimento e caracterização físico-mecânica do concreto de ultra-alto desempenho com resistência à compressão superior a 150 MPa. O objetivo desta etapa foi o de desenvolver a tecnologia de produção de compósitos cimentícios não convencionais por meio da otimização de sua estrutura granular. Também foi visado à obtenção das propriedades fundamentais que serviram de base para análise numérica disposta na Seção 5. O objetivo desse esforço foi o de estabelecer a contribuição na capacidade portante de estruturas, em virtude do aprimoramento das propriedades físicas e microestruturais dos concretos utilizados. Para caracterização das propriedades constitutivas fundamentais dos compósitos foram realizados os seguintes ensaios:

- Caracterização granulométrica dos agregados, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019) e NBR 7681 (ABNT, 2013);
- Compressão Axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018);
- Tração Direta;
- Tração Indireta, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011b);
- Módulo de Elasticidade Estático, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017);
- Módulo de Elasticidade Dinâmico, conforme a NBR 15630 (ABNT, 2008);
- Tração na Flexão, de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010);
- Energia de fratura;
- Análise da evolução do dano por meio de relações constitutivas;
- Absorção de água, índice de vazios e massa específica, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009);
- Absorção por capilaridade, conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012).

Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais empregados na fabricação dos compósitos cimentícios. O método do empacotamento de partículas proposto por Funk e Dinger (1994) foi utilizado para obtenção de um material com baixo índice de vazios, baixa permeabilidade e elevada resistência à compressão. A escolha dos materiais levou em consideração à disponibilidade regional e, bem como, sua contribuição na melhoria das propriedades físicas e mecânicas. O resultado dessa etapa foi expresso na forma de traços de concretos não convencionais com as propriedades desejadas.

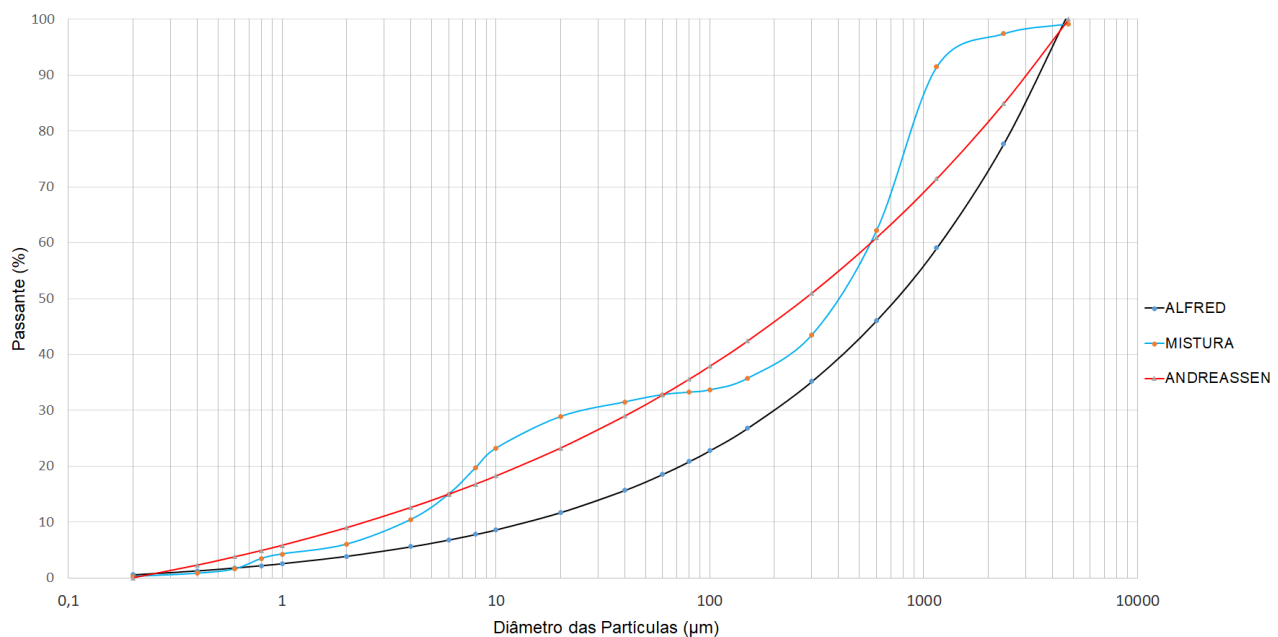
Na segunda etapa foram realizados ensaios mecânicos em estruturas reduzidas. Foram moldadas pequenas vigas com concreto convencional e uma camada de UHPFRC obtendo

resultados que justifiquem o uso do UHPFRC como graute em estruturas deterioradas. Na terceira etapa, do presente estudo, foi realizada a modelagem numérica do ensaio de tração direta e flexão. Aqui foi realizada a validação numérica via o método dos elementos finitos utilizando o modelo constitutivo *concrete damaged plasticity* já implementado no *software* ABAQUS.

3.1 Materiais

Para o UHPC em decorrência da exclusão do agregado graúdo há uma maior sensibilidade na variação granular dos materiais constituintes. Em virtude disso, o método de empacotamento de partículas foi utilizado para propôr misturas otimizadas que apresentem o menor Índice de Desvio de Empacotamento (IDE). Em síntese, o método consistiu em aproximar a curva da mistura utilizada nesse trabalho com a curva do modelo de Andreassen e Andersen Modificado. A otimização da mistura foi realizada com uso da ferramenta *Solver* do Excel e, posteriormente, do *Software* EMMA, o resultado é explicitado na Figura 12.

Figura 12 – Mistura proposta para UHPC.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Percebeu-se, em estudo piloto, que a adição de fibras metálicas em relação à massa do cimento não apresentou um aumento significativo na resistência à compressão e na ductilidade. Desse modo, como pode ser visto na Tabela 1, a adição foi realizada em relação ao volume para mitigar essas deficiências, tal mudança está em consonância com os trabalhos de Abbass e Khan (2018), Abdulkareem *et al.* (2018), Fehling *et al.* (2014), Krahl *et al.* (2018), Li *et al.* (2020),

Seifan *et al.* (2020), Shaikh *et al.* (2020), Wang *et al.* (2019), Wille *et al.* (2011b). Pode-se afirmar com base nos resultados obtidos que esse método apresenta um melhor desempenho contribuindo na melhoria significativa das propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 1 – Traços em massa do UHPC e UHPFRC

Materiais	Traço 0 (kg)	Traço 1 (kg)	Traço 2 (kg)
Cimento CP V-ARI	1,0	1,0	1,0
Areia	1,02	1,02	1,02
Metacaulim	0,25	0,25	0,25
Hiperplastificante	4%*	4%*	4%*
Fibra metálica (dramix)	0	1%**	2%**
Água	0,20	0,20	0,20

* incorporação de SP em relação à massa do cimento
 ** adição de fibras em relação ao volume

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A areia passou por secagem como pode ser visualizado na Figura 13. O agregado miúdo ficou disposto em uma estufa durante 24 horas com temperatura de 100°C constante para diminuir a umidade dos agregados.

Figura 13 – Metodologia de secagem dos materiais.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Foi realizada a cura úmida em todos os CPs de UHPC, como é possível visualizar na Figura 14. Para fins de estudo da evolução da resistência à compressão foi realizada a cura térmica (banho maria) em CPs de 4 cm de aresta. Os cps prismáticos de 4x4x16 cm foram moldados devido a escassez de CPs com 4 cm de aresta e, além disso, os cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura foram utilizados nos ensaios de durabilidade. Como é possível visualizar na Figura 15, os CPs de maior diâmetro e de maior comprimento estavam dispostos em um recipiente maior, em contrapartida, os CPs menores estavam em um recipiente menor.

Esse procedimento está em consonância com a NBR 5738 (ABNT, 2015).

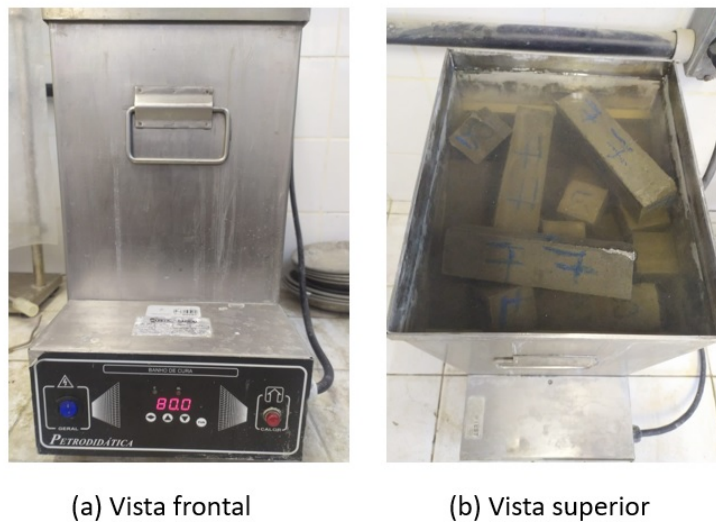
Figura 14 – Cura úmida dos corpos de prova.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A cura térmica foi realizada via o banho maria, como mostra a Figura 15. Os corpos de prova ficaram submersos por 7 dias com temperatura de 80°C constante. Em seguida, os corpos de prova ficaram em um ambiente controlado com temperatura ambiente, seco, coberto e protegido de intempéries até o respectivo dia de ruptura.

Figura 15 – Cura térmica dos corpos de prova.



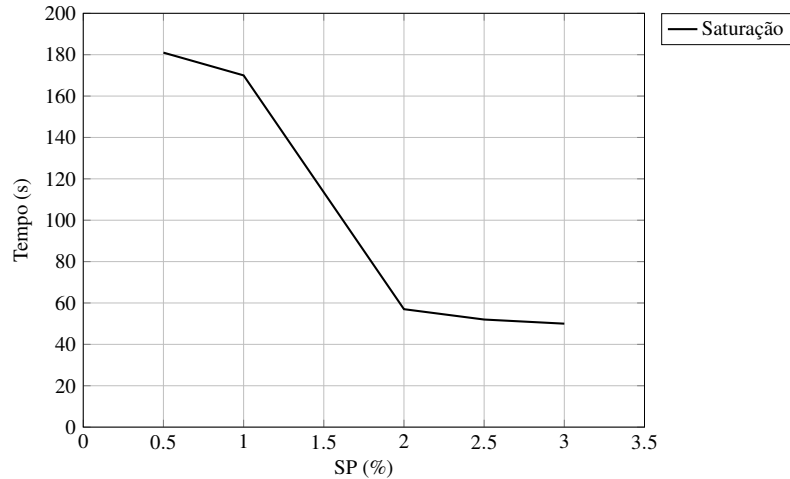
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

3.1.1 Agregados e adições

Algumas análises foram realizadas para caracterizar o material utilizado na composição do UHPC. Inicialmente, foi necessário determinar a compatibilidade entre o cimento e o hiperplastificante. A saturação do hiperplastificante foi determinada por meio da NBR 7681

(ABNT, 2013) e pode ser visualizada na Figura 16. Esta análise é necessária, pois após o ponto de saturação o hiperplastificante não desempenha mais a função de plastificante, podendo assim, afetar negativamente às propriedades mecânicas do UHPC.

Figura 16 – Ensaio de saturação do hiperplastificante.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

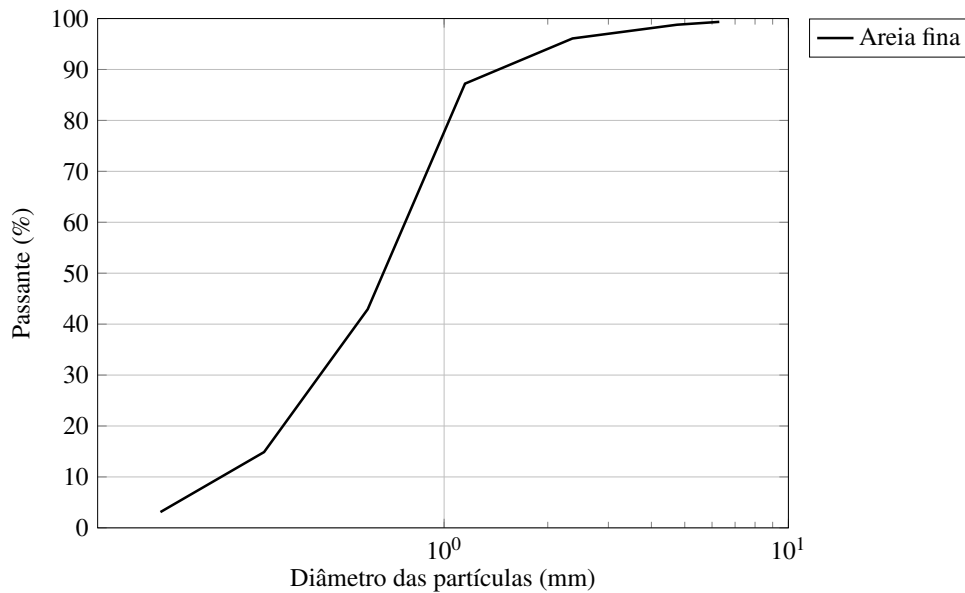
O empacotamento virtual foi realizado considerando $q = 0,37$ e $q = 0,20$. Nesse método a máxima densidade da mistura é obtida quando a menor partícula possuir diâmetro próximo de zero, entretanto, na prática é impossível obter o empacotamento virtual. Porém, ele pode nortear o empacotamento real, quanto mais próximo a mistura estiver do empacotamento virtual mais densa será a mistura. Após a caracterização dos materiais foi realizado o empacotamento real e determinação do traço do UHPC. E em seguida foi possível obter as propriedades não-lineares do UHPC.

Inicialmente, optou-se em diminuir o consumo de cimento adicionando a sílica ativa e o metacaulim na mistura, mas nos ensaios mecânicos percebeu-se que a mistura que possuía apenas metacaulim apresentava uma resistência à compressão superior a mistura que continha sílica ativa e metacaulim.

Devido à exclusão do agregado graúdo, a areia é o maior grão presente na mistura do UHPC. A areia fina possuía diâmetro máximo característico (DMC) de 2,36 mm. No empacotamento de partículas já foi notada a ausência de partículas maiores de areia, assim sendo, as partículas mais finas da mistura (cimento e metacaulim) preenchem os vazios entre os grãos de areia garantindo o empacotamento máximo. Assim sendo, foi realizado o ensaio de granulometria da areia conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019), como mostra a Figura 17. Devido à presença apenas de finos e grande quantidade de cimento não-hidratado, o UHPC é considerado

um concreto de baixa permeabilidade e baixa porosidade, sendo quase impermeável (LI *et al.*, 2020). Por isso, o UHPC pode ser utilizado como graute em estruturas deterioradas, devido à dificuldade de penetração de agentes físicos, químicos e o biológicos.

Figura 17 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

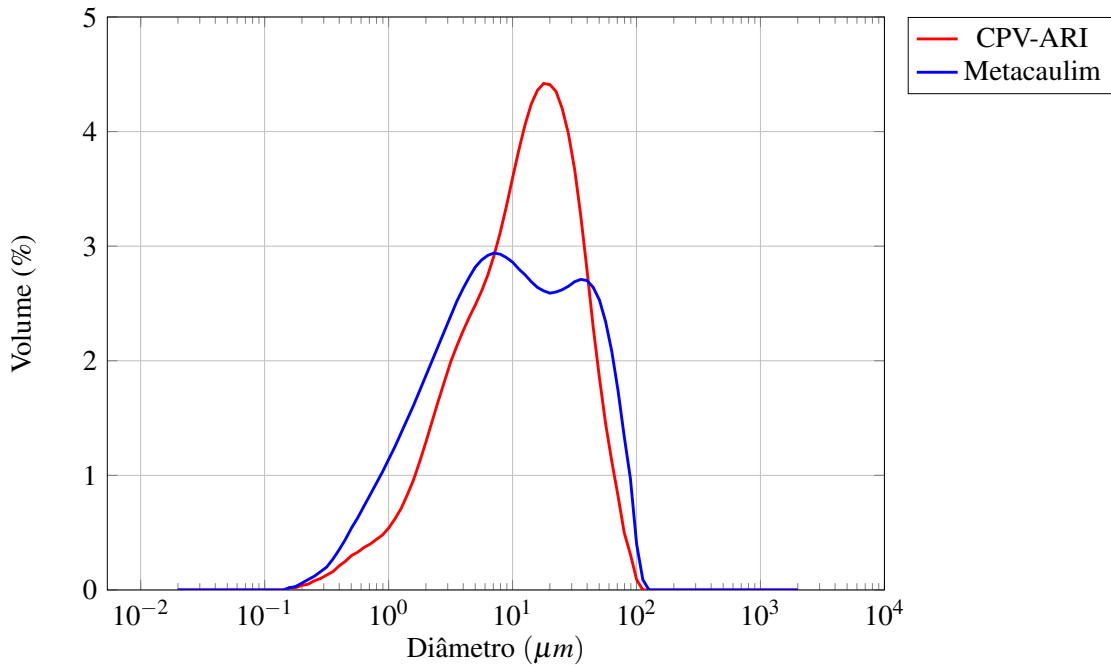


Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Em decorrência do seu alto grau de moagem, alta reatividade e por garantir alta resistência inicial, o cimento CP V - ARI foi utilizado nesta pesquisa. O consumo de cimento é elevado no UHPC. No traço definido do UHPC, o consumo de cimento é na ordem de 900 kg/m^3 , sabe-se que a literatura indica nesse tipo de concreto um consumo de cimento superior a 800 kg/m^3 (CAPRARO *et al.*, 2019; GRAYBEAL; BABY, 2013; KIM; WANG, 2019). O metacaulim foi adicionado em relação à massa de cimento. O teor de MK foi limitado em 25% em relação à massa do cimento.

Por se tratar de partículas ultrafinas a distribuição granulométrica do cimento e do metacaulim não é possível determinar por meio de peneiras. Foi utilizado o método de granulometria a laser e blaine para determinar o comportamento granulométrico desses materiais. Essa caracterização pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18 – Distribuição das partículas do cimento CPV-ARI e do Metacaulim.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A baixa relação água/cimento é um dos fatores para obter elevada resistência à compressão. Para os traços do UHPC foram desenvolvidos tendo como princípio à redução da relação a/c para 0,20. O hiperplastificante Power Flow 4001 foi utilizado para obter uma baixa relação a/c e garantir à trabalhabilidade necessária da mistura.

3.1.2 Fibras

As fibras utilizadas são do tipo DRAMIX 3D 45/50 BL, suas propriedades estão dispostas na Tabela 2. Além disso, as fibras tinham comprimento de 50 mm e diâmetro de 1,05 mm. A superfície, a tipologia e a relação l/d devem ser consideradas na escolha da fibra a ser utilizada. A fibra DRAMIX 3D 45/50 BL possui ganchos nas extremidades e fator de forma (l/d) de 45.

Tabela 2 – Propriedades das fibras

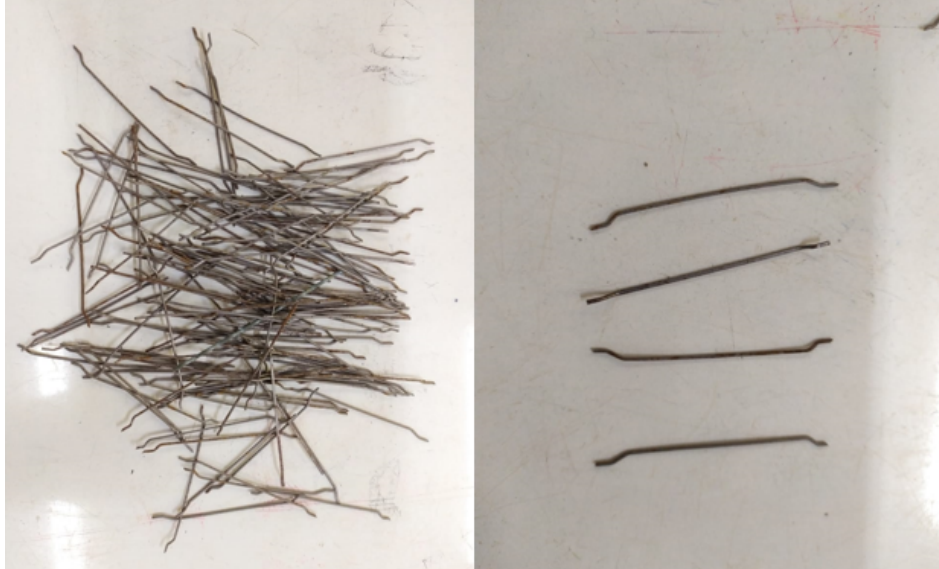
Tipologia	Resistência à tração (N/mm^2)	Módulo de Elasticidade (N/mm^2)	Tensão Última (%)
DRAMIX 3D 45/50 BL	1,115	200000	0,8

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Em decorrência da elevada resistência à compressão, as fibras são adicionadas para garantir maior ductilidade ao material e evitar uma ruptura frágil e explosiva. Em ensaios

de compressão uniaxial tornam à ruptura menos explosiva, em ensaios de flexão há ganho de resistência mecânica e, de certo modo, aumento da sua deformabilidade. A fibra utilizada pode ser vista na Figura 19.

Figura 19 – Fibras DRAMIX 3D 45/50 BL.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

4 METODOLOGIA

A principal contribuição do presente trabalho é a caracterização das propriedades físicas e mecânicas do UHPC. Inicialmente, foram definidos os traços para posteriormente realização dos ensaios de resistência à compressão, à tração direta, à tração indireta, módulo de elasticidade estático, módulo de elasticidade dinâmico e, por fim, resistência à tração por flexão. Para cada ensaio foram moldados três corpos de prova, exceto o módulo de elasticidade que totalizaram cinco corpos de prova para cada moldagem. Houve variação do teor de fibra adicionada respeitando à seguinte ordem: 0%, 1% e 2% em relação ao volume.

4.0.1 *Preparo do concreto*

A preparação dos corpos de prova do concreto convencional, utilizado no reforço estrutural, seguiu os requisitos normativos da NBR 5738 (ABNT, 2015b), para os ensaios de compressão axial foram utilizados os corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, os mesmos CPs foram utilizados no módulo de elasticidade estático do UHPC. Para o ensaio de tração na flexão foram obedecidos os parâmetros normativos da NBR 12142 (ABNT, 2010). Para o UHPC foram moldados duas tipologias geométricas, um cubo com 4 cm de aresta baseando-se no anexo D da NBR 15961-2 (ABNT, 2011a) e um prisma de 4x4x16 cm que, posteriormente, foi cortado em 4x4x4 cm.

O presente trabalho utilizou dois maquinários para realizar a mistura dos materiais. Uma betoneira com capacidade de 120 l que possui velocidade constante foi utilizada para moldagem de todos os corpos de prova, no que se refere ao concreto convencional. Devido à presença apenas de finos e baixa relação água/cimento, a betoneira não tem a força necessária para que o UHPC obtenha a trabalhabilidade e fluidez necessária para moldagem, desse modo, foi utilizada uma argamassadeira com capacidade de 6 l. O maquinário disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e utilizado nesta pesquisa, pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Maquinário disponível no LMCC.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Como foi utilizado o cimento Portland CP V – ARI, após 24 horas da moldagem dos corpos de prova todos foram desmoldados e colocados em procedimento de cura até o dia de rompimento, podendo ser, 7, 14 e 28 dias. A caracterização mecânica foi obtida nessas três idades para todos os corpos de prova testados na compressão. O módulo de elasticidade estático e dinâmico foram obtidos aos 28 dias de idade.

A literatura indica que a ordem de disposição dos materiais pode afetar negativamente na resistência à compressão. Wille *et al.* (2011a), por exemplo, propuseram uma metodologia de lançamento dos materiais para se obter um UHPC com resistência à compressão superior a 150 MPa em condições de cura padrão. Desse modo, o presente trabalho analisou o tempo de mistura, trabalhabilidade e o lançamento dos materiais. Na moldagem dos corpos de prova de UHPC e UHPFRC foram obdecidos os seguintes passos:

- 1° Foram adicionados todo o volume da areia e cimento Portland CP V-ARI, esses materiais foram misturados por 3 minutos em baixa velocidade;
- 2° Posteriormente, na mistura foi adicionado todo o volume de metacaulim, também foi misturado em baixa velocidade, mas por apenas 2 minutos;
- 3° Em seguida, foram adicionados na mistura 50% da água e 50% do hiperplastificante,

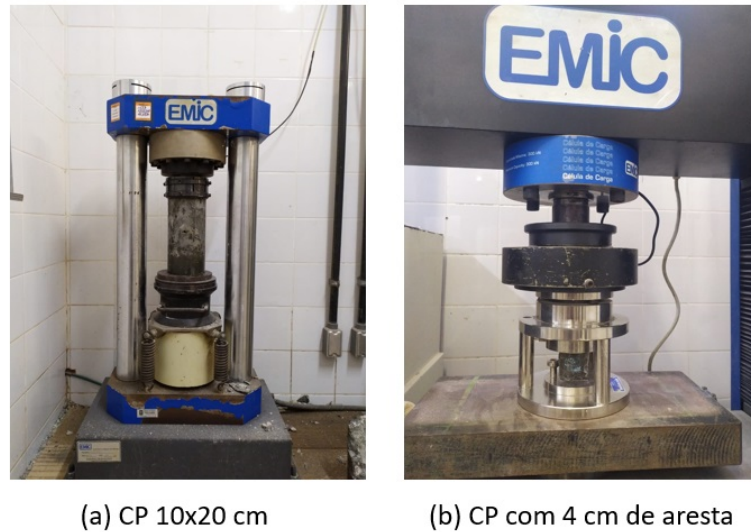
esse procedimento de mistura durou 1 minuto em baixa velocidade;

- 4° Foram adicionados na mistura os outros 50% da água e 50% do hiperplastificante, esse procedimento de mistura durou 2 minutos em baixa velocidade;
- 5° As fases anteriores somam 8 minutos de mistura. Foram moldados traços pilotos para determinar o tempo final da mistura. O tempo foi limitado em 15 minutos, nesse sentido, a mistura ficou 7 minutos em alta velocidade até atingir a trabalhabilidade necessária para moldagem;
- 6° Tratando-se de UHPFRC, as fibras adicionadas foram lançadas na argamassadeira aleatoriamente. Esse procedimento de mistura durou 1 minuto em alta velocidade. Portanto, o procedimento de mistura do UHPFRC totalizou 16 minutos.

4.0.2 Resistência à compressão axial

A NBR 5738 (ABNT, 2015b) regulamenta os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova. Para o ensaio de compressão axial, dos corpos de prova cilíndricos, foi utilizada a prensa EMIC PCE100C que possui capacidade de carga de 1 MN. Sabendo que a tensão efetiva é a força dividida pela área, foi necessário limitar a capacidade de carga em 0,9 MN para que a prensa não seja danificada, caso a força de ruptura seja superior a da máquina. Em virtude disso, para o UHPC reduziu-se o tamanho dos corpos de prova. Foram utilizados CPs cúbicos e prismáticos que normalmente são empregados na moldagem de argamassas. Segundo Capraro *et al.* (2019), os corpos de prova cúbicos podem apresentar resistência à compressão maior que os CPs cilíndricos. As tipologias dos ensaios podem ser visualizadas na Figura 21.

Figura 21 – Metodologia do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A resistência à compressão é obtida por meio da Eq. 4.1. Esse ensaio está em consonância com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (4.1)$$

onde:

- f_c é a resistência à compressão, expressa em MPa;
- F é a força máxima obtida no ensaio de compressão axial em Newtons;
- D é o diâmetro do corpo de prova em milímetros;

O adensamento do CP cilíndrico 10x20 cm foi realizado por meio de vibrador mecânico. Entretanto, o adensamento do CP em formato de cubo não foi realizado desta forma, nem com o adensamento manual com a haste proposta pela NBR 5738 (ABNT, 2015b). Uma solução seria a utilização de uma mesa vibratória, mas no LMCC não possui este equipamento. Logo, o adensamento foi realizado com golpes laterais ao molde com uma colher de pedreiro.

Na Figura 22 pode ser visto como foram moldados e retificados os CPs. Para garantir o paralelismo entre as faces dos corpos de prova, os CPs cilíndricos foram retificados e os cúbicos lixados para diminuir a irregularidade das faces.

Figura 22 – Moldagem e retificação dos CPs.



(a) Molde dos CPs

(b) Retificação

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

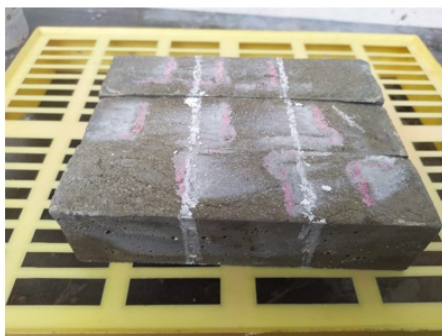
Inicialmente, foram moldados CPs cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, mas percebeu-se que as irregularidades entre as faces contribuía na concentração de tensões em determinada área, por consequência, a resistência à compressão era reduzida. Por isso, esses CPs foram utilizados, exclusivamente, nos ensaios de durabilidade do UHPC.

Devido à escassez de corpos de prova com 4 cm de aresta, optou-se em moldar CPs prismáticos de 4x4x16 cm que, posteriormente, foram cortados em 4x4x4 cm, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Moldagem, plano de corte e ruptura dos CPs.



(a) Moldagem dos CPs



(b) Plano de corte

(c) Ruptura dos CPs

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Notou-se que o concreto com fibras apresentou uma ruptura dúctil e avisada. Entretanto, o concreto sem fibras apresentava uma ruptura frágil e explosiva. A pré-tensão no ato do corte dos CPs não afetou negativamente a resistência à compressão do UHPC e UHPFRC.

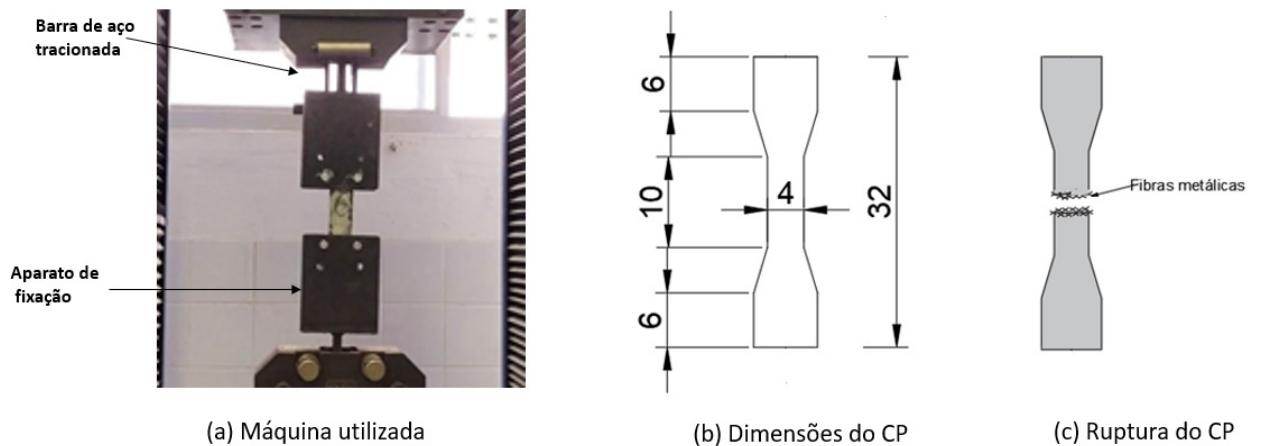
4.0.3 Resistência à tração

A resistência à tração foi obtida de forma indireta e direta. A NBR 7222 (ABNT, 2011b) foi utilizada para determinar a resistência à tração indireta via compressão diametral. No entanto, não há normatização sobre a resistência à tração direta do concreto, desse modo, foi necessário o desenvolvimento de um aparato para obter esse parâmetro. Segundo Mehta e Monteiro (2017), a resistência à tração do concreto é em torno de 10% da resistência à compressão axial. Nesse sentido, o UHPC desenvolvido apresenta elevada resistência à tração, logo essa propriedade mecânica não pode ser desprezada, como normalmente é realizado em estruturas de concreto convencional. A elevada resistência à tração, por exemplo, pode diminuir o peso próprio das estruturas e reduzir a taxa de aço necessária para absorver os efeitos da tração.

4.0.3.1 Resistência à tração direta

Para a realização do ensaio de tração direta (ainda sem normatização) foi desenvolvido um aparato, no qual permitiu a aplicação de tensões de tração em um corpo de prova em formato *dogbone*. O desenvolvimento da metodologia pode ser visualizada na Figura 24. O maquinário utilizado neste ensaio é o mesmo que o empregado em ensaio de tração em corpos de prova de aço. Entretanto, a velocidade do ensaio foi reduzida para análise do comportamento pós-pico. Na Figura 24 as medidas estão em centímetros.

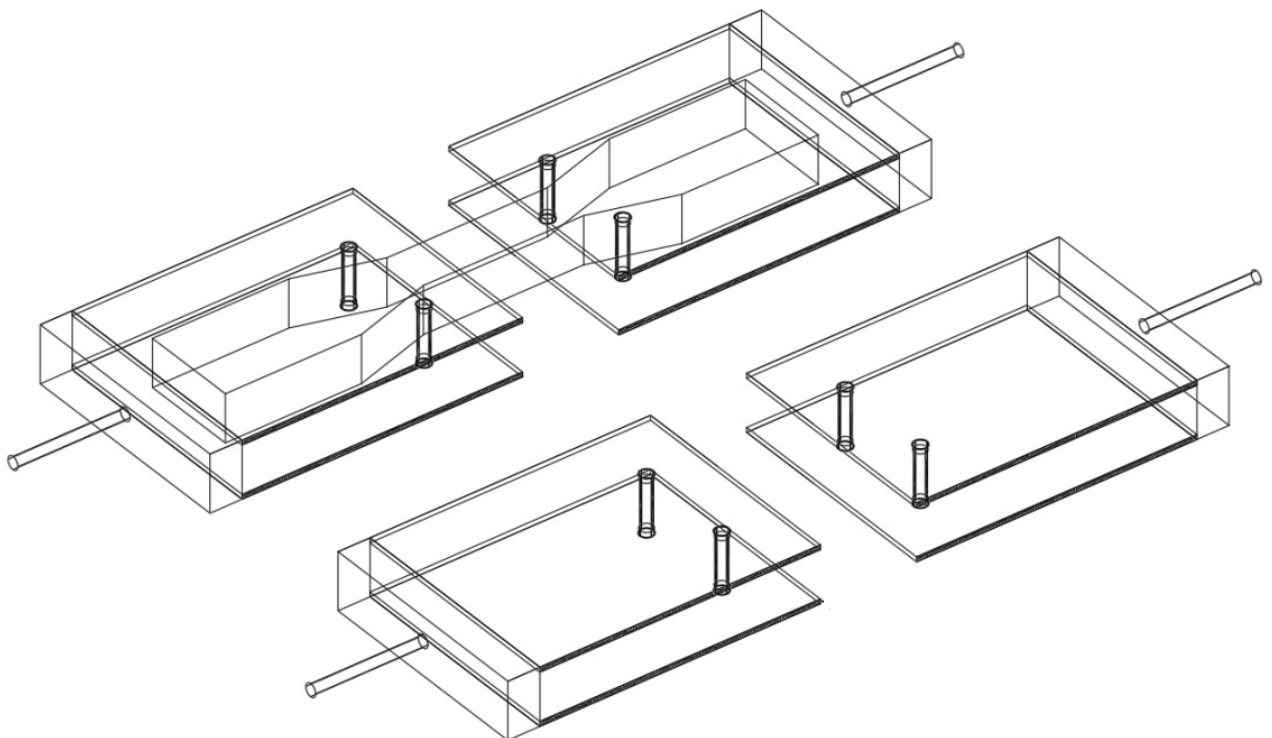
Figura 24 – Metodologia realizada no ensaio de resistência à tração direta.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

O aparato desenvolvido para a fixação do CP em formato *dogbone* na prensa pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Aparato desenvolvido para o ensaio de tração direta.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Conforme já foi dito, as fibras são adicionadas para aumentar a ductilidade do UHPC. Por meio desse ensaio que foi obtido com êxito a curva de dano dúctil por tração direta. O dano dúctil ocorre quando o limite da tensão plástica excede o seu limite. O material danificado (\tilde{E}) pode ser expresso pela Eq. 4.2, onde E é a matriz de rigidez do material não danificado e D é o

dano.

$$\tilde{E} = (1 - D)E \quad (4.2)$$

Foi realizado a caracterização pós falha do material com a obtenção da curva de evolução de dano para cada percentual de fibra empregado. O dano também pode ser definido em função da tensão aplicada como mostra a Eq. 4.3.

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (4.3)$$

onde:

- d_t é o dano na tração;
- σ_t é a tensão de tração;
- f_t é a força máxima de tração obtida no ensaio.

4.0.3.2 Resistência à tração indireta

O cálculo da resistência à tração por compressão diametral (Eq. 4.4) foi realizado conforme as orientações da NBR 7222 (ABNT, 2011b).

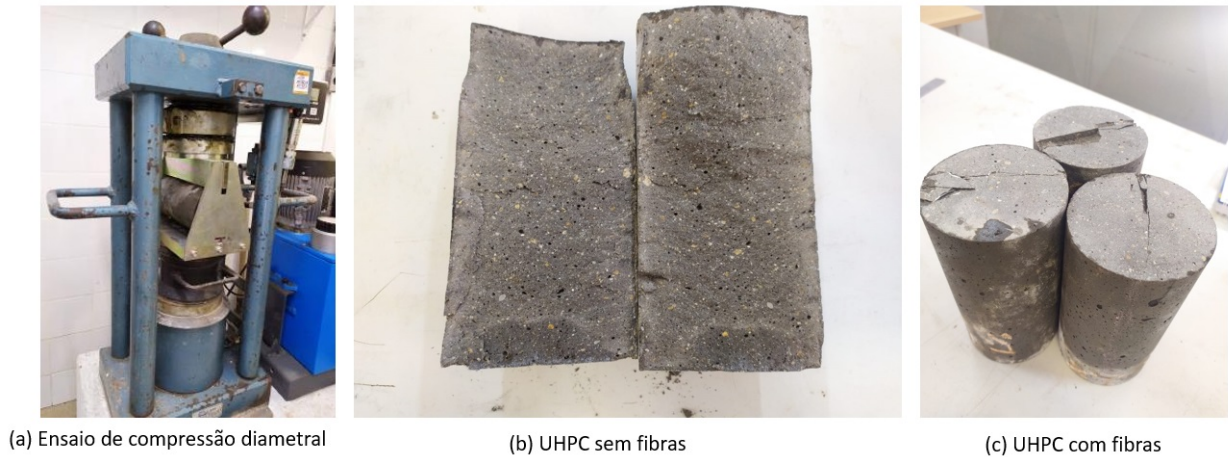
$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (4.4)$$

onde:

- $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa;
- F é a força máxima obtida no ensaio de tração em Newtons;
- d é o diâmetro do corpo de prova em milímetros;
- l é o comprimento do corpo de prova em milímetros.

Esse ensaio foi realizado para o UHPC e UHPFRC e, além disso, nos ensaios de durabilidade. A metodologia do ensaio pode ser visualizada na Figura 26.

Figura 26 – Ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Como pode ser visto na Figura 26, a adição de fibras fez com que os CPs com 1% e 2% de fibras não rompessem diametralmente caracterizando a alta ductilidade do material. Porém, no UHPC sem fibras há ruptura diametral do CP.

4.0.4 *Módulo de elasticidade*

A rigidez do concreto está diretamente relacionada com o módulo de elasticidade, normalmente a elevada resistência à compressão do UHPC tendem a elevar o módulo de elasticidade. Desse modo, o dano isotrópico tende a ser reduzido, nesse sentido, tornando a estrutura mais durável. Foram analisados o módulo estático de elasticidade e o módulo dinâmico.

4.0.4.1 *Módulo estático de elasticidade*

A determinação do módulo estático de elasticidade à compressão (E_{ci}) foi realizada conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017). Para determinação do E_{ci} foram utilizados para cada traço três corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. A força aplicada correspondeu a 30% da força média. Em cada CP foram cinco ciclos de carregamento/descarregamento e dois extensômetros são fixados no CP como mostra a Figura 27. Devido à elevada resistência à compressão do UHPC esse ensaio teve duração de 20 minutos para cada corpo de prova.

Figura 27 – Fases para obtenção do módulo estático de elasticidade.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

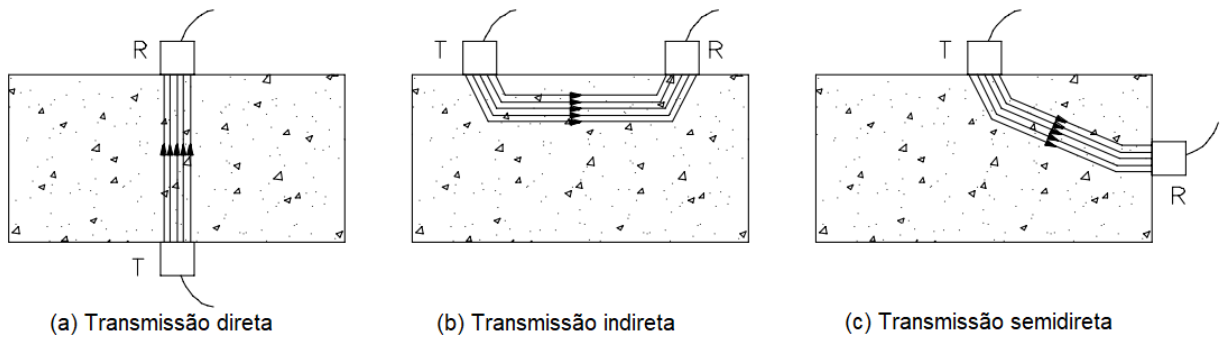
O procedimento de cura e moldagem dos CPs obdeceram os critérios normativos da NBR 5738 (ABNT, 2015b). A NBR 8522 (ABNT, 2017) recomenda que se utilize o mesmo formato e relação altura/diâmetro dos CPs utilizados na média da resistência à compressão e no módulo estático de elasticidade. Sabendo que a tensão é a força dividida pela área, a prensa EMIC PCE100C utilizada e disponível no LMCC não tem capacidade de romper os CPs de UHPC, devido à elevada força necessária. Nesse sentido, a média da resistência à compressão do UHPC foi obtida por meio de dois CPs cúbicos com 4 cm de aresta para cada traço.

4.0.4.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Segundo Mehta e Monteiro (2017), o módulo de elasticidade dinâmico pode ser uma resposta para estruturas sujeitas às vibrações constantes e terremotos. Nesse sentido, a ASTM C 597 (ASTM, 2016) e a NBR 15630 (ABNT, 2008) estabeleceram uma única expressão (Eq. 4.5) para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}). Sendo que o E_{cd} é obtido por meio da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

A NBR 8802 (ABNT, 2019) indica três formas possíveis de determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais. A Figura 28 ilustra os modos de transmissão direta, indireta e semidireta. A transmissão direta é a mais eficaz, pois é nesse modo que a máxima energia é transmitida. Portanto, é esse método que foi empregado no presente trabalho, os transdutores estavam em faces opostas.

Figura 28 – Metodologia de transmissão da onda ultrassônica.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Segundo Araujo *et al.* (2018), os pulsos ultrassônicos são eficazes na identificação do surgimento de microfissuras e, conseqüentemente, conseguem quantificar a degradação do material, seja por meio do dano localizado, difuso ou concentrado.

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado para o UPHC e UHPFRC em corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm e cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para cada traço foram analisados três CPs. Os procedimentos de cura e moldagem obedeceram os critérios normativos da NBR 5738 (ABNT, 2015b). Como mostra a Figura 29, inicialmente, foi realizado a calibração do aparelho PUNDIT LAB+ VC-972 com frequência de 54 kHz. Posteriormente, foi realizado o ensaio nos corpos de prova.

Figura 29 – Fases para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico.



(a) Calibração do aparato



(b) Ultrassom em CP cilíndrico de 10x20cm

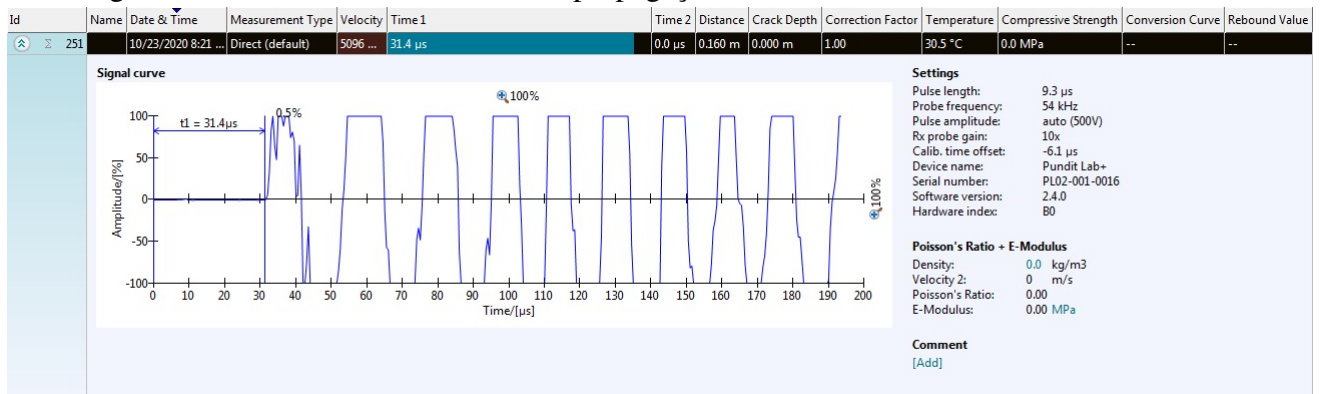


(c) Ultrassom em CP prismático de 4x4x16 cm

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A literatura indica que quanto menor for a distância entre as ondas mais durável é o material. Foi utilizado o *software* complementar ao PUNDIT LAB+ VC-972 para analisar o caminho percorrido pela onda ultrassônica. Como mostra a Figura 30, o *software* tem como resposta o tempo e velocidade de propagação. Foi necessário realizar a calibração previamente e informar a distância entre os transdutores. O comando de emissão do pulso passou a ser realizado, exclusivamente, no computador disponível no LMCC.

Figura 30 – Análise da velocidade de propagação da onda.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico (Eq. 4.5) foi realizado conforme as orientações da NBR 15630 (ABNT, 2008), ASTM C 597 (ASTM, 2016) e por meio de diversas expressões analíticas propostas na literatura.

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (4.5)$$

Sendo:

- E_d é o módulo de elasticidade dinâmico;
- ρ é a densidade de massa no estado endurecido do concreto, sendo expresso em kg/m^3 ;
- V é a velocidade de propagação de onda ultrassônica, expressa em metros por segundo (m/s);
- ν é o coeficiente de Poisson.

A velocidade de propagação de onda ultrassônica foi determinada por meio da NBR 8802 (ABNT, 2019).

$$V = \frac{L}{t} \quad (4.6)$$

Onde:

- V é a velocidade de propagação de onda ultrassônica, expressa em metros por segundo;
- L é a distância entre os transdutores, expressa em metros;
- t é o tempo decorrido entre a emissão e recepção da onda, expresso em segundos.

A ASTM C 597 (ASTM, 2016) e a NBR 8802 (ABNT, 2019) dispõem de recomendações sobre a frequência de ultrassom, a superfície, precisão da distância entre os transdutores e precisão nas medições de velocidade.

4.0.5 Resistência à tração na flexão

Foram utilizados corpos de prova prismáticos reduzido para o UHPC, eles possuíam 7,5x7,5x22,5 cm. Entretanto, a moldagem foi dividida em três etapas. A primeira etapa consistiu na moldagem parcial do CP (metade do CP) e, posteriormente, foi realizado o adensamento mecânico com vibrador. A segunda etapa consistiu no preenchimento da fôrma e, em seguida, o adensamento mecânico com vibrador. Por último, foi realizada a regularização da superfície. Em suma, a metodologia do ensaio e o maquinário disponível no LMCC podem ser visualizados na Figura 31.

Figura 31 – Instrumentação do ensaio de flexão.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Foram realizados ajustes na colocação dos *Linear Displacement Transducer Design* (LVDTs), a JSCE - SF4 (JSCE, 1984) dispõe de um mecanismo para colocação dos LVDTs. Porém, como pode ser visto na Figura 32 e Figura 33, os CPs de UHPC são menores, nesse sentido foram coladas no meio do vão uma chapa metálica para verificar o deslocamento. Essa adaptação não afetou os resultados.

Figura 32 – Marcação e colagem da chapa no terço médio



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 33 – Vista lateral da instrumentação e posicionamento dos LVDTs.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Os LVDTs ficaram posicionados no meio do vão da viga nas duas faces como mostra a Figura 32. Além da validação numérica foi calculada a resistência à tração na flexão por meio da Eq.4.7 que, por sua vez, está em consonância com a NBR 12142 (ABNT, 2010).

$$f_{ct,f} = \frac{Fl}{bd^2} \quad (4.7)$$

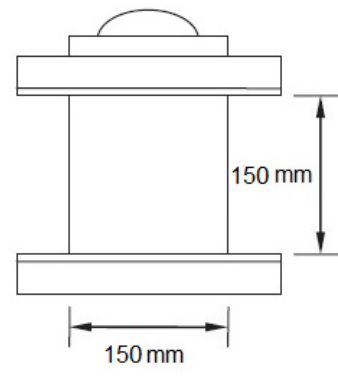
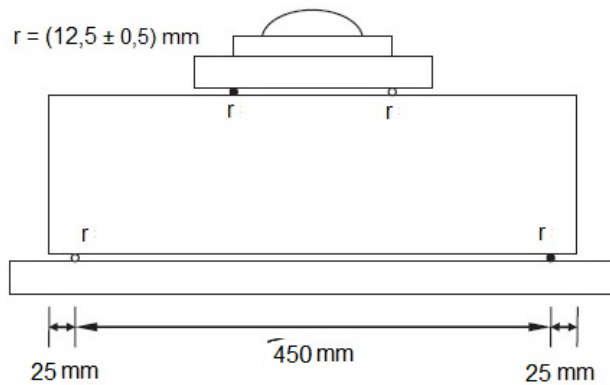
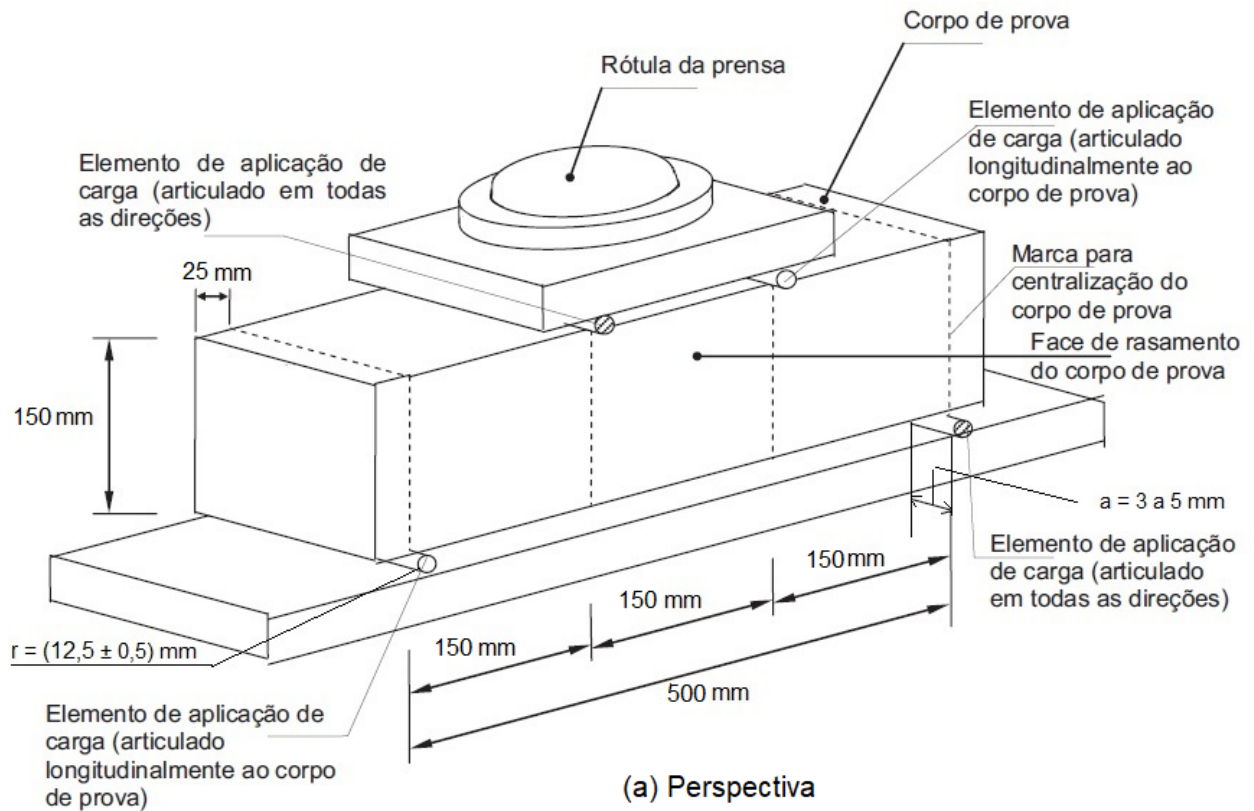
Onde:

- $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão, em MPa;
- F é a força máxima obtida nos ensaios, em Newtons;
- l é a distância entre os apoios, em mm;
- b é a largura do corpo de prova, em mm;
- d é a altura do corpo de prova, em mm;

4.0.6 Reforço estrutural via técnica Externally Bonded Reinforcement (EBR)

A primeira dificuldade encontrada foi a disponibilidade de fôrmas e maquinário para transportar e ensaiar as vigas em escala real. Nesse sentido, optou-se em utilizar as vigas em escala reduzida da NBR 12142 (ABNT, 2010). Comumente, as vigas dispõem de armadura longitudinal e transversal, por se tratar de um experimento laboratorial, as vigas em escala reduzida foram utilizadas a menor bitola disponível. Os corpos de prova prismáticos utilizados eram de 15x15x50 cm. No centro do vão foram instalados LVDTs para análise do deslocamento. A metodologia de ensaio pode ser visualizada na Figura 34.

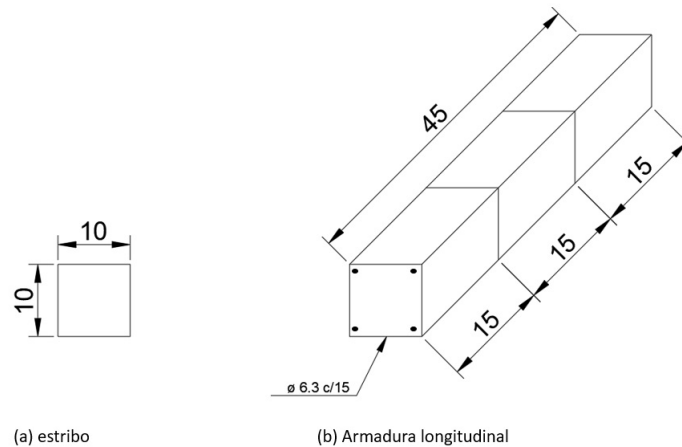
Figura 34 – Metodologia do ensaio de tração na flexão.



Fonte: adaptado da NBR 12142 (ABNT, 2010).

A utilização de fios poderia atrapalhar o adensamento do concreto e, além disso, dificultaria no processo de armação. As vigas possuíam 15 cm de largura, 15 cm de altura e 50 cm de comprimento. Na Figura 35 é possível visualizar o detalhamento da armadura, é válido salientar que a armadura transversal e longitudinal possuíam a mesma bitola (ϕ 6,3 mm). As dimensões da Figura 35 estão em centímetros.

Figura 35 – Detalhamento da armadura.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Para simular uma situação real, foi desenvolvido um traço de concreto convencional para representar uma estrutura com f_{ck} de 30 MPa e que necessitaria recuperar à sua capacidade portante. A técnica EBR foi utilizada por ser recomendada em situações em que a armadura esteja comprometida e cobrimento deficiente. Essa técnica é utilizada pois não interrompe a circulação de pessoas. Entretanto, há aumento da seção transversal que, por consequência, aumenta o peso próprio da estrutura. O traço do concreto convencional está disposto na Tabela 3.

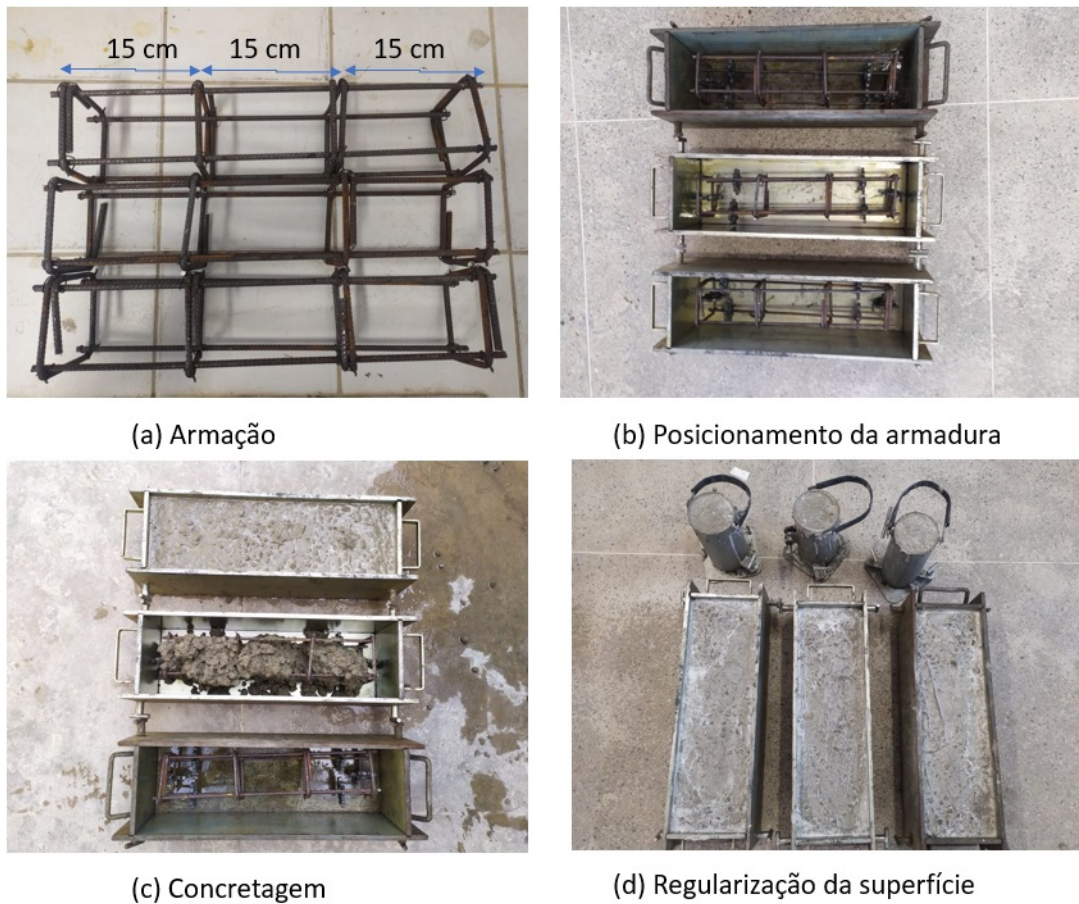
Tabela 3 – Traço em massa do concreto convencional

Materiais utilizados	Concreto convencional (kg)
Cimento CP V-ARI	1
Areia fina	1,14
Brita 12,5 mm	2,14
Água	0,41

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Os corpos de prova prismáticos foram reforçados com uma camada de 1 cm de UHPFRC-2% no banzo tracionado. O traço do UHPFRC com 2% de fibras está na Tabela 1. No total foram moldados e ensaiados seis CPs prismáticos de 15x15x50 cm. Sendo três CPs de referência e outros três reforçados. Como mostra a Figura 36, foi realizado a armação, posicionamento, concretagem e por fim a regularização da superfície. Na Figura 36-b percebe-se o uso de espaçadores para garantir um cobrimento de 2,5 cm em todas as faces da fôrma.

Figura 36 – Moldagem do concreto convencional.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Para análise da resistência à compressão do concreto convencional foram moldados três CPs cilíndricos, como mostra a Figura 36-d. A altura total de concreto convencional foi de 14 cm, pois 1 cm correspondeu a uma camada de UHPFRC com 2% de fibras metálicas, como mostra a Figura 37.

Figura 37 – Camada de 1 cm de UHPFRC como reforço.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Todos os ensaios de tração na flexão e resistência à compressão para caracterização do concreto convencional ocorreram aos 28 dias de idade.

4.0.7 Ensaios de durabilidade

Os ensaios de durabilidade foram realizados para justificar a utilização do UHPC e UHPFRC em ambientes de alta agressividade ambiental ou que exigem baixa porosidade. Os ensaios de absorção de água, absorção por capilaridade, índice de vazios e massa específica foram realizados em consonância com as normas brasileiras vigentes.

4.0.7.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica foram realizados conforme as prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2009). Por utilizar apenas materiais finos, do ponto de vista reológico, o UHPC e UHPFRC são considerados uma argamassa. Segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009) é necessário no mínimo duas amostras com volume superior a 150 cm^3 . No presente estudo, para cada traço foram ensaiadas três amostras de corpos de prova prismáticos de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$.

O primeiro passo consistiu na determinação da massa de cada amostra na sua condição seca. Seguindo as instruções da NBR 9778 (ABNT, 2009), as amostras ficaram dispostas em uma estufa a 100°C durante 72 horas, após o procedimento de secagem foi determinada a massa seca de cada amostra. O segundo passo correspondeu à determinação da massa na condição saturada e imersa em água. As amostras ficaram submersas em temperatura ambiente (25°C) por um período de 72 horas, como mostra a Figura 38.

Figura 38 – Determinação da massa saturada e imersa.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Após a saturação das amostras, como indicado na Figura 38, foi realizado o procedimento de fervura por um período de 5 horas, como pode ser visto na Figura 39. Conforme ocorria o processo de evaporação da água, mais água era lançada no recipiente para garantir a submersão de todos os corpos de prova.

Figura 39 – Procedimento de fervura.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Posteriormente, as etapas metodológicas experimentais, foi realizado o cálculo da absorção de água (Eq. 4.8) conforme as orientações da NBR 9778 (ABNT, 2009).

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} 100 \quad (4.8)$$

onde:

- M_{sat} é a massa da amostra saturada após o procedimento de fervura;
- M_s é a massa da amostra seca após a estufa;
- A é a absorção de água, expressa em porcentagem.

O índice de vazios foi calculado por meio da Eq. 4.9.

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} 100 \quad (4.9)$$

sendo:

- I_v é o índice de vazios, expresso em porcentagem;
- M_i é a massa da amostra saturada imersa após o procedimento de fervura.

A massa específica da amostra seca (ρ_s) foi determinada por meio da Eq. 4.10.

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (4.10)$$

Já a massa específica da amostra saturada após a fervura (ρ_{sat}), foi determinada por meio da Eq. 4.11.

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad (4.11)$$

A determinação da massa específica real (ρ_r) foi obtida por meio da Eq.4.12.

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad (4.12)$$

4.0.7.2 Absorção de água por capilaridade

Esse ensaio foi realizado conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012). Como mostra a Figura 40, inicialmente foi efetuada a secagem e identificação dos corpos de prova. No total foram moldados e ensaiados cinco CPs cilíndricos para cada traço. Os CPs tinham 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Para à obtenção da massa seca, as amostras foram dispostas em uma estufa a 100°C por um período de 24 horas.

Figura 40 – Procedimento de secagem e identificação das amostras.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Posteriormente, a determinação da massa seca, os corpos de provas foram colocados sobre uma lâmina de água (3 mm) para determinação da massa saturada, como mostra a Figura 41. A massa saturada foi determinada em 3, 6, 24, 48 e 72 horas.

Figura 41 – Determinação da massa saturada.



(a) Ensaio de capilaridade

(b) Determinação da massa

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Após a conclusão da determinação da massa saturada. O ensaio de compressão diametral é necessário para aferir a altura de percolação da água no material, esse ensaio foi realizado conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011b). Como as fibras impedem a ruptura diametral dos corpos de prova, somente no UHPC sem fibras foi possível verificar a altura que a água percolou, como pode ser visto na Figura 42.

Figura 42 – Ensaio de compressão diâmetral.



(a) Ensaio de compressão diâmetral



(b) Ruptura dos CPs

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A absorção de água por capilaridade foi obtida por meio da Eq.4.13.

$$C = \frac{M_{sat} - M_s}{s} \quad (4.13)$$

onde:

- C é a absorção de água por capilaridade, expressa em g/cm^2 ;
- M_{sat} é a massa saturada em função do tempo que varia de 3 horas até 72 horas, expressa em gramas;
- M_s é a massa seca após 24 horas na estufa ou até estabilização da massa, expressa em gramas;
- S é a área de seção transversal, em cm^2 .

5 APLICAÇÕES NUMÉRICAS

Nesse Capítulo são abordados por meio de modelos analíticos o comportamento não linear do UHPC variando os teores de fibras. Além disso, foram realizadas análises numéricas não-lineares no *software* ABAQUS utilizando o modelo constitutivo denominado *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). O CDP é baseado nos modelos propostos por Lubliner *et al.* (1989) e Lee e Fenves (1998). Nesse sentido, verifica-se que o CDP consegue representar, de forma satisfatória, o comportamento não-linear do UHPC e UHPFRC.

5.1 *Concrete damaged plasticity*

O *software* ABAQUS já tem implementado o modelo constitutivo denominado *Concrete damaged plasticity* (CDP), assim sendo, não foi realizada a implementação de nenhuma rotina (UMAT) para representar o comportamento não linear do concreto. O CDP é amplamente utilizado em análises numéricas de materiais quase frágeis, como o concreto. Além disso, no CDP o comportamento inelástico do concreto é oriundo da combinação do conceito elasticidade isotrópica danificada e tração isotrópica.

Esse modelo pode ser aplicado em materiais sujeitos a carregamento monotônico, cíclico, dinâmico ou até mesmo sob baixas pressões de confinamento. Comumente, o CDP é aplicado, principalmente, em concreto armado, mas pode ser aplicado em concreto simples ou com fibras. Para descrever o dano irreversível o CDP combina a plasticidade não associada com a elasticidade isotrópica danificada (escalar), por consequência, consegue representar o processo de fratura do material. Por fim, esse modelo exige que o comportamento elástico do material, em análise, seja isotrópico e linear. Essa Seção 5.1 tem como referência o próprio manual do ABAQUS.

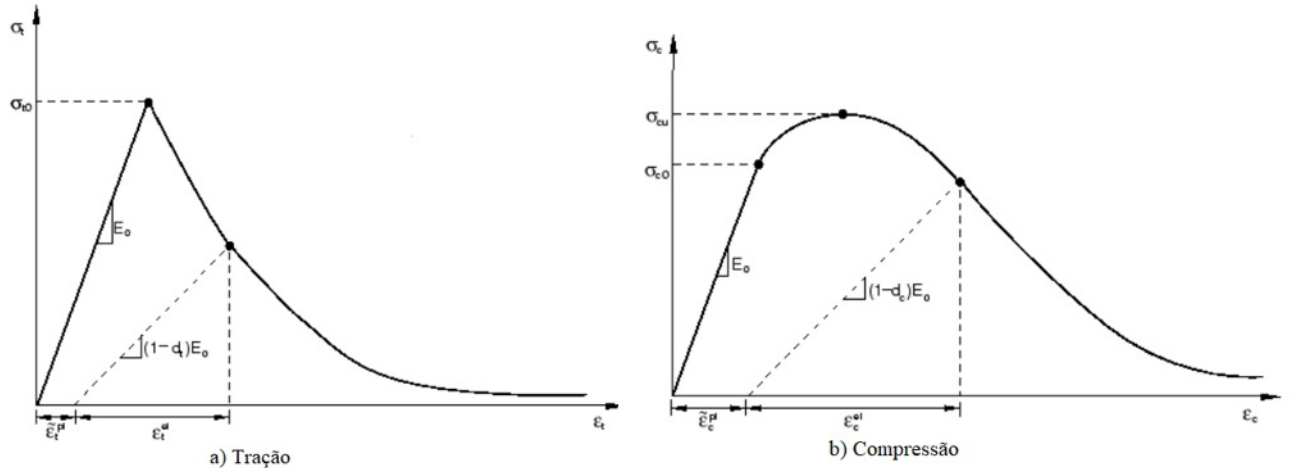
5.1.1 *Comportamento mecânico*

Para realização de uma análise mecânica o CDP utiliza o dano contínuo acoplado à plasticidade, para o concreto. O CDP assume dois mecanismos de falhas, o primeiro é ocasionado pelo surgimento de fissuras devido à tração, o segundo mecanismo é o esmagamento devido à compressão. Portanto, a superfície de falha é controlada por duas variáveis de endurecimento, $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ e $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$, que representam, respectivamente a falha por tração e compressão.

Como pode ser visto na Figura 43, o modelo constitutivo assume que o compor-

tamento na tração e compressão uniaxial do concreto é em função da plasticidade danificada. Embora seja uma metodologia simplificada, a combinação dos efeitos consegue captar, de forma satisfatória, as principais características do concreto.

Figura 43 – Resposta do concreto ao carregamento uniaxial.



Fonte: Manual do ABAQUS (2021).

Analisando a Figura 43, quando o concreto está sujeito à tensão de tração uniaxial, a relação tensão-deformação segue uma relação linear elástica até a tensão de ruptura (σ_{t0}). σ_{t0} representa o surgimento de microfissuras na matriz do concreto. Na compressão uniaxial, a resposta linear elástica corresponde ao início do processo de falha inicial (σ_{c0}). O regime plástico é representado por uma tensão última (σ_{cu}).

O ABAQUS converte automaticamente as curvas de tensão-deformação inelástica em tensão-deformação plástica por meio das Eqs. 5.1 e 5.2.

$$\sigma_t = \sigma_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl}, \dot{\tilde{\epsilon}}_t^{pl}, \theta, f_i) \quad (5.1)$$

$$\sigma_c = \sigma_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}, \dot{\tilde{\epsilon}}_c^{pl}, \theta, f_i) \quad (5.2)$$

σ_t e σ_c correspondem a tensão de tração e compressão, respectivamente. $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ e $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ são as deformações plásticas equivalentes de tração e compressão, respectivamente. Já $\dot{\tilde{\epsilon}}_t^{pl}$ e $\dot{\tilde{\epsilon}}_c^{pl}$ são as taxas de deformação plástica equivalente, θ é a temperatura e f_i são outras variáveis de campo pré-definidas.

Como mostra a Figura 43, o concreto é descarregado a qualquer ponto no ramo das deformações plásticas, a resposta no descarregamento é enfraquecida, pois a rigidez elástica do

material pode estar degradada. A área danificada (degradação da rigidez elástica) é representada por duas variáveis de dano (Eqs. 5.3 e 5.4), d_t e d_c , de tração e compressão, respectivamente. d_t e d_c são obtidas em função das deformações plásticas, temperatura e variáveis de campo.

$$d_t = d_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl}, \theta, f_i); 0 \leq d_t \leq 1 \quad (5.3)$$

$$d_c = d_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}, \theta, f_i); 0 \leq d_c \leq 1 \quad (5.4)$$

O material não está danificado quando o dano assume o valor de zero, quando se atinge o valor de um, o material está totalmente danificado, ou seja, perda total de resistir aos esforços. Assumindo que E_0 é a rigidez elástica inicial, sem danos, do material, as relações de tensão-deformação são obtidas pro meio das Eqs. 5.5 e 5.6.

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \quad (5.5)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad (5.6)$$

As tensões efetivas coesivas são definidas por meio das Eqs. 5.7 e 5.8.

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{1 - d_t} = E_0(\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \quad (5.7)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{1 - d_c} = E_0(\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad (5.8)$$

Nesse modelo as tensões efetivas coesivas limitam o tamanho da superfície de falha. Como foi dito, anteriormente, o CDP consegue representar diversos tipos de carregamento. Porém, somente o carregamento uniaxial foi apresentado, pois é o único que foi aplicado nessa pesquisa.

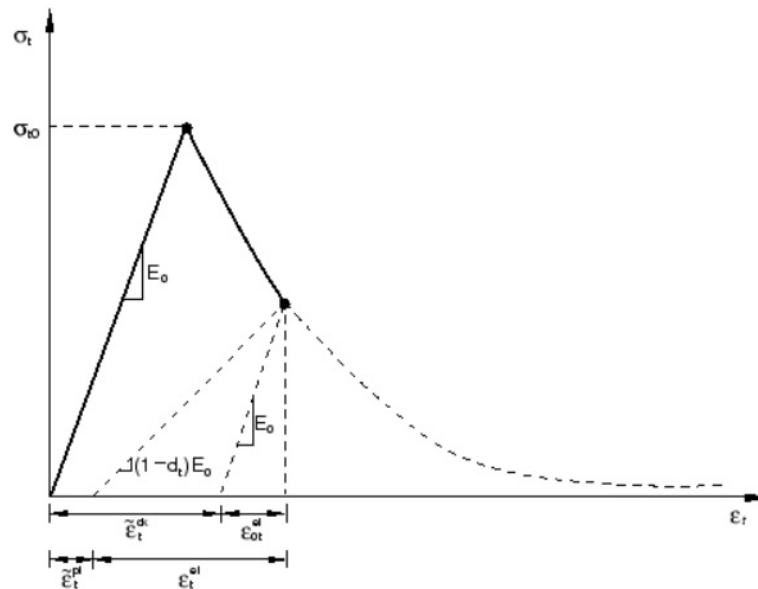
5.1.2 Falha na tração

O comportamento não linear da deformação é modelado por meio da tensão de endurecimento, pois dessa maneira é possível definir o concreto fissurado. Essa combinação de

fatores permite analisar a interação dos vergalhões de aço com o concreto. A falha do material na tração pode ser especificado por meio da relação tensão-deformação ou usando o critério de fissuração de energia de fratura. A relação tensão-deformação pós-falha pode ser visualizada na Figura 44.

A deformação de fissuração ($\tilde{\epsilon}_t^{ck}$) é obtida por meio da deformação total (ϵ_t) menos a deformação elástica ($\epsilon_0 t^{el}$), isso é, $\tilde{\epsilon}_t^{ck} = \epsilon_t - \epsilon_0 t^{el}$, onde $\epsilon_0 t^{el} = \sigma_t / E_0$. Por prevenção e para evitar problemas numéricos, o ABAQUS impõe um limite inferior para a tensão pós-falha, isso é, $\sigma_t \geq \sigma_{t0} / 100$, ou seja, a tensão pós-falha corresponde a um centésimo da tensão inicial.

Figura 44 – Demonstração da deformação de fissuração.



Fonte: Manual do ABAQUS (2021).

A falha na tração são dados em termos de deformação de fissuração (ϵ_t^{ck}). As curvas de dano-deformação de fissuração são dados de entrada no ABAQUS. Assim, o Abaqus transforma automaticamente as deformações de fissuração em deformação plástica, como mostra a Eq. 5.9.

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{1 - d_t} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (5.9)$$

Assim sendo, o ABAQUS sempre emite uma mensagem de erro quando os valores da deformação plástica forem negativos ou quando as deformações plásticas estiverem diminuindo com o aumento da deformação de fissuração. Esse erro, na maioria das vezes, está relacionado com curvas de dano que foram introduzidas erroneamente pelo usuário. Quando não se tem dados de tração, o ABAQUS permite a igualdade $\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck}$.

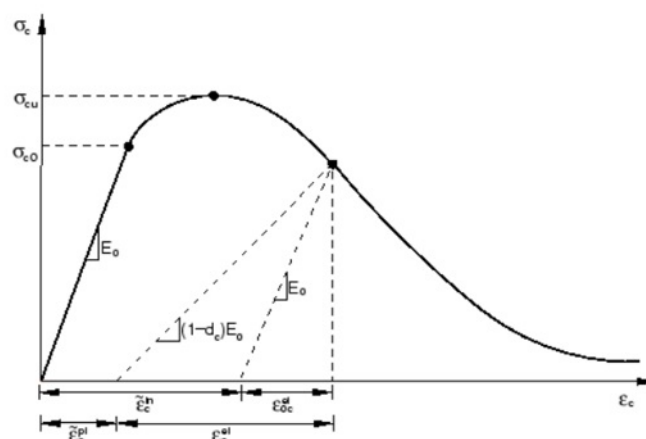
A escolha dos parâmetros de falha na tração é de extrema importância, pois, normalmente, uma maior resistência à falha na tração torna mais fácil à obtenção de uma resposta numérica. A baixa resistência à tração tende a tornar uma fissuração local em um comportamento instável, por consequência, o modelo numérico demanda mais tempo para convergir.

Conforme foi dito, anteriormente, o ABAQUS permite que o comportamento na tração pode ser realizado por meio das curvas de tensão-deformação ou energia de fratura. Os conceitos da energia de fratura estão explicados, posteriormente, na Seção 5.2.4.

5.1.3 Definindo o comportamento na compressão

No ABAQUS é permitido definir o comportamento não linear do concreto por meio de curvas de tensão-deformação, taxa de deformação, temperatura e outras variáveis de campo. Os dados da tensão de compressão são fornecidos como uma função tabular de deformação inelástica ($\tilde{\epsilon}_c^{in}$), normalmente, a curva é descrita utilizando o trecho de suavização da deformação. O dano também é descrito em função das deformações inelásticas, em vez de utilizar as deformações plásticas. Em síntese, a deformação inelástica é definida como $\tilde{\epsilon}_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_0 c^{el}$, assim sendo, a deformação inelástica é definida como a deformação total menos a deformação elástica. A deformação elástica é definida como $\epsilon_0 c^{el} = \sigma_c / E_0$, ou seja, é a parte que não está danificada. O comportamento compressivo pode ser visto na Figura 45.

Figura 45 – Definição da compressão inelástica ou esmagamento por compressão.



Fonte: Manual do ABAQUS (2021).

Na compressão o ABAQUS converte automaticamente as deformações inelásticas

em deformações plásticas por meio da Eq. 5.10.

$$\tilde{\epsilon}_c^{pl} = \tilde{\epsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{1 - d_c} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (5.10)$$

Quando o usuário entrar com valores inconsistentes, por exemplo, valores de deformações plásticas negativos ou decrescente com o aumento da deformação inelástica, o ABAQUS irá emitir uma mensagem de erro sem compilar o modelo numérico.

5.1.4 Definindo a recuperação do dano e rigidez

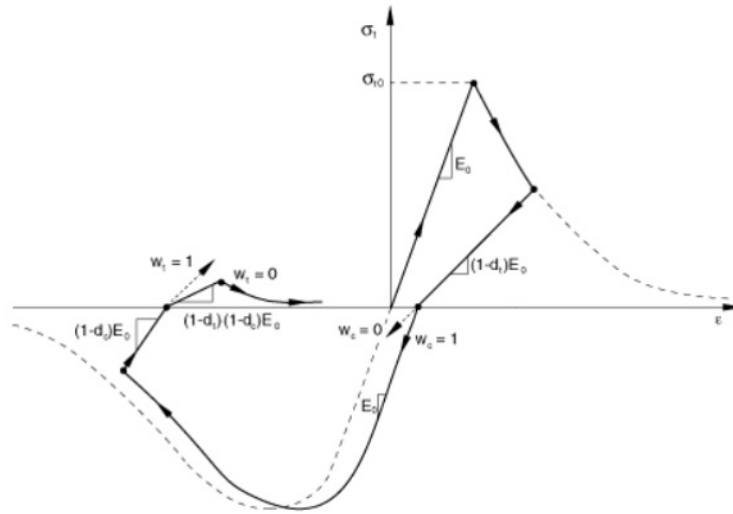
O dano na tração e na compressão podem ser especificados em forma tabular. No ABAQUS, quando d_t e d_c não for inserido, ou até mesmo, não for ativado, o modelo numérico se comporta como um modelo de plasticidade. Por consequência, têm-se $\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck}$ e $\tilde{\epsilon}_c^{pl} = \tilde{\epsilon}_c^{in}$. As variáveis de dano são interpoladas a partir dos dados tabulares especificados, a interpolação ocorre durante a análise em qualquer incremento. O ABAQUS considera uma análise incremental, pois adota como valor máximo de cada variável o maior valor do incremento anterior e o valor que corresponde ao estado atual.

Como já descrito, os valores de dano variam de 0 a 1. Porém, o dano excessivo, acima de 0,99, pode apresentar problemas de convergência. Logo, é aconselhável uma redução de rigidez menor que 99%. Quando se utiliza a energia de fratura para descrever a perda de rigidez, a variável de dano na tração pode ser linearizada em função do deslocamento da fissura.

5.1.4.1 Recuperação da rigidez

Em suma, a recuperação de rigidez é uma resposta mecânica do concreto quando sujeito a carregamento cíclico. O usuário pode especificar os fatores de recuperação da rigidez na compressão e na tração, w_c e w_t , respectivamente. Como pode ser visto, na Figura 46, a rigidez à compressão é recuperada no fechamento da fissura conforme a mudança de carregamento de tração para compressão. Entretanto, não há recuperação da rigidez à tração, pois a carga muda de compressão para tração, assim sendo, o processo de microfissuração que já havia se iniciado torna-se instável. De forma padrão, o ABAQUS adota $w_c = 1$ e $w_t = 0$ para representar esse comportamento.

Figura 46 – Demonstração da deformação de fissuração.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

5.1.5 Plasticidade do concreto

A plasticidade é incorporada no ABAQUS definindo o potencial de fluxo, a superfície de escoamento e os parâmetros de viscosidade. As tensões efetivas são definidas por meio da Eq. 5.11.

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (5.11)$$

O potencial de fluxo plástico e a superfície de escoamento fazem uso de dois invariantes do tensor de tensão efetiva, ou seja, a tensão de pressão hidrostática. Assim sendo, têm-se a Eq. 5.12.

$$\bar{p} = \frac{1}{3}(\bar{\sigma}) \quad (5.12)$$

A tensão efetiva e equivalente de Mises é obtida por meio da Eq. 5.13.

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}(\bar{S} : \bar{S})} \quad (5.13)$$

Sendo que \bar{S} é a tensão efetiva desviadora, definido por meio da Eq. 5.14.

$$\bar{S} = \bar{\sigma} + \bar{p}I \quad (5.14)$$

No ABAQUS é utilizado o modelo de plasticidade danificada, no concreto, assume-se o potencial de fluxo plástico não associado. Percebe-se na Eq. 5.15 que no modelo adotado o potencial de fluxo (G) é a função hiperbólica Drucker-Prager.

$$G = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \quad (5.15)$$

O potencial de fluxo é contínuo e regular, assim sendo, garante que a direção do fluxo seja obtida de forma única. A excentricidade padrão do potencial de fluxo é 0,1. Porém, percebe-se que o aumento da excentricidade aumenta-se a curvatura do potencial de fluxo, por consequência, conforme a pressão de confinamento diminuí o ângulo de dilatação aumenta mais rapidamente. O ABAQUS não recomenda valores menores que 0,1 para a excentricidade, pois há problemas de convergência.

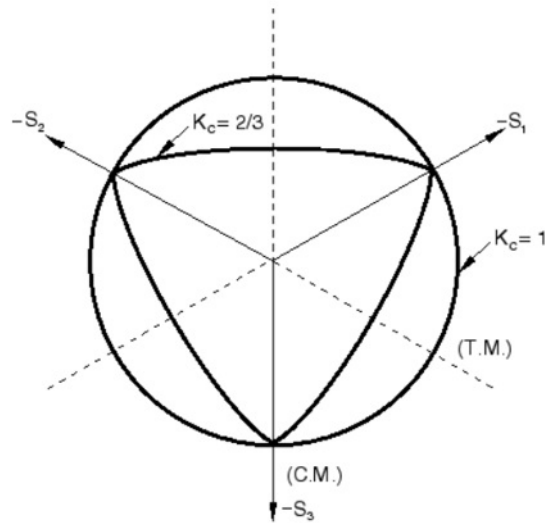
5.1.6 Função de escoamento

A função de escoamento (5.16) foi proposta por Lubliner *et al.* (1989) e alterada, posteriormente, por Lee e Fenves (1998). Lee e Fenves (1998) fizeram com que a função de escoamento representasse diferentes evoluções da resistência sob efeitos de tração e compressão. A superfície de escoamento é controlada por duas variáveis $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ e $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$.

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} = (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\varepsilon}^{pl})(\hat{\sigma}_{max}) - \gamma(\hat{\sigma}_{max})) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (5.16)$$

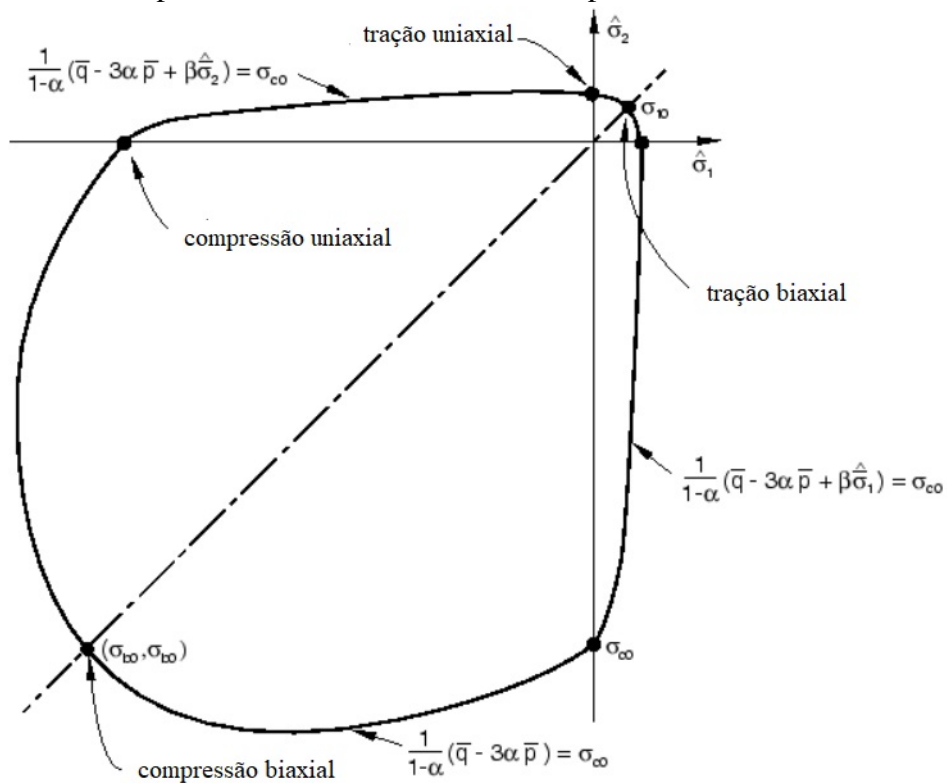
A representação gráfica da superfície de escoamento no plano desviador e da superfície de escoamento no estado plano de tensões podem ser visualizadas nas Figuras 47 e 48, respectivamente.

Figura 47 – Superfície de escoamento no plano desviador.



Fonte: Manual do ABAQUS (2021).

Figura 48 – Superfície de escoamento no estado plano de tensões.



Fonte: Manual do ABAQUS (2021).

Onde $\tilde{\sigma}_{max}$ é a tensão efetiva principal, σ_{b0}/σ_{c0} é a razão entre a tensão de escoamento de compressão biaxial inicial e a tensão de escoamento de compressão uniaxial inicial, normalmente, adota-se 1,16 para essa relação. K_c é a razão do segundo invariante de tensão no

meridiano de tração para aquele no meridiano de compressão. O valor padrão é $K_c = 2/3$, mas o ABAQUS permite a escolha de outro valor entre 0,5 a 1.

5.1.7 Regularização da viscosidade

Os modelos que consideram a degradação de rigidez, normalmente, levam a problemas de convergência do modelo. A regularização viscoplástica quando incorporada nas equações constitutivas conseguem mitigar os problemas de convergência. No CDP, o ABAQUS permite o uso da viscoplasticidade, pois desse modo as tensões ficam fora da superfície de escoamento. O ABAQUS utiliza a generalização da regularização Duvaut-Lions. Em síntese, o tensor da taxa de deformação viscoplástica é definido pela Eq. 5.17.

$$\dot{\varepsilon}_v^{pl} = \frac{1}{\mu}(\varepsilon^{pl} - \varepsilon_v^{pl}) \quad (5.17)$$

μ é o parâmetro de viscosidade que representa o tempo de relaxamento de viscosidade do sistema e ε^p é a deformação plástica. Da mesma forma, a variável da degradação de rigidez da viscosidade (d_v), para o sistema viscoplástico é definido pela Eq. 5.18.

$$\dot{d}_v^{pl} = \frac{1}{\mu}(d - d_v) \quad (5.18)$$

A relação tensão-deformação do modelo viscoplástico é obtida por meio da Eq. 5.19.

$$\sigma = (1 - d_v)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon_v^{pl}) \quad (5.19)$$

No ABAQUS a viscosidade padrão é nula, dessa forma nenhuma regularização viscoplástica é realizada. Porém, um valor pequeno quando adotado no ABAQUS pode ajudar na taxa de convergência do modelo, sem comprometer os resultados.

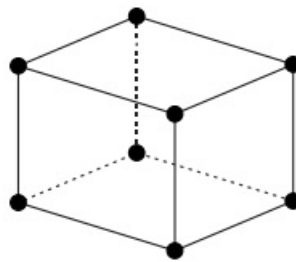
5.2 Modelagem da matriz do UHPC

Foi realizado um estudo paramétrico com os modelos propostos por Carreira e Chu (1985) e Saenz (1964) para representar o comportamento uniaxial do concreto sujeito à compressão axial. O comportamento na tração foi obtido por meio do deslocamento e da energia de fratura.

5.2.1 Elementos finitos

Conforme já foi dito, no presente estudo as fibras não foram modeladas com elementos finitos. Desse modo, o concreto e as fibras foram modeladas por um único elemento, C3D8R, que é sólido, tridimensional, possui oito nós e tem integração reduzida. Em cada nó desse elemento possui três graus de liberdade. Esse elemento finito está disponível na biblioteca do *software* ABAQUS e pode ser visto na Figura 49.

Figura 49 – Elemento finito C3D8R.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Nessa pesquisa, esse foi o único elemento utilizado nas modelagens numéricas. É válido salientar que a escolha desse elemento está em consonância com o estado da arte referente ao *Ultra-High Performance Concrete*.

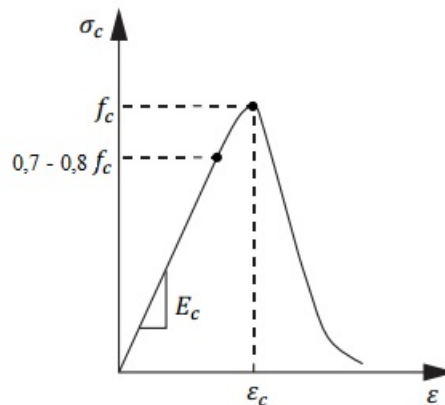
5.2.2 Comportamento uniaxial do concreto na tração e compressão

Quando a orientação e a distribuição das fibras são objetos de estudos, normalmente, os elementos finitos da matriz do concreto são diferentes dos elementos finitos das fibras. No presente trabalho, não foi considerado a distinção entre os materiais, logo a matriz do concreto e das fibras são modeladas com único tipo de elemento. Nesse sentido, na compressão, para validar as modelagens numéricas, o comportamento uniaxial da matriz do UHPC e UHPFRC foram definidos por meio da tensão de compressão (σ_c) e deformação total (ϵ), que foram obtidas previamente nos ensaios experimentais.

Segundo Krahl *et al.* (2018), o modelo proposto por Carreira e Chu (1985) é capaz de representar com eficiência o comportamento pré-pico do UHPC e UHPFRC na compressão uniaxial. Porém, conforme os autores, o comportamento pós-pico é melhor representado pelo modelo proposto por Mansur *et al.* (1999), pois leva em consideração a adição de fibras. No modelo de Mansur *et al.* (1999), o tipo de fibra, o volume, formato e o tipo de distribuição

podem afetar o comportamento da curva tensão-deformação no trecho pós-pico. Conforme Fehling *et al.* (2014), em consonância com o que foi descrito anteriormente, o trecho linear varia entre 70% e 80% da tensão máxima de compressão, como pode ser visto na Figura 50. Nas simulações numéricas realizadas o trecho linear correspondeu entre 70% a 80% da tensão máxima de compressão.

Figura 50 – Relação tensão-deformação na compressão uniaxial do UHPC e UHP-FRC.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Com base nos ensaios de compressão uniaxial percebeu-se que o modelo proposto por Carreira e Chu (1985), quando calibrado o parâmetro β , consegue representar de forma satisfatória o comportamento uniaxial. Desse modo, o modelo de Carreira e Chu (1985) é representado por meio das Eqs. 5.20 e 5.21.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{\beta \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^\beta} \right] \quad (5.20)$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_c}{\varepsilon_c E_c}} \quad (5.21)$$

Quanto maior for a resistência à compressão do UHPC mais frágil e explosiva será o processo de ruptura. A representação do trecho descendente torna-se necessário, pois a ruptura frágil e a queda brusca de tensão de compressão podem acarretar em problemas de convergência do modelo numérico. Isso ocorre, pois o *software* ABAQUS transforma a deformação total em deformação inelástica automaticamente. Assim, pode ocorrer de ter valores negativos ou em ordem decrescente, por consequência, o modelo não converge.

Nos estudos realizados por Nasrin e Ibrahim (2018) e Sinaei *et al.* (2012) foram utilizados o modelo proposto por Saenz (1964). O modelo de Saenz (1964) é uma generalização para representar a curva de tensão-deformação na compressão axial e é representado nas Eqs. 5.22 e 5.23.

$$\sigma_i = f_{ci} \frac{K_i \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right)}{1 + (K_i - 2) \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right) + \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right)^2} \quad (5.22)$$

$$K_i = E_0 \frac{\varepsilon_{ci}}{f_{ci}} \quad (5.23)$$

sendo,

- E_0 é o módulo de elasticidade inicial, que foi obtido experimentalmente;
- f_{ci} é a tensão de pico, obtida experimentalmente;
- ε_{ci} é a deformação de pico, que corresponde à tensão de pico;
- ε_{ui} é a deformação uniaxial equivalente.

Conforme foi dito, o modelo de Saenz (1964) consegue representar o comportamento do concreto no trecho ascendente e descendente, por isso é bastante utilizado na representação da curva de tensão-deformação. Entretanto, esse modelo apresenta uma falha quando o módulo de elasticidade secante for maior que a metade do módulo de elasticidade inicial. Assim, muitos estudos utilizaram o modelo de Saenz (1964) para representar o trecho ascendente e o modelo de Popovics (1973) para o trecho descendente. Dere e Koroglu (2017) utilizaram o modelo de Popovics (1973), esse modelo é descrito nas Eqs. 5.24 e 5.25.

$$\sigma_i = f_{ci} \frac{K_i \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right)}{1 + (K_i - 1) \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right)^{R_i}} \quad (5.24)$$

$$R_i = \frac{K_i}{(K_i - 1)} \quad (5.25)$$

A união dos modelos de Popovics (1973) e Saenz (1964) resultam no modelo que ficou conhecido como *popovics-saenz*. A combinação é expressa pelas Eqs. 5.26, 5.27 e 5.28.

$$\sigma_i = f_{ci} \frac{K_i \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right)}{1 + A_i \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right) + B_i \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right)^2 + C_i \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right)^3 + D_i \left(\frac{\varepsilon_{ui}}{\varepsilon_{ci}} \right)^{R_i}} \quad (5.26)$$

Trecho ascendente, se:

$$\left(\frac{\epsilon_{ui}}{\epsilon_{ci}}\right) \leq 1 : A_i = B_i = C_i = 0; D_i = (K_i - 1); \quad (5.27)$$

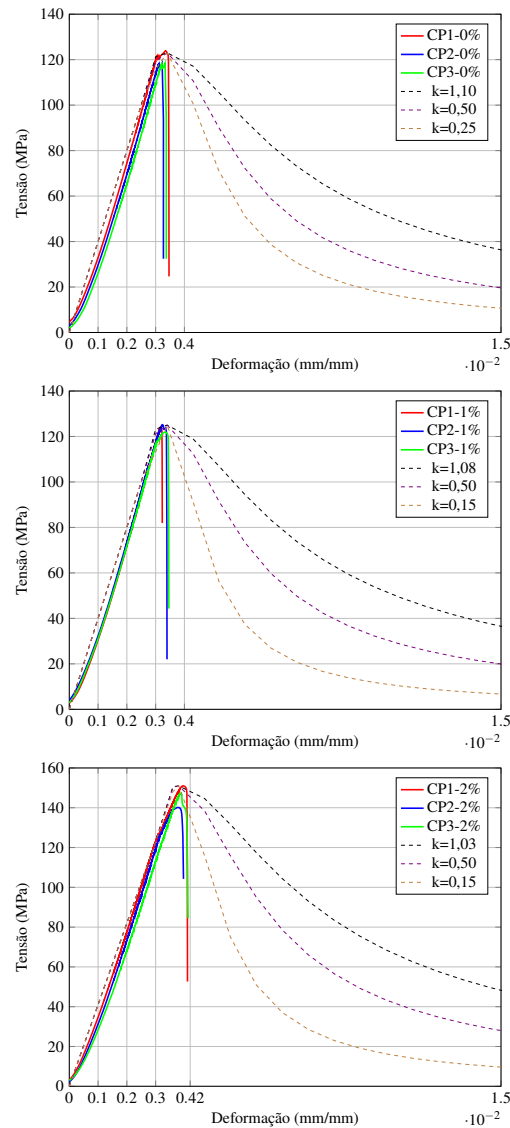
Trecho descendente, se:

$$\left(\frac{\epsilon_{ui}}{\epsilon_{ci}}\right) > 1 : A_i = C_i + K_i - 2; B_i = 1 - 2C_i; C_i = K_i \frac{(K_{\sigma i} - 1)}{(K_{\epsilon i} - 1)^2} - \frac{1}{K_i}; D_i = 0 \quad (5.28)$$

A curva *popovics-saenz* consegue representar, de forma adequada, o comportamento uniaxial do concreto simples. Porém, para o concreto armado, não consegue representar o efeito de *tension-stiffening*. Além disso, é necessário salientar que esse modelo consegue representar o comportamento na compressão e na tração.

Diante do exposto, foi realizada a calibração do parâmetro K do modelo proposto por Saenz (1964). As calibrações foram realizadas nas curvas de tensão-deformação do UHPC, UHPFRC-1% e UHPFRC-2% sujeitos à compressão axial na cura padrão e não foram realizadas para os demais corpos de prova, pois se torna um processo repetitivo. Nota-se na Figura 51 que nos ensaios experimentais não ocorreu a suavização do trecho pós-pico. Os valores de K foram adotados de modo que a curva tensão-deformação não apresentasse uma descontinuidade. O parâmetro K é obtido em função do módulo de elasticidade inicial, tensão e deformação de pico.

Figura 51 – Calibração do modelo de Saenz (1964).



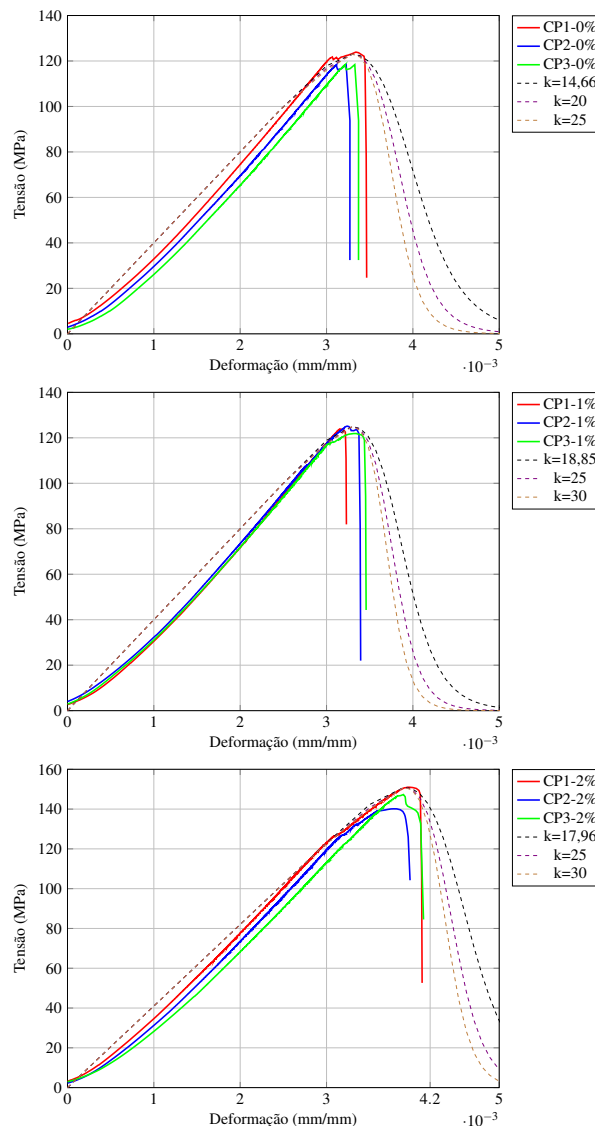
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Na Figura 51 a tensão de pico, na compressão, corresponde a média obtida na Tabela 5 e a deformação de pico foi determinada por meio das curvas apresentadas. O parâmetro K foi alterado para que o modelo proposto por Saenz (1964) representasse as curvas experimentais. Esse esforço se dá, pois a queda brusca de tensão pode ocasionar em problemas de convergência nas modelagens numéricas. Os maiores valores de K, abordados na Figura 51, correspondem aqueles obtidos na Eq. 5.23. Percebeu-se que a redução do parâmetro K tornou a curva do modelo de Saenz (1964) mais próxima do programa experimental e, além disso, apresentou uma redução de tensão menos brusca.

Diferentemente, do modelo proposto por Saenz (1964), no modelo recomendado por Carreira e Chu (1985) foi necessário majorar o parâmetro β para aproximar a curva do modelo

com o programa experimental desenvolvido. O menor valor do parâmetro β foi calculado por meio da Eq. 5.21. A calibração desse modelo pode ser visualizada na Figura 52. Assim como na calibração do modelo de Saenz (1964), esse estudo ocorreu com as curvas de tensão-deformação obtida nos ensaios de compressão uniaxial e, de modo que, foram utilizados os corpos de prova que estavam em cura padrão. Como é um processo iterativo e idêntico não é necessário à apresentação de todas as curvas.

Figura 52 – Calibração do modelo de Carreira e Chu (1985).



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Em síntese, é notório que o modelo apresentado por Carreira e Chu (1985) apresenta maior compatibilidade com o programa experimental. Desse modo, as curvas de tensão-deformação, para o comportamento uniaxial na compressão, do modelo de Carreira e Chu (1985) foram utilizadas nas simulações numéricas. É necessário salientar que esse modelo não

representou uma queda brusca de tensão, logo os problemas de convergência foram reduzidos.

5.2.3 Variáveis de dano

As variáveis de dano foram utilizadas para representar a degradação da rigidez do concreto. Diversos autores, Hashim *et al.* (2020), Krahl *et al.* (2018), Dere e Koroglu (2017) e Singh *et al.* (2017), utilizaram diferentes tipos de modelos para representar esse comportamento.

Por exemplo, Hashim *et al.* (2020) e Singh *et al.* (2017) utilizaram as Eqs. 5.29 e 5.30 para representar o dano na compressão (d_c) e na tração (d_t), respectivamente.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (5.29)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (5.30)$$

Porém, segundo Oliveira (2019) o uso desse método não resultou em uma mudança na análise numérica. Em síntese, no CDP o dano na compressão e na tração não eram ativados. Ainda de acordo com a autora, isso pode ter ocorrido, pois o material não estava no regime plástico ou não houve descarregamento na compressão e nem na tração.

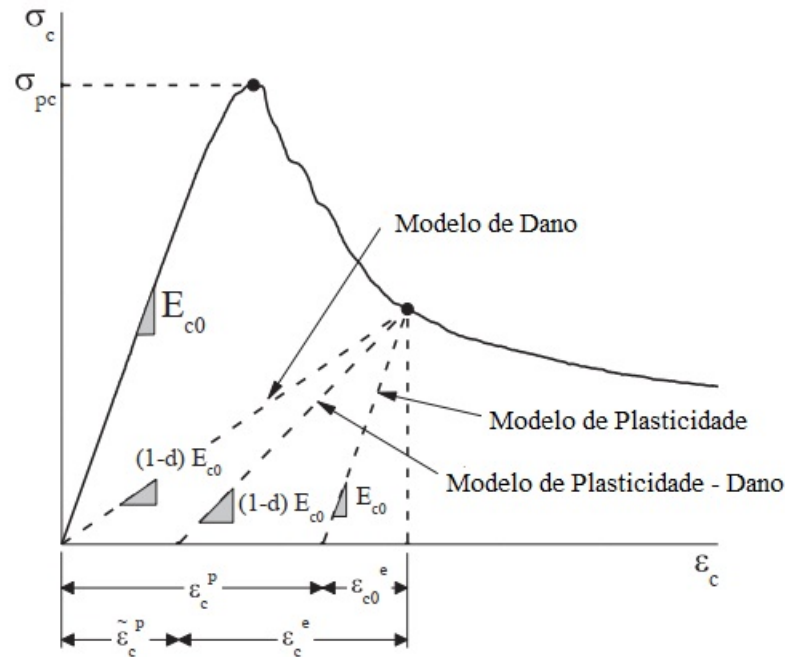
O dano na tração e na compressão pode ser obtido por meio da rigidez, como mostra as Eqs.5.31 e 5.32. Onde há uma relação direta entre o dano e a rigidez. O aumento do dano ocasiona na redução da rigidez, esse modelo foi utilizado no estudo de Krahl *et al.* (2018) e Makita e Brühwiler (2015).

$$d_c = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (5.31)$$

$$d_t = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (5.32)$$

Como mostra a Figura 53, o dano utilizado por Krahl *et al.* (2018) fica caracterizado pela degradação de rigidez sem deformações plásticas nos ciclos de carregamento e descarregamento.

Figura 53 – Modelo de Dano, Plasticidade e Plasticidade-Dano.



Fonte: adaptado de Krahl *et al.* (2018).

O modelo de dano na compressão e na tração proposto por Birtel e Mark (2006) consegue representar, como percebeu-se nesse trabalho, de maneira satisfatória o comportamento não linear do concreto. Esse modelo utiliza dois parâmetros, um para tração e outro para compressão, b_t e b_c , que por meio dos resultados experimentais foram fixados em 0,1 e 0,7, respectivamente. Entretanto, esses valores variam de 0 a 1. As deformações plásticas (ϵ_c^{pl}) foram obtidas experimentalmente. Dere e Koroglu (2017), Nasrin e Ibrahim (2018) e Zhu *et al.* (2020) utilizaram o modelo de Birtel e Mark (2006). O modelo de Birtel e Mark (2006) é descrito pelas Eqs. 5.33 e 5.34.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (5.33)$$

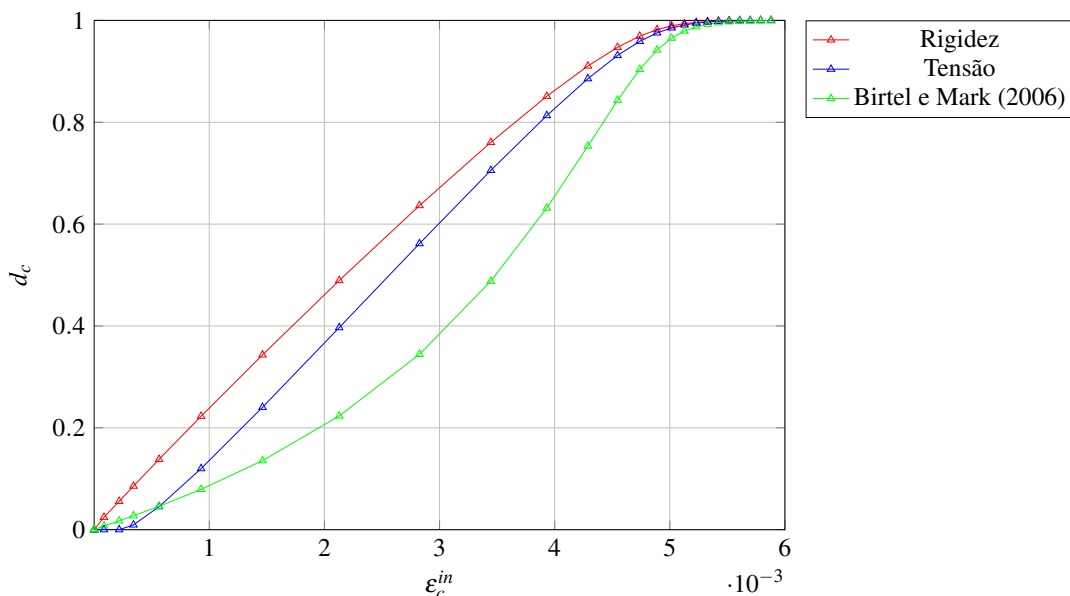
$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}} \quad (5.34)$$

No presente trabalho, esse modelo foi favorável na compilação e convergência dos modelos numéricos. Inicialmente, para o comportamento na tração, foi utilizado as curvas de tensão-deformação e, conseqüentemente, o dano na tração. Porém, percebeu-se que nas simulações numéricas, assim como no trabalho de Oliveira (2019) o dano não era ativado, desse

modo optou-se em descrever o comportamento não linear na tração por meio do deslocamento e energia de fratura. Assunto a ser discutido na Seção 5.2.4.

Após a calibração do modelo de Carreira e Chu (1985), abordado na Figura 52, foi realizada uma análise da evolução do dano na compressão (d_c), como pode ser visto na Figura 54. Como é um processo repetitivo optou-se em escolher apenas uma curva de tensão-deformação para mostrar as curvas de dano em função da deformação inelástica (ϵ_c^{in}). A curva de Carreira e Chu (1985) para o UHPFRC-2% foi utilizada para obtenção da tensão, deformação total (ϵ_c), plástica (ϵ_c^{pl}), inelástica e, além disso, do módulo de elasticidade e tensão de pico.

Figura 54 – Modelos de dano analisados.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

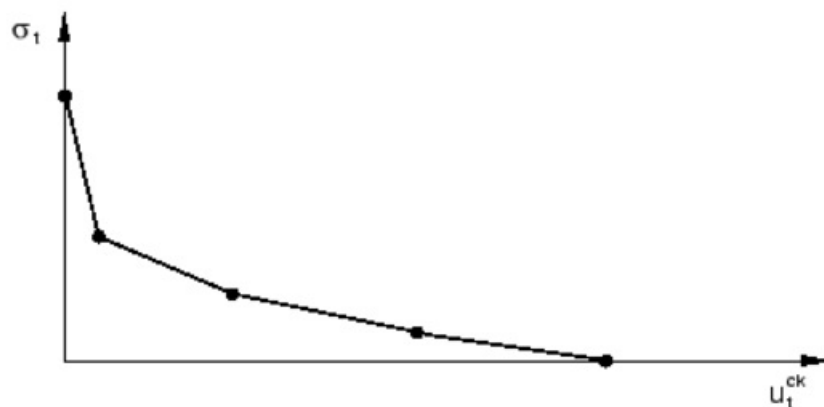
Percebe-se na Figura 54, que para uma mesma taxa de deformação inelástica, o dano na compressão tende à apresentar maiores valores no modelo que utiliza o módulo de elasticidade, tensão de pico e, por fim, Birtel e Mark (2006), respectivamente. Isso é interessante, pois notou-se que o d_c em função do E_{ci} causa problemas de convergência nos modelos numéricos e, por consequência, tornava a resposta numérica mais distante do programa experimental. A convergência era afetada na transformação da deformação total em inelástica no ABAQUS, assim o modelo não era compilado. Quando a queda de tensão era muito brusca o d_c que é obtido em função da tensão de pico apresentava valores negativos, desse modo os modelos não convergiam. Portanto, o modelo de Birtel e Mark (2006) foi o que mais se adequou a esse estudo.

5.2.4 Energia de Fratura

Devido o comportamento frágil do concreto na tração, muitos trabalhos optam em utilizar o modelo de energia de fratura proposto por Hillerborg *et al.* (1976). Nesse sentido, o comportamento do concreto passa a ser descrito em função da relação tensão-deslocamento invés de utilizar a relação tensão-deformação. Nesse trabalho, a resistência à compressão superou 150 MPa, logo uma característica desse material é uma falha frágil. A inativação do dano e os problemas de convergência da malha, nas primeiras modelagens, podem estar relacionados com as curvas de tensão-deformação utilizadas para representar o comportamento não linear na tração.

A mudança para a relação tensão-deslocamento diminuiu o tempo de processamento, a quantidade de incrementos e melhorou a convergência dos modelos numéricos. Assim, nesse modelo a energia de fissuração pode ser obtida por meio da tensão pós-pico que, por sua vez, é relacionada com uma função tabular do deslocamento da abertura de fissuras. A abordagem gráfica desse modelo pode ser visualizada na Figura 55.

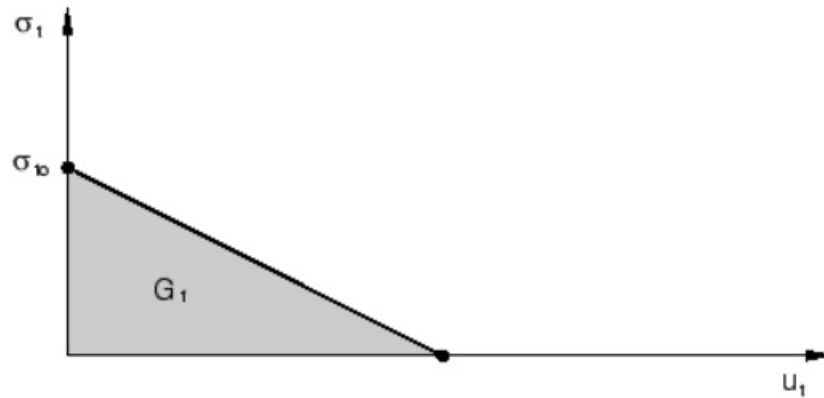
Figura 55 – Relação tensão-deslocamento.



Fonte: Manual do ABAQUS (2021).

Esse modelo ainda permite uma linearização da resistência após a fissuração, de modo que a energia de fratura (G_f) é especificada como uma das propriedades do material em análise. Torna-se necessário especificar a tensão de falha (σ_{t0}), pois essa tensão passa a ser uma função tabular da energia de fratura. Aqui optou-se em utilizar a σ_{t0} obtida nos ensaios de tração direta, pois notou-se que o aumento da tensão de pico ocasiona em um aumento da força nas curvas de força-deslocamento das modelagens numéricas. A abordagem gráfica desse modelo pode ser visualizada na Figura 56.

Figura 56 – Relação tensão-energia de fratura.



Fonte: Manual do ABAQUS (2021).

Nesse caso, o deslocamento é obtido em função da energia de fratura e tensão de pico na tração (Eq. 5.35).

$$U_{t0} = \frac{2G_f}{\sigma_{t0}} \quad (5.35)$$

A energia de fratura, no presente trabalho, foi obtida por meio da Eq.5.36 proposta pelo CEB FIP 2010 (BÉTON, 2010b).

$$G_F = 0,073 f_{cm}^{0,18} \quad (5.36)$$

5.2.5 Parâmetros complementares utilizados no CDP

No modelo constitutivo escolhido para realizar as análises numéricas, além do comportamento uniaxial na compressão e na tração, o CDP necessita de outras variáveis para representar o critério de plastificação, potencial plástico e à regularização viscoplástica. Os parâmetros utilizados nessa pesquisa são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados para representar a matriz do concreto.

Parâmetros	Valores	Descrição
$\psi^{(o)}$	54/definir	Ângulo de dilatação
e	0,1	Excentricidade
$\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$	1,06	Relação entre as tensões de escoamentos iniciais de compressão biaxial e uniaxial
K_c	0,667	Relação entre o segundo invariante de tensão no meridiano de compressão e tração
μ	0,00001/definir	Viscosidade
ν	0,20	Coefficiente de Poisson
E	41000	Módulo de elasticidade, expresso em MPa
G_F	0,1740/definir	Energia de fratura, expresso em N/mm

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

O estado de arte contemporâneo apresenta divergências sobre os valores ideais para representar a matriz do UHPC e UHPFRC. Os estudos realizados por Genikomsou e Polak (2015), Hashim *et al.* (2020), Krahl *et al.* (2018), Nasrin e Ibrahim (2018), Solhmirzaei e Kodur (2017) e Zhu *et al.* (2020) serviram de base para a tomada de decisão na escolha dos valores de cada parâmetro do CDP. Percebeu-se que o aumento da viscosidade aumentava a força necessária para levar a ruína do material.

5.3 Validação dos modelos numéricos

Na Seção 5.2 foram descritos os modelos numéricos utilizados, o comportamento uniaxial na compressão e na tração, as variáveis de dano, energia de fratura e, por fim, os parâmetros complementares utilizados no CDP. Entretanto, as condições específicas de cada modelagem não foram abordadas.

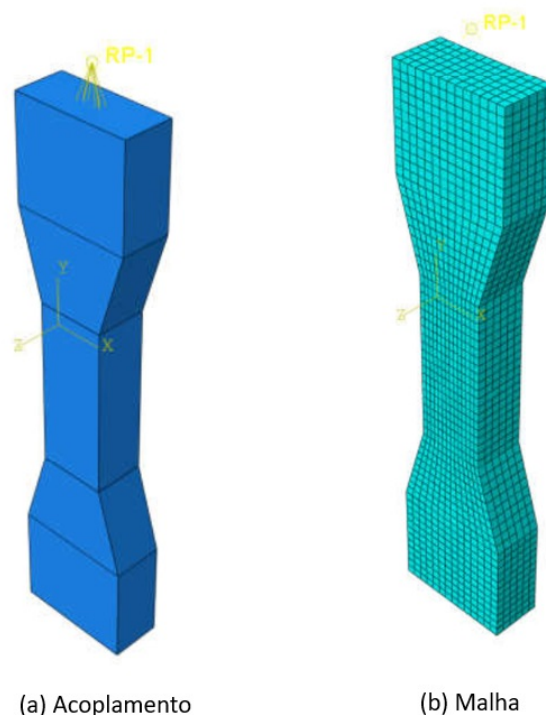
Nessa seção buscou-se apresentar de maneira detalhada as condições de contorno, carregamento e as malhas dos elementos finitos utilizadas para validação dos modelos numéricos dos ensaios de tração uniaxial e flexão de quatro pontos.

5.3.1 Simulação numérica do ensaio de tração uniaxial

Conforme abordado na Seção 6.2.2, o UHPC sem fibras foi testado mecanicamente, mas por inconsistência explicadas na mesma seção esses resultados foram descartados. Por consequência, os corpos de prova do UHPC sem fibras não foram modelados. Dessa forma, foi realizada as modelagens do UHPFRC-1% e UHPFRC-2%.

Buscou-se obter as mesmas condições de contorno e de carregamento no programa experimental exposto na Seção 4.0.3.1. Conforme abordado na Figura 57, o *pullout* do CP em formato *dogbone* é caracterizado na modelagem numérica por meio da interação *coupling*. O *coupling* está interligando um ponto de referência (RP) com as faces que estão restringidas pelos parafusos. No RP todas as restrições de deslocamento e rotação foram impostas, exceto, a restrição ao deslocamento vertical que foi permitida. Todas as regiões sujeitas ao *coupling* estavam com as mesmas restrições. Na base do CP foram impostas todas as restrições de deslocamentos e rotação.

Figura 57 – Modelo físico do ensaio de tração direta.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Inicialmente, no presente estudo, foi aplicada uma força no RP na direção do eixo y , porém notou-se que a resposta numérica divergia do programa experimental. Nesse sentido, optou-se em aplicar um deslocamento prescrito no RP (Figura 57b), essa mudança ocasionou na convergência do modelo.

No que se refere à malha, como mostra a Figura 57b, o refinamento ocorreu tendo como base a convergência do modelo. Foi notado que a mudança dos parâmetros complementares abordados na Seção 5.2.5 podem tornar a resposta numérica mais distante dos resultados numéricos e, além disso, o refinamento da malha era impossibilitado.

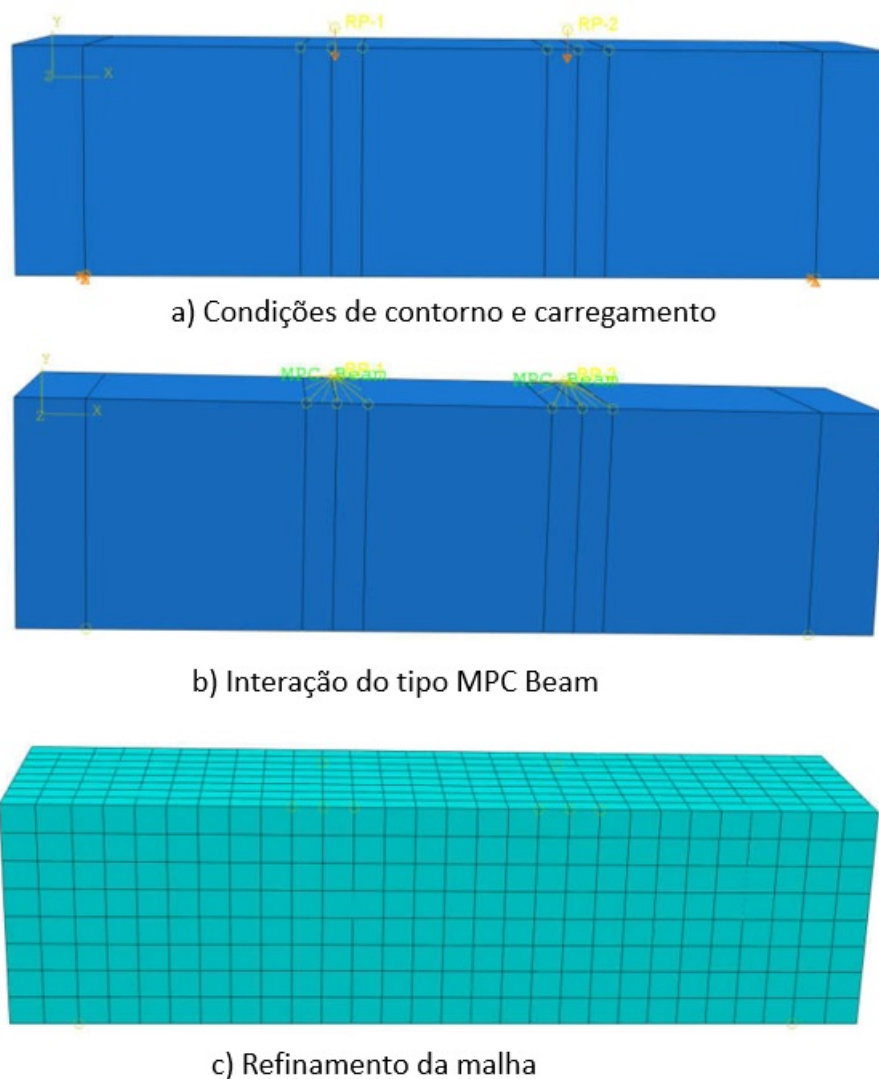
5.3.2 Simulação numérica do ensaio de flexão com quatro pontos

Devido à baixa ductilidade do UHPC sem fibras, o mesmo não foi modelado, pois o trecho não linear é inexistente. Assim sendo, a análise numérica foi realizada para o UHPFRC-1% e UHPFRC-2% .

As modelagens foram realizadas com o intuito de obter as mesmas condições de carregamento e de contorno apresentadas no programa experimental, disposto na Seção 4.0.5. Como mostra a Figura 58, foram aplicados dois carregamento no terço médio da viga curta

e as interações impostas foram do tipo MPC Beam, pois a literatura indica que esse modelo consegue transferir de maneira igualitária os esforços. Além disso, na lateral esquerda foi imposto um apoio fixo e na direita um apoio móvel. O refinamento da malha, teve como critério, a convergência do modelo.

Figura 58 – Modelo físico do ensaio de tração na flexão.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Nos pontos de referências foram impostos os deslocamentos prescritos, o RP estava livre na direção y , a mesma direção da aplicação do deslocamento. Todas as regiões sujeitas à interação do tipo MPC Beam estavam com as mesmas restrições dos RPs.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção estão apresentados os resultados de caracterização física, mecânica e, bem como, os resultados das análises numéricas obtidos ao longo da pesquisa. A caracterização mecânica do UHPC, UHPFRC-1% e UHPFRC-2% serviram de base para análise e modelagem numérica via elementos finitos.

6.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das principais propriedades mecânicas do concreto. Nesse sentido, essa foi a primeira propriedade analisada nessa pesquisa. Na verificação do aumento da resistência optou-se em submeter os corpos de prova em cura padrão e térmica. Os maiores valores foram obtidos na condição de cura padrão, tal característica é importante, pois quando confeccionados elementos maiores, não será necessário nenhum tratamento térmico na fabricação, assim sendo, há ganhos econômicos. Na literatura muitos estudos utilizam a cura térmica como um dos meios para aumentar a resistência à compressão, nesse sentido, o presente estudo apresenta esse diferencial.

6.1.1 UHPC em cura padrão

Na Tabela 5 estão dispostos os resultados referentes a resistência à compressão dos corpos de prova com 0%, 1% e 2%. Foi analisado a evolução da resistência à compressão em três idades diferentes, sendo a resistência de projeto aos 28 dias de idade.

Um dos grandes desafios dessa pesquisa foi alcançado e é apresentado nesta seção, que é a obtenção de um concreto com resistência à compressão superior a 150 MPa em cura padrão. É considerado UHPC o concreto que apresenta resistência à compressão superior a 150 MPa (XU *et al.*, 2019). Porém há divergências, algumas pesquisas indicam que o UHPC apresenta resistência à compressão superior a 120 MPa (HUANG *et al.*, 2017). Há consenso sobre os materiais constituintes, o UHPC utiliza apenas materiais finos, possuem elevada durabilidade, baixo índice de vazios e bom desempenho mecânico.

Tabela 5 – Resistência à compressão do UHPC com 0%, 1% e 2% de fibras

Identificação	Teor de fibras (%)	f_c (MPa)	Idade (dias)
0-CP1	0	121,1	7
0-CP2	0	123,9	7
0-CP3	0	118,4	7
Média	-	121,13	-
0-CP4	0	123,6	14
0-CP5	0	122,6	14
0-CP6	0	120,3	14
Média	-	122,16	-
0-CP7	0	137,8	28
0-CP8	0	123,5	28
0-CP9	0	109,5	28
Média	-	123,60	-
1-CP1	1	85,9	7
1-CP2	1	132,3	7
1-CP3	1	113,0	7
Média	-	110,40	-
1-CP4	1	114,9	14
1-CP5	1	109,5	14
1-CP6	1	114,0	14
Média	-	112,80	-
1-CP7	1	123,0	28
1-CP8	1	129,5	28
1-CP9	1	136,0	28
Média	-	129,50	-
2-CP1	2	108,0	7
2-CP2	2	122,6	7
2-CP3	2	108,7	7
Média	-	113,10	-
2-CP4	2	135,6	14
2-CP5	2	101,2	14
2-CP6	2	119,9	14
Média	-	120,66	-
2-CP7	2	151,0	28
2-CP8	2	140,1	28
2-CP9	2	147,3	28
Média	-	146,13	-

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

É preciso salientar que os dados dispostos na Tabela 5 é a tensão de ruptura que cada corpo de prova resistiu. Torna-se necessário discorrer sobre isso, pois para o dimensionamento dessas estruturas especiais devem ser considerado a resistência à compressão de cálculo. Se fosse realizada essa correção, outros corpos de prova iriam ultrapassar os 150 MPa.

Segundo Fehling *et al.* (2014), a resistência à compressão de cálculo pode ser obtida

em função da Eq. 6.1.

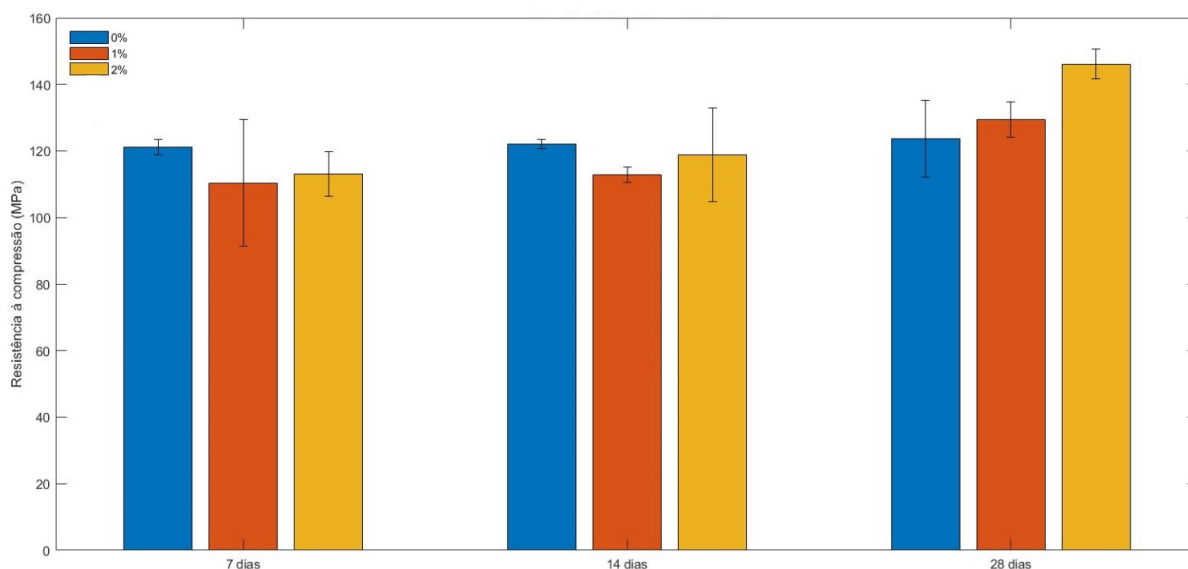
$$f_c = f_{ck} + 8 \quad (6.1)$$

onde:

- f_c é a resistência à compressão, expressa em MPa;
- f_{ck} é a resistência à compressão característica, expressa em MPa;

De forma gráfica a resistência à compressão do UHPC-0%, UHPFRC-1% e UHPFRC-2% pode ser visualizada na Figura 59.

Figura 59 – Resistência à compressão em cura padrão.

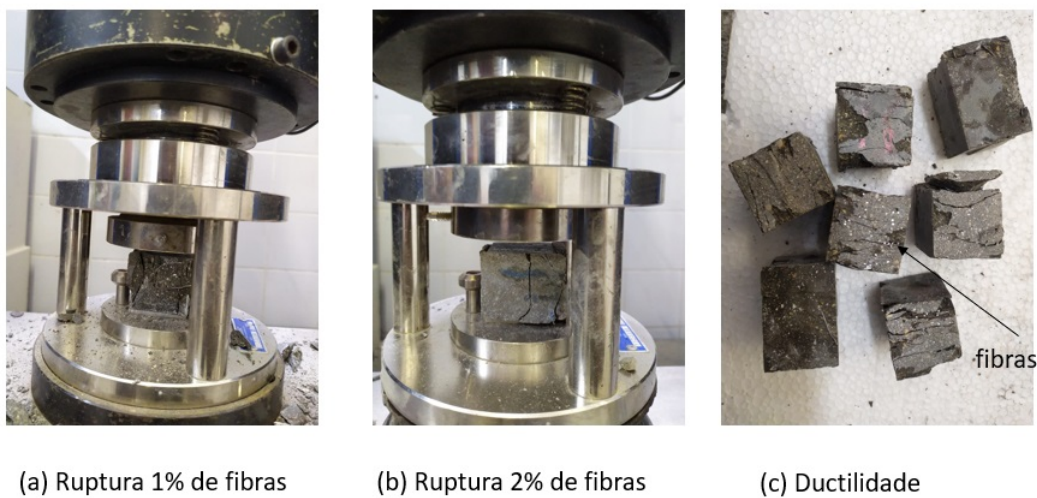


Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Figura 59, o UHPFRC-2% apresentou a maior média de resistência à compressão. O UHPFRC-2% apresentou uma resistência média à compressão superior na ordem de 15,5% e 11,5% em relação ao UHPC-0% e UHPFRC-1%, respectivamente.

Sabe-se que quanto maior for a resistência à compressão, menor será a ductilidade do concreto. Devido à ruptura frágil, a ruptura do UHPC não foi apresentada na Figura 60, mas é possível notar que o UHPFRC-1% apresenta um destacamento superficial, enquanto o UHPFRC-2% apresenta uma trinca após atingir a tensão de ruptura.

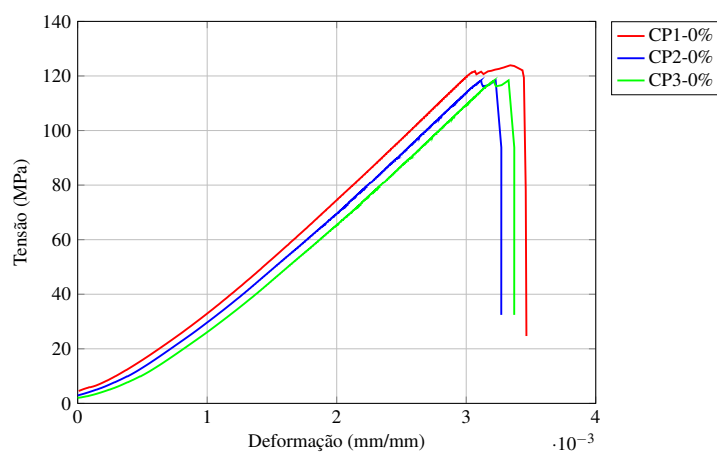
Figura 60 – Ruptura do UHPFRC.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

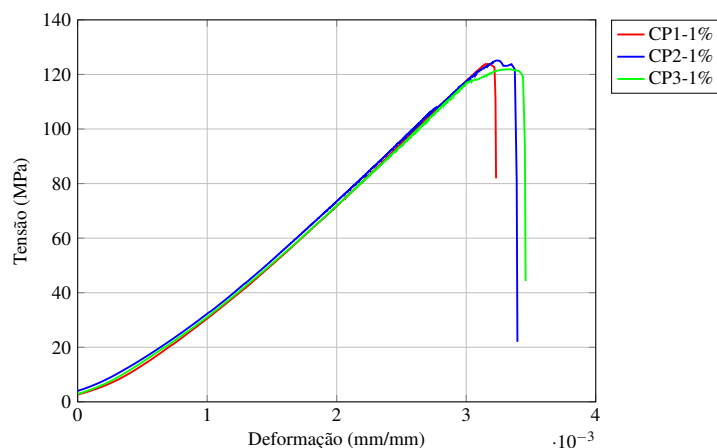
No presente estudo não foi utilizado *strain gages* para obtenção das curvas de tensão-deformação, as curvas das Figuras 61, 62 e 63 foram obtidas por meio da relação de força-deslocamento no ensaio de compressão axial.

Figura 61 – Relação tensão x deformação do UHPC-0% sujeito à compressão axial na cura padrão.



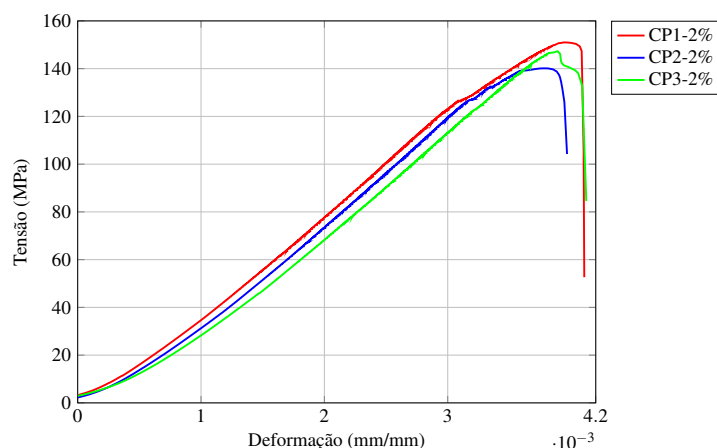
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 62 – Relação tensão x deformação do UHPFRC-1% sujeito à compressão axial na cura padrão.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 63 – Relação tensão x deformação do UHPFRC-2% sujeito à compressão axial na cura padrão.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Como pode ser visto nas Figuras 61, 62 e 63, a metodologia utilizada não conseguiu captar todo o caminho pós-pico. Quando se atingiu a carga última as fibras adicionadas não conseguiram prolongar o comportamento não linear.

6.1.2 UHPC em banho maria a 80°C

Para atingir uma resistência à compressão superior a 150 MPa muitos estudos optam por realizar a cura térmica, pois o processo de hidratação do cimento é lento. Entretanto, no LMCC não há câmara térmica, logo foi realizada a cura em banho maria. Na Tabela 6 estão os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial.

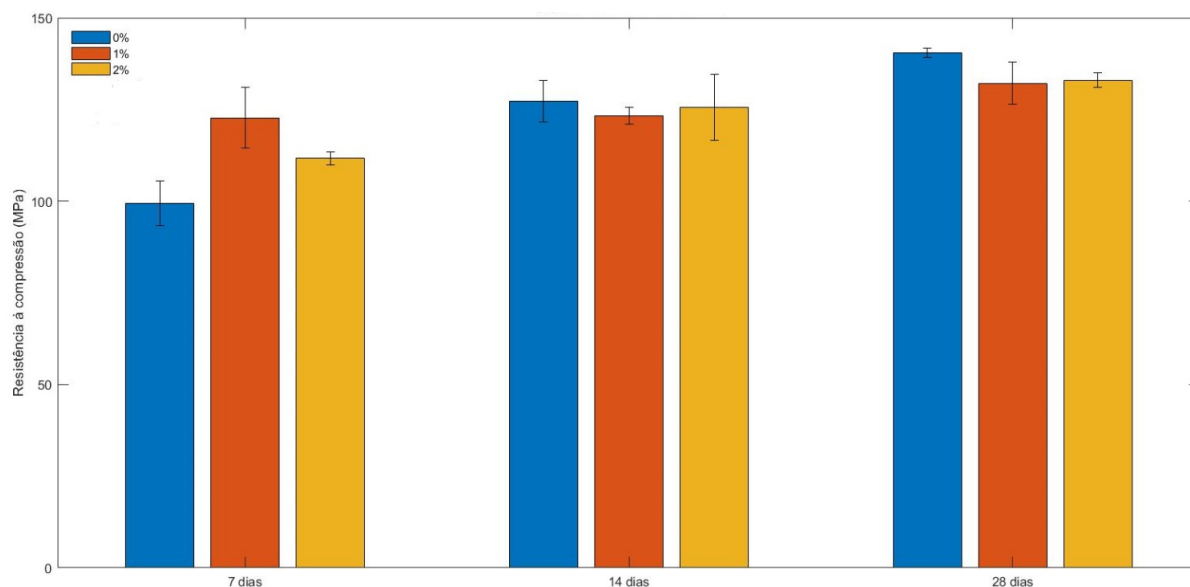
Tabela 6 – Resistência à compressão do UHPC com 0%, 1% e 2% de fibras.

Identificação	Teor de fibras (%)	f_c (MPa)	Idade (dias)
0-CP1	0	107,5	7
0-CP2	0	97,5	7
0-CP3	0	93,0	7
Média	-	99,33	-
0-CP4	0	123,5	14
0-CP5	0	123,0	14
0-CP6	0	135,4	14
Média	-	127,30	-
0-CP7	0	139,1	28
0-CP8	0	142,2	28
0-CP9	0	140,2	28
Média	-	140,50	-
1-CP1	1	118,5	7
1-CP2	1	115,4	7
1-CP3	1	134,3	7
Média	-	122,73	-
1-CP4	1	123,6	14
1-CP5	1	120,3	14
1-CP6	1	125,8	14
Média	-	123,23	-
1-CP7	1	139,2	28
1-CP8	1	132,0	28
1-CP9	1	125,1	28
Média	-	132,10	-
2-CP1	2	114,2	7
2-CP2	2	110,3	7
2-CP3	2	110,6	7
Média	-	111,70	-
2-CP4	2	117,4	14
2-CP5	2	138,2	14
2-CP6	2	121,4	14
Média	-	125,67	-
2-CP7	2	130,6	28
2-CP8	2	132,9	28
2-CP9	2	135,6	28
Média	-	133,03	-

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Figura 64 e a Tabela 6, o UHPC sem fibras apresentou a maior média de resistência à compressão. Vários fatores podem ser elencados para justificar uma resistência à compressão menor no UHPFRC-1% e UHPFRC-2% tais como: distribuição das fibras, aumento do índice de vazios, tempo elevado no banho maria, temperatura baixa (normalmente a cura térmica é realizada com temperaturas superiores a 100°C). O UHPC obteve uma resistência média à compressão superior na ordem de 6% e 5,5% em relação ao UHPFRC-1% e UHPFRC-2% , respectivamente.

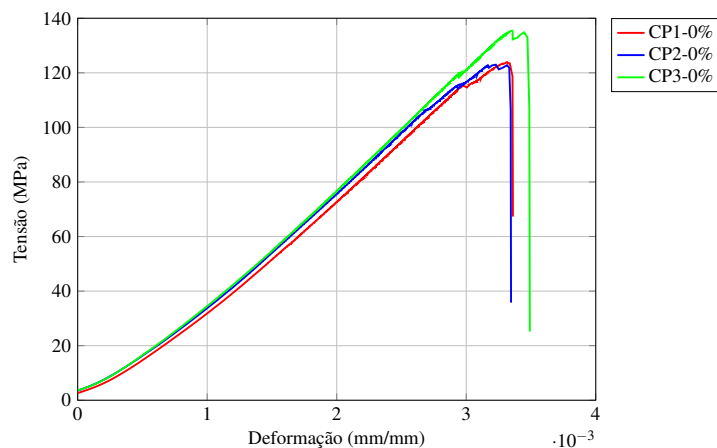
Figura 64 – Resistência à compressão em banho maria.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

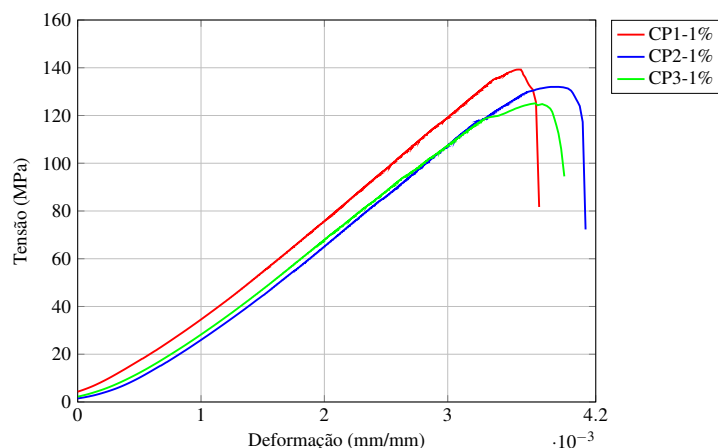
Como explicado na seção anterior, as curvas de tensão-deformação foram obtidas por meio das curvas de força-deslocamento. Nas Figuras 65, 66 e 67 é exposto as curvas de tensão-deformação, porém somente os CPs sujeitos à cura padrão foram utilizadas nas modelagens numéricas.

Figura 65 – Relação tensão x deformação do UHPC-0% sujeito à compressão axial na cura térmica.



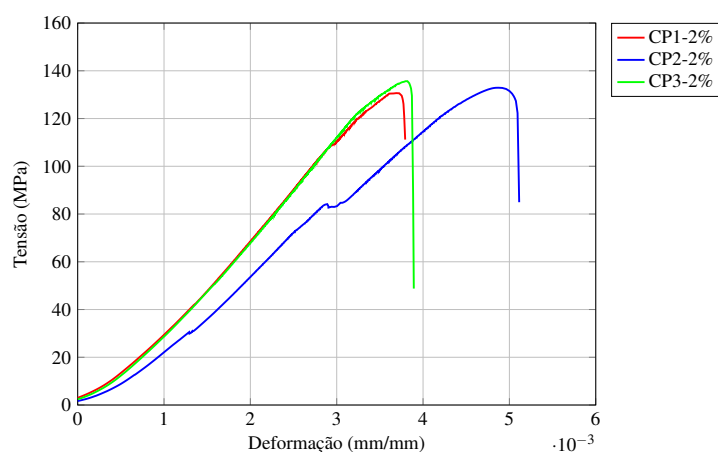
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 66 – Relação tensão x deformação do UHPFRC-1% sujeito à compressão axial na cura térmica.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 67 – Relação tensão x deformação do UHPFRC-2% sujeito à compressão axial na cura térmica.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

De acordo com todas as curvas de tensão-deformação, percebe-se que o regime linear do UHPC e UHPFRC corresponde a $0,80f_c$. E a deformação de pico na maioria dos CPs corresponderam a $0,0035 \text{ mm/mm}$. Essas informações são importantes, pois alguns modelos constitutivos utilizam a deformação de pico, trecho linear em função do módulo de elasticidade e a tensão de pico.

6.2 Resistência à tração do UHPC

A elevada resistência à compressão conferida ao UHPC e UHPFRC, conseqüentemente, tende a aumentar a resistência à tração. No presente estudo foi analisado a tração indireta

por compressão diametral e tração direta.

6.2.1 Tração indireta por compressão diametral

Na Tabela 7 estão dispostos os resultados obtidos nos ensaios de tração indireta. O UHPFRC-2% apresentou uma resistência superior na ordem de 95% e 3% em relação ao UHPC e UHPFRC-1%, respectivamente.

Tabela 7 – Tração indireta do UHPC.

Identificação	Teor de fibra (%)	Força (N)	$f_{ct,sp}$ (MPa)
0-CP1	0	196800	6,3
0-CP2	0	175000	5,6
0-CP3	0	209700	6,7
Média	-	193833,33	6,20
1-CP1	1	352700	11,2
1-CP2	1	361500	11,5
1-CP3	1	391600	12,5
Média	-	368600,00	11,73
2-CP1	2	368700	11,7
2-CP2	2	450400	14,3
2-CP3	2	371500	11,8
Média	-	396867,00	12,60

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Nas simulações numéricas foram utilizadas as tensões de tração máximas. Nesse sentido, foi realizada a média para cada traço. O concreto convencional tem baixa resistência à tração, tal característica não é encontrada no UHPC e UHPFRC, pois apresentam bom desempenho. Nos projetos de estruturas com concreto convencional a resistência à tração do mesmo é desprezada, as barras de aço são utilizadas para resistir a esses esforços. Como o UHPC e UHPFRC apresentam elevada resistência à tração, essa propriedade não pode ser desprezada, em virtude disso, pode ocorrer uma diminuição da taxa de aço tornando as estruturas mais leves.

Analisando a Tabela 7 percebe-se que o aumento do teor de fibras de 1% para 2% ocasionou um leve aumento da resistência à tração. Por isso muitas pesquisas destacam que a adição de fibras tendem a tornar a ruptura mais dúctil, caminho pós-pico mais suave, mas não há relação diretamente proporcional com a resistência.

Na Figura 68 é possível notar as rupturas do UHPC sem fibras e do UHPFRC com fibras. O UHPC rompeu diametralmente em duas partes iguais, entretanto, como era esperado, o UHPFRC não se partiu, pois a adição de fibras conferiu maior ductilidade e maior ancoragem na

matriz. Percebe-se no UHPFRC apenas trincas e destacamento superficial.

Figura 68 – Ruptura dos CPs por compressão diametral.



(a) Ruptura 0% de fibras

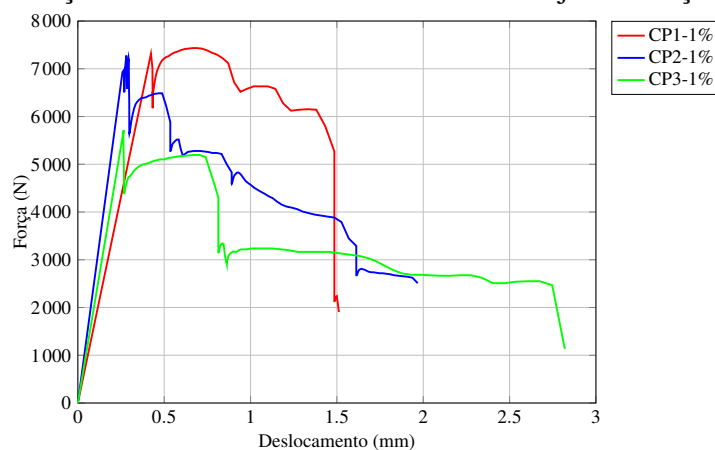
(b) Ruptura dos CPs com fibras

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

6.2.2 Tração direta

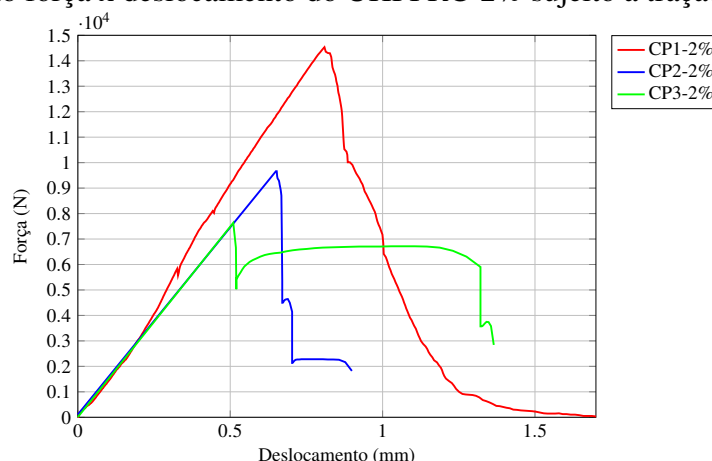
Conforme apresentado na metodologia, na Seção 4.0.3.1, um aparato foi desenvolvido para realizar a tração direta. Nas curvas de força-deslocamento foi necessário retirar a região inicial do gráfico correspondente à acomodação da máquina, como mostra as Figuras 69 e 70. Foi notado que em pesquisas correlatas a essa, por exemplo, Krahl *et al.* (2018) o trecho linear das curvas são bem íngremes, diferentemente das apresentadas abaixo que possui uma pequena inclinação. Todavia, o trecho pós-pico apresenta similaridade. Buscou-se a compatibilidade entre o experimental e o numérico, dessa forma, foi realizada uma análise do caminho pós-pico com a energia de fratura.

Figura 69 – Relação força x deslocamento do UHPFRC-1% sujeito à tração direta.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 70 – Relação força x deslocamento do UHPFRC-2% sujeito à tração direta.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Sabendo que a tensão é força dividida pela área da seção transversal, a resistência à tração direta foi calculada dessa forma. Constatou-se que a resistência à tração direta do UHPFRC-1% e UHPFRC-2% foram inferior a resistência à tração indireta do UHPFRC-1% e UHPFRC-2%, na ordem de 50% de redução da resistência. A diminuição da resistência pode estar relacionada com o formato do CP *dogbone*, orientação das fibras e acomodação da máquina de *pullout*. Na Tabela 8 estão dispostos os resultados de tração direta.

Tabela 8 – Tração direta do UHPFRC-1% e UHPFRC-2%.

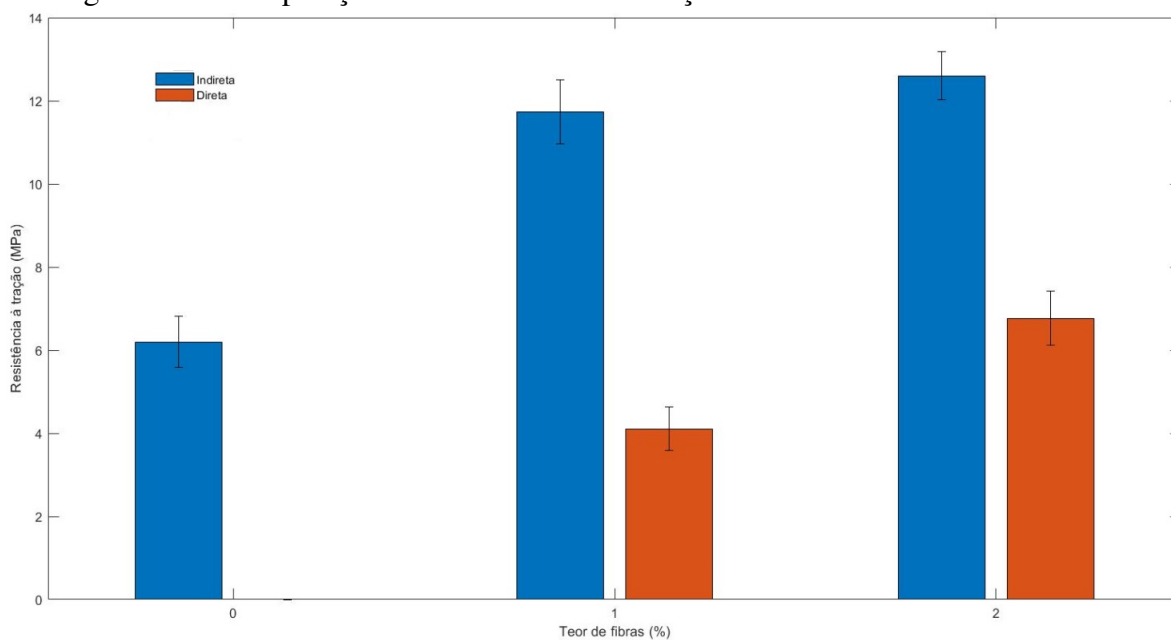
Identificação	Teor de fibra (%)	f_{ctsp} (MPa)
1-CP1	1	4,50
1-CP2	1	4,42
1-CP3	1	3,43
Média	-	4,11
2-CP1	2	9,06
2-CP2	2	6,25
2-CP3	2	5,00
Média	-	6,77

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Tabela 8 é notório que a resistência à tração direta é bem inferior aos resultados de tração indireta apresentados na Tabela 7. Comparando as médias dos resultados obtidos nos ensaios de tração direta do UHPFRC-1% e UHPFRC-2%, percebe-se que houve ganho de resistência, o UHPFRC-2% apresentou uma resistência à tração superior na ordem de 40% em relação ao UHPFRC-1%. De acordo com os resultados obtidos, a resistência à tração indireta é o dobro da resistência à tração direta, como pode ser visto na Figura 71. A orientação das fibras, o formato dos corpos de prova, os maquinários utilizados nos dois e a velocidade de

carregamento podem ter ocasionado essa diferença.

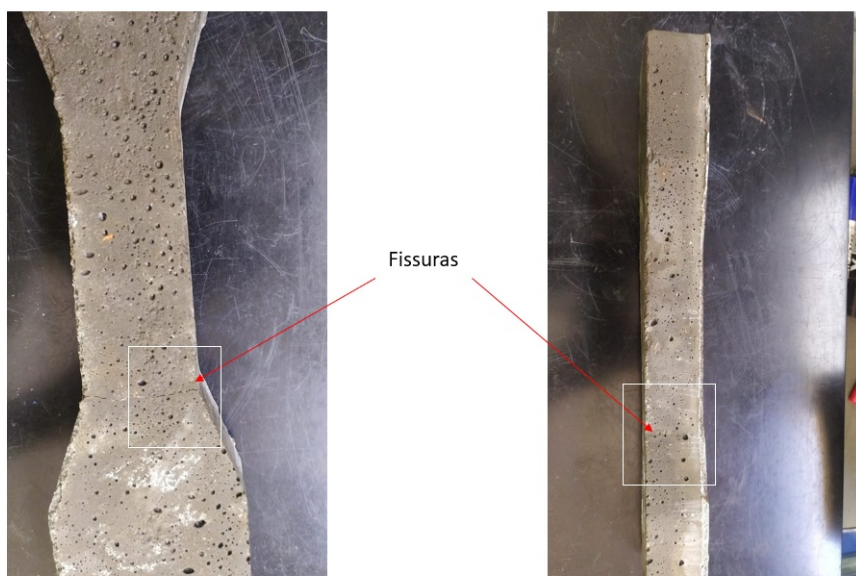
Figura 71 – Comparação entre a resistência à tração direta e indireta.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Nas pesquisas correlatas a essa, a análise da resistência à tração, energia de fratura e do dano na tração, normalmente, são realizadas apenas para o concreto com fibras. Entretanto, foi realizado o ensaio de tração direta no UHPC, mas antes da ruptura percebeu-se que os CPs já possuíam fissuras antes mesmo de serem ensaiados, como pode ser visto na Figura 72.

Figura 72 – Ruptura do UHPC.

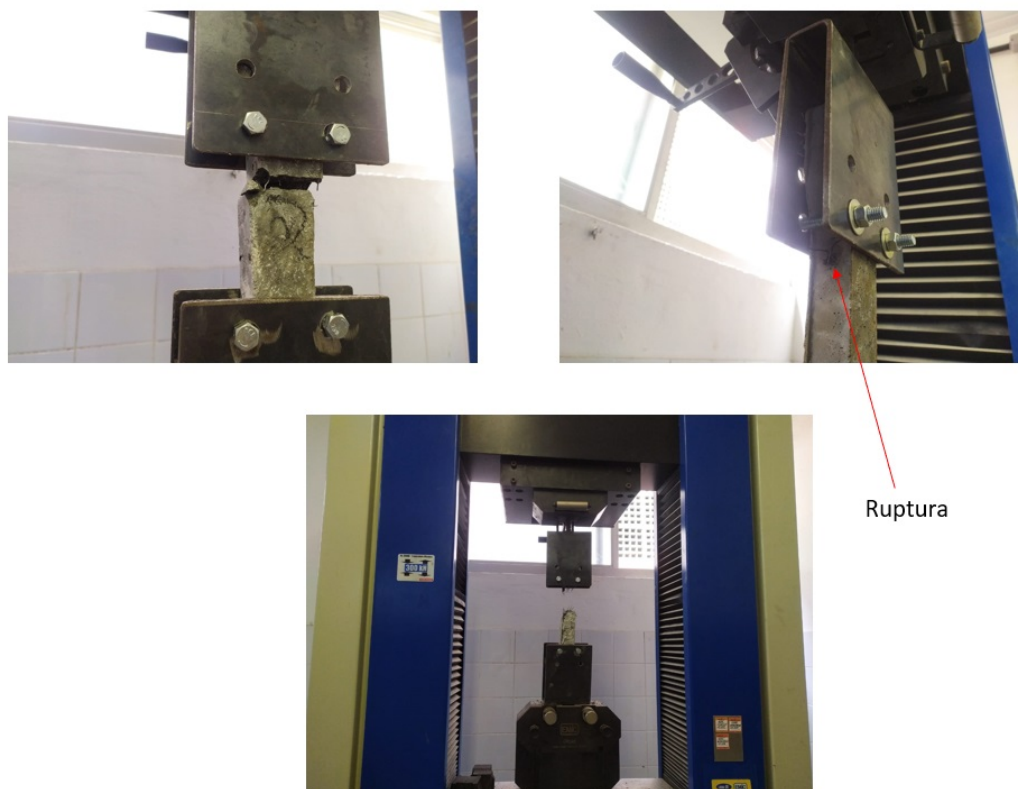


Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Figura 72, as fissuras podem ser relacionadas com a falta de ancoragem da matriz devido à falta de fibras, o formato do CP utilizado apresenta uma inclinação na área que é tracionada e, também, pode estar relacionado com a retração autógena, em consequência, do elevado consumo de cimento. Normalmente, os materiais cimentícios secundários tendem a diminuir esse efeito, mas como observado, o volume de metacaulim utilizado não conseguiu inibir em sua totalidade esse efeito.

De maneira visual, percebeu-se que a distribuição das fibras podem afetar o comportamento das curvas de força-deslocamento. Esta análise visual está em consonância com os trabalhos de Brühwiler (2016), Fehling *et al.* (2014), Li *et al.* (2018), Raheem *et al.* (2019), Wille e Naaman (2013). Na Figura 73 é possível verificar vários tipos de rupturas nos CPs sujeitos à tração direta.

Figura 73 – Verificação do posicionamento das fibras.



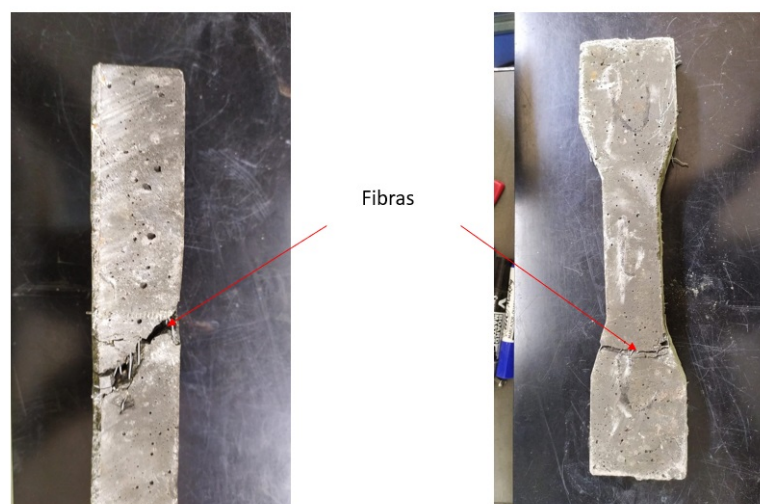
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Verificando os tipos de rupturas e os ensaios experimentais, foi notado que a orientação das fibras, bem como, a sua concentração em determinada área do CP afetou o comportamento mecânico. Tal comportamento foi explicitado na Figura 69. No processo de moldagem não foi realizada nenhuma instrumentação para distribuição e orientação das fibras, de modo que, foram

lançadas na mistura de modo aleatório. Em alguns casos, a força permaneceu constante e o deslocamento crescente caracterizando uma boa ancoragem das fibras.

Com base nos resultados experimentais foi verificado e constatado que as fibras quando se concentravam nas marcações apresentadas na Figura 74, a ruptura ocorria de forma mais suave e não havia falha ou ruptura das fibras.

Figura 74 – Ruptura suave do UHPFRC.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Diante do exposto, não foi possível obter a resistência à tração direta do UHPC sem fibras, pois as fissuras pré-existentes tornou o material mais frágil. Nesse sentido, uma análise reológica seria necessária para verificação da existência ou não de retração autógena ou, até mesmo, uma análise microestrutural para um maior entendimento desses efeitos.

6.3 Módulo estático de elasticidade à compressão

A rigidez do UHPC está diretamente ligada com o módulo de elasticidade. Nos ciclos de carregamento e descarregamento de estruturas, o elevado módulo de elasticidade conferido ao UHPC e UHPFRC tende a apresentar uma diminuição do dano isotrópico. Também ocorre uma relação direta com a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, quanto maior for a resistência à compressão maior será o módulo de elasticidade. Porém, o módulo pode ser influenciado pela interação dos agregados, relação a/c, volume, distribuição e orientação das fibras.

O módulo de elasticidade é uma propriedade física que está diretamente relacionada com as deformações dos elementos estruturais. Essa propriedade, no presente estudo, foi obtida

por meio dos ensaios experimentais, modelos constitutivos normativos e modelos analíticos que relacionam o módulo de elasticidade estático à compressão com o tipo de agregado, módulo dinâmico, resistência à compressão e, por fim, com a massa específica do UHPC e UHPFRC.

6.3.1 Módulo de elasticidade do UHPC

O módulo de elasticidade pode ser influenciado por fatores que ocorrem na matriz da pasta, zona de transição da interface e na fase agregado. No UHPC foi utilizado apenas materiais finos e, por consequência, a zona de transição na interface, que é um elo frágil entre a matriz da pasta com o agregado, passa a não existir. Nesse sentido, há melhoria da resistência à compressão e, conseqüentemente, do módulo de elasticidade. O aumento do módulo ocorre por melhoria na matriz da pasta reduzindo à relação a/c, à porosidade da matriz, padronizando a cura e o método de ensaio. Na Tabela 9 estão os resultados obtidos experimentalmente para o UHPC, UHPFRC-1% e UHPFRC-2%.

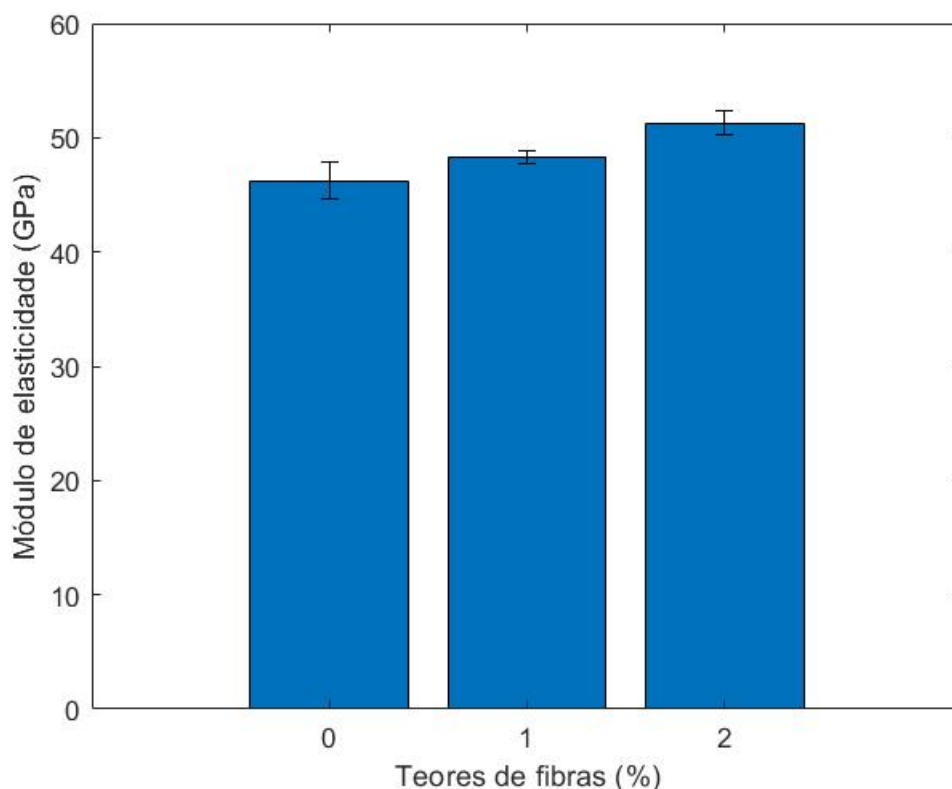
Tabela 9 – Módulo de elasticidade experimental do UHPC.

UHPC-0%	E_{ci} (GPa)	UHPC-1%	E_{ci} (GPa)	UHPC-2%	E_{ci} (GPa)
0-CP1	45,3	1-CP1	49,0	2-CP1	49,9
0-CP2	44,9	1-CP2	48,1	2-CP2	52,5
0-CP3	48,5	1-CP3	47,8	2-CP3	51,5
Média	46,23	Média	48,30	Média	51,30

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Segundo Alsalman *et al.* (2017) e Fehling *et al.* (2014), o UHPC e UHPFRC apresentam módulo de elasticidade na ordem de 45-55 GPa. Na Figura 75 é apresentada a média obtida nos ensaios experimentais, assim sendo, pode-se afirmar que o presente estudo obteve resultados que estão em consonância com a literatura. O UHPFRC-2% apresentou um módulo de elasticidade 10% e 6% maior que o UHPC e UHPFRC-1%, respectivamente.

Figura 75 – Módulo de elasticidade do UHPC.



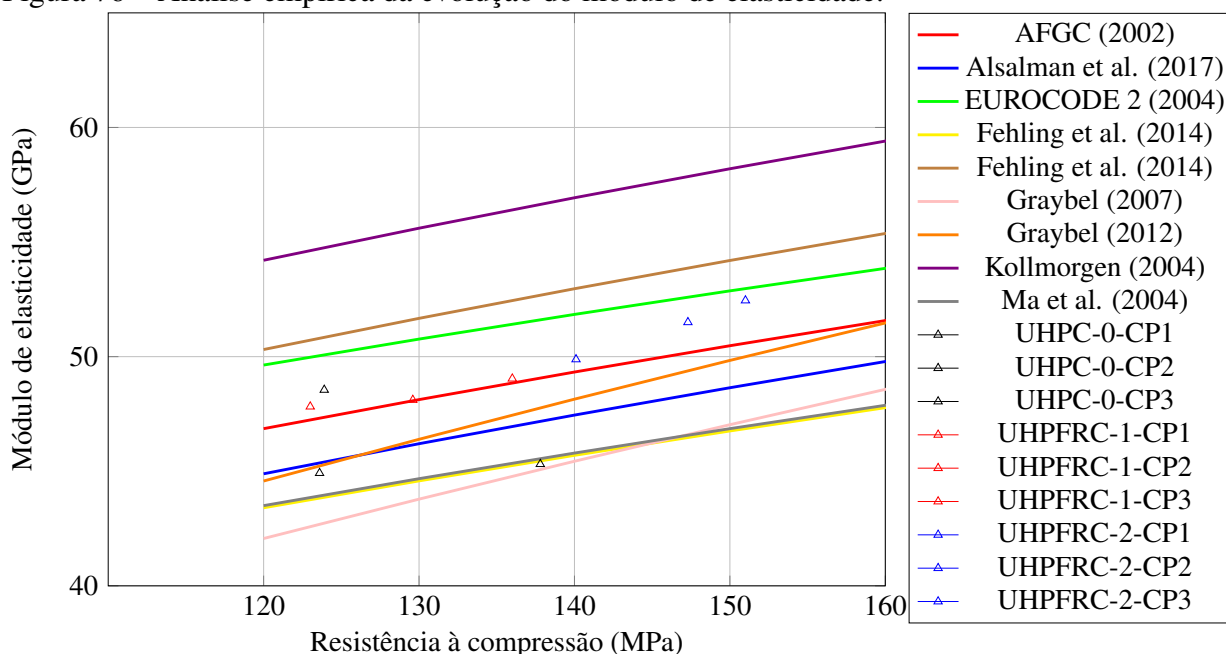
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

6.3.1.1 Análise analítica do módulo de elasticidade do UHPC

Na Figura 76 está uma análise da evolução do módulo de elasticidade por meio de funções analíticas propostas por Fehling *et al.* (2014), Alsalman *et al.* (2017), Ma *et al.* (2004), Ma e Schneider (2002), Scribani (2002), Ahlborn e Kollmorgen (2004), Graybeal (2007), Graybeal *et al.* (2012), Kong e Evans (2013) e EUROCODE 2 (BSI, 2004).

A Figura 76 foi proposta para a análise do comportamento físico do UHPC em função da resistência à compressão. Tendo ciência de que o módulo de elasticidade do UHPC varia entre 45-55 GPa, percebe-se que o modelo proposto por Ahlborn e Kollmorgen (2004) apresenta maior discrepância entre os modelos apresentados, essa disparidade ocorreu devido o modelo englobar do concreto convencional ao UHPC. Os modelos que foram formulados para representar apenas o comportamento físico do UHPC apresentaram maior convergência com o estado da arte.

Figura 76 – Análise empírica da evolução do módulo de elasticidade.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Dos resultados experimentais foram utilizados todos os CPs do módulo de elasticidade do UHPC, UHPFRC-1% e UHPFRC-2% e, bem como, dos resultados da resistência à compressão obtidos aos 28 dias que foram apresentados previamente na Tabela 6. Como pode ser visto na Figura 76, os modelos empíricos estão em função da resistência à compressão de 120 MPa a 200 MPa.

Analisando os resultados apresentados, o UHPC-0% apresentou maior similaridade com o modelo proposto por Fehling *et al.* (2014), Ma *et al.* (2004), Graybeal *et al.* (2012) e Alsalman *et al.* (2017) para a mesma faixa de resistência à compressão. Analogamente ao UHPC-0%, para o UHPFRC-1%, notou-se que os modelos propostos por Alsalman *et al.* (2017), Graybeal (2007), Graybeal *et al.* (2012) Ma *et al.* (2004), Fehling *et al.* (2014) apresentaram maior similaridade.

Em relação ao UHPFRC-2%, os modelos que apresentaram maior compatibilidade com o programa experimental foram Scribani (2002), Graybeal *et al.* (2012) e EUROCODE 2 (BSI, 2004). Diante dos resultados apresentados, foi notado que os modelos empíricos que tratam, exclusivamente, da faixa de resistência à compressão que compreende o UHPC e à utilização apenas de materiais finos apresentam maior similaridade com o programa experimental desenvolvido.

6.4 Módulo de elasticidade dinâmico do UHPC

Conforme Mehta e Monteiro (2017), é importante ter conhecimento do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}), pois é o mais recomendado para estruturas que estão sujeitas a cargas dinâmicas, tais como: terremotos, impactos e vibrações constantes. Desse modo, além do módulo de elasticidade estático à compressão, foi analisado o módulo de elasticidade dinâmico por meio de ondas ultrassônicas. Nesse sentido, segundo Mehta e Monteiro (2017), as deformações no concreto que acarretam à perda de rigidez e o aumento do dano, são respostas do material devido as condições de uso, ambientais e de carregamento que a estrutura está imposta.

A qualidade do concreto pode ser mensurada por meio da velocidade de propagação da onda ultrassônica. São vários fatores que podem afetar a qualidade do concreto e do ensaio e, conseqüentemente, da velocidade da onda ultrassônica. Conforme a NBR 8802 (ABNT, 2019), alguns fatores são:

- a distância entre as faces dos transdutores;
- densidade do concreto, que depende dos materiais e traço utilizado;
- tipo de cimento e grau de hidratação;
- tipo de adensamento do concreto;
- idade do concreto;
- umidade do concreto;
- temperatura do concreto;
- forma e tamanho do testemunho.

Experimentalmente foi obtido a velocidade de propagação em duas tipologias de corpos de prova e dois tipos de cura, como mostra a Tabela 10. A menor e a maior velocidade obtida nos ensaios foi de 4717 m/s e 5263 m/s, respectivamente.

Tabela 10 – Velocidade da onda ultrassônica aos 28 dias

Identificação	V (m/s)	Tempo (μ s)	Formato do CP	Tipo de cura
0-CP1	5178	30,9	Prismático	Padrão
0-CP2	5263	30,4	Prismático	Padrão
0-CP3	5178	30,9	Prismático	Padrão
Média	5206,33	30,73	-	-
1-CP1	5195	30,8	Prismático	Padrão
1-CP2	5229	30,6	Prismático	Padrão
1-CP3	5079	31,5	Prismático	Padrão
Média	5167,67	30,97	-	-
2-CP1	5096	31,4	Prismático	Padrão
2-CP2	5016	31,9	Prismático	Padrão
2-CP3	5096	31,4	Prismático	Padrão
Média	5069,33	31,57	-	-
0T-CP1	4938	32,4	Prismático	Térmica
0T-CP2	4938	32,4	Prismático	Térmica
0T-CP3	4863	32,9	Prismático	Térmica
Média	4913,00	32,57	-	-
1T-CP1	5016	31,9	Prismático	Térmica
1T-CP2	5016	31,9	Prismático	Térmica
1T-CP3	4990	32,4	Prismático	Térmica
Média	4990,00	32,07	-	-
2T-CP1	5016	31,9	Prismático	Térmica
2T-CP2	5016	31,9	Prismático	Térmica
2T-CP3	4938	32,4	Prismático	Térmica
Média	4990,00	32,07	-	-
0C-CP1	4717	42,4	Cilíndrico	Padrão
0C-CP2	4717	42,4	Cilíndrico	Padrão
0C-CP3	4717	42,4	Cilíndrico	Padrão
Média	4717	42,4	-	-
1C-CP1	5013	39,9	Cilíndrico	Padrão
1C-CP2	5141	38,9	Cilíndrico	Padrão
1C-CP3	4950	40,4	Cilíndrico	Padrão
Média	5034,66	39,73	-	-
2C-CP1	4831	41,4	Cilíndrico	Padrão
2C-CP2	4950	40,4	Cilíndrico	Padrão
2C-CP3	4890	40,9	Cilíndrico	Padrão
Média	4890,33	40,9	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Na análise apenas da velocidade de propagação abordada na Tabela 10 e em consonância com a Tabela 11, pode-se afirmar que o UHPC, UHPFRC-1% e UHPFRC-2% se caracteriza como qualidade excelente em todas as amostras do programa experimental. Em consonância com a NBR 8802 (ABNT, 2019), a qualidade pode estar associada a menor presença de vazios, fissuras e trincas. Desse modo, é correto afirmar que o concreto desenvolvido apresenta uma baixa porosidade.

Tabela 11 – Avaliação da qualidade do concreto

Velocidade m/s	Qualidade do concreto
V > 4500	Excelente
3500 < V < 4500	Ótimo
3000 < V < 3500	Bom
2000 < V < 3000	Regular
V < 2000	Ruim

Fonte: adaptado de Cánovas (1988).

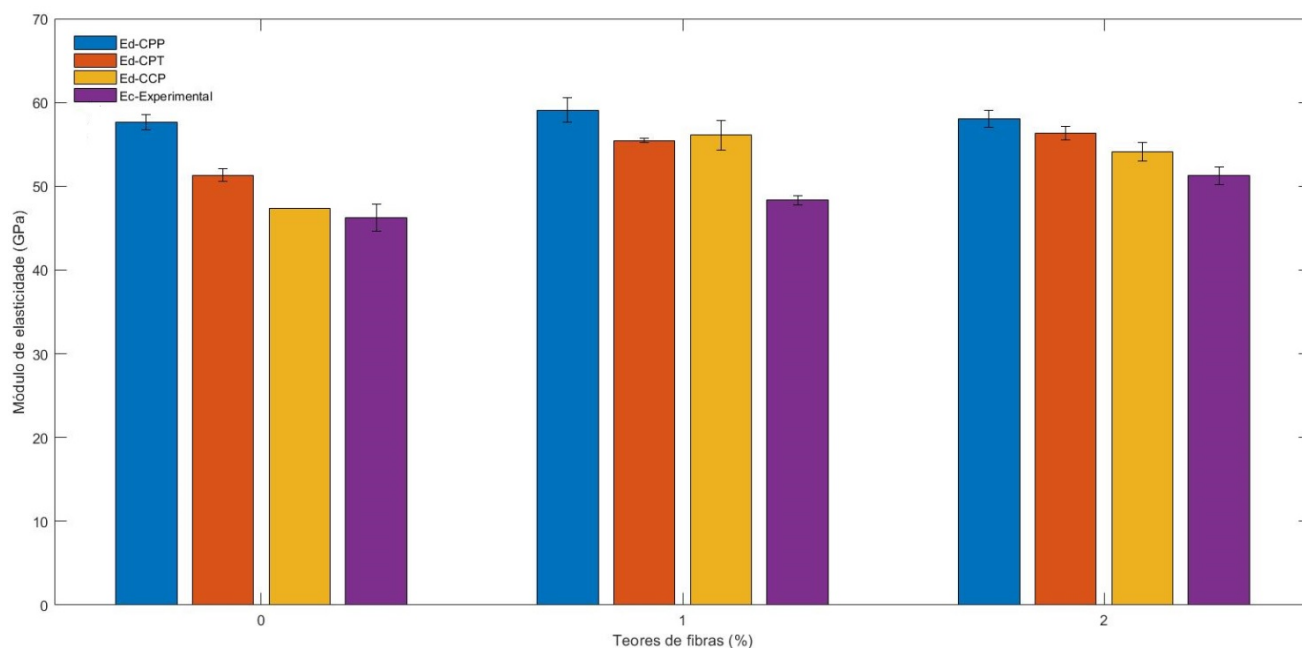
Um dos fatores que podem afetar os resultados da velocidade de propagação da onda ultrassônica, segundo a NBR 8802 (ABNT, 2019) é a presença de armadura na peça em análise. Logo, analisando a Tabela 10, observa-se que as fibras metálicas afetaram a velocidade da onda. No presente trabalho as fibras foram lançadas na mistura de maneira aleatória, logo não é possível realizar um estudo qualitativo, pois a distribuição e orientação das fibras não foram objetos de estudos. Entretanto, uma análise quantitativa foi realizada.

No estudo quantitativo foi notado que o tipo de cura influenciou na velocidade da onda e, assim como, na resistência à compressão percebeu-se que os corpos de prova que foram sujeitos à cura padrão apresentaram melhor desempenho. Como pode ser visto na Figura 77.

No corpo de prova prismático sujeito à cura padrão a presença de fibras reduziu levemente a velocidade do pulso ultrassônico, quando comparado com o UHPC sem fibras, a velocidade foi reduzida em 0,74% e 2,63%, respectivamente para o UHPFRC-1% e UHPFRC-2%. A orientação, distribuição e o volume das fibras podem ter acarretado a esse resultado. Diferentemente, do corpo de prova prismático em cura padrão, na cura térmica para a mesma tipologia de CP, o UHPC sem fibras apresentou uma redução da velocidade do pulso na ordem de 1,54% quando comparado com o UHPFRC-1% e UHPFRC-2%. No corpo de prova cilíndrico sujeito à cura padrão, o UHPC sem fibras apresentou menor velocidade da onda ultrassônica quando comparado com o UHPFRC-1% e UHPFRC-2%.

Diante do exposto, foi constatado que o formato do CP e o tipo de cura influenciaram na velocidade da onda ultrassônica. Tal propriedade é importante, pois ela é utilizada na obtenção do módulo de elasticidade dinâmico. Entretanto, para uma análise qualitativa é necessário um estudo sobre o formato, distribuição, volume e orientação das fibras.

Figura 77 – Comparação do módulo de elasticidade do UHPC.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

É importante salientar que, normalmente, relaciona-se o módulo de elasticidade dinâmico com o módulo de elasticidade tangente inicial, pois as deformações instantâneas são pequenas.

6.5 Correlação do Módulo de Elasticidade Estático com o Módulo Dinâmico

Diferentemente do que foi apresentado até o presente momento a respeito do módulo de elasticidade estático e dinâmico, Lydon e Balendran (1986) e a norma britânica BSI 8110-2 (BSI, 1985) relacionam o Módulo de Elasticidade Estático (E_c) em função do Módulo de Elasticidade Dinâmico ($E_{c,d}$).

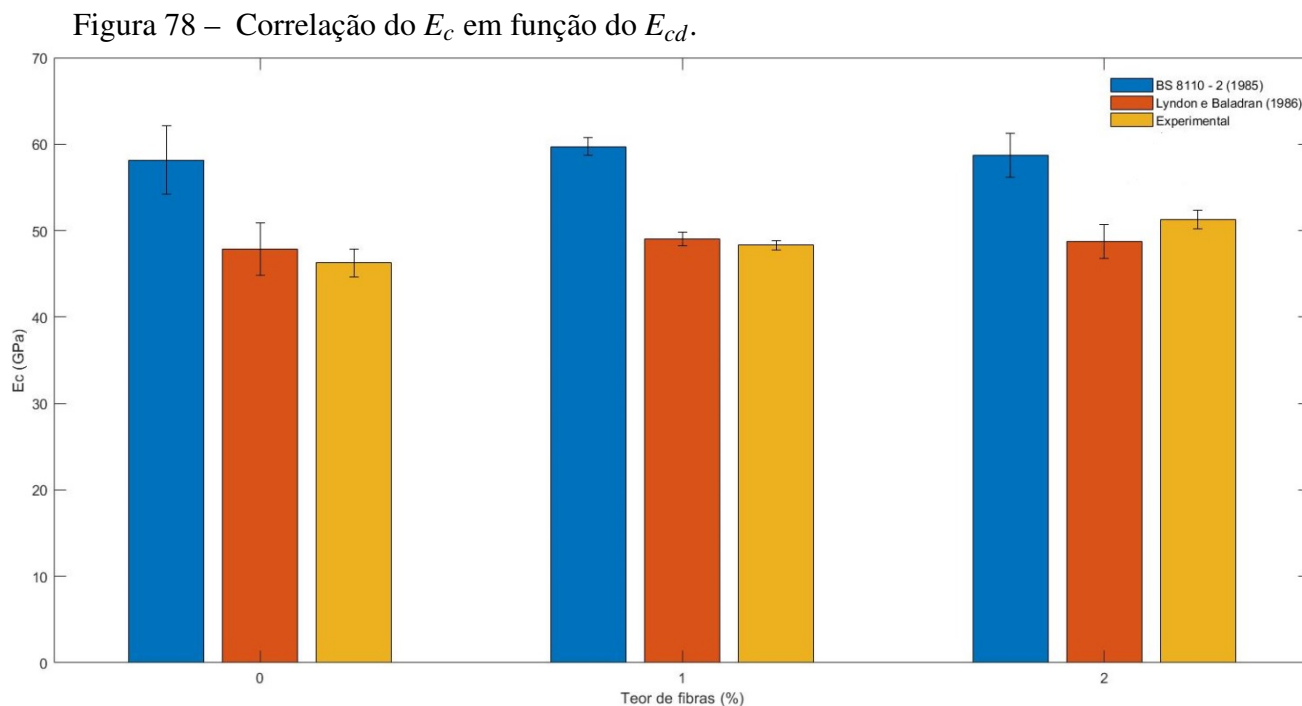
Nesse sentido, a Eq. 6.2 foi proposta pela norma BSI 8110-2 (BSI, 1985).

$$E_c = 1.08.E_{c,d} - 4.1 \quad (6.2)$$

Desse modo, a Eq. 6.3 foi proposta por Lydon e Balendran (1986).

$$E_c = 0.83.E_{c,d} \quad (6.3)$$

Os resultados experimentais foram confrontados com as correlações obtidas nas Eqs. 6.2 e 6.3. Na Figura 78 é possível visualizar graficamente o E_c para o UHPC, UHPFRC-1% e UHPFRC-2%.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Figura 78, percebe-se que o programa experimental apresentou maior similaridade com o modelo proposto por Lydon e Baladrán (1986). Comparando os resultados experimentais com o modelo de Lydon e Baladrán (1986), notou-se que a maior diferença (5%) ocorreu no UHPFRC-2%. No UHPC e UHPFRC-1%, a diferença foi inferior a 1%.

O modelo proposto por BSI 8110-2 (BSI, 1985), percebeu-se que a adição de fibras pouco influenciou no módulo de elasticidade, como pode ser visto na Figura 78. Essa estabilização do módulo de elasticidade no UHPC, UHPFRC-1% e UHPFRC-2% pode ter ocorrido devido a estabilização da onda ultrassônica, tal afirmação é feita, pois o $E_{c,d}$ é obtido em função da massa específica do concreto e da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

6.6 Tração na flexão

Os ensaios de tração na flexão foram realizados em corpos de prova prismáticos em escala reduzida. Conforme discutido em seções anteriores, no UHPC, as fibras metálicas foram adicionadas em relação ao volume de materiais. É notório que esse tipo de adição afeta,

positivamente, o caminho pós-pico aumentando a tenacidade e a ductilidade do material.

6.6.1 Tração na flexão - UHPC

Percebeu-se que a adição de fibras aumentou a resistência à tração na flexão, como pode ser visto na Tabela 12. O UHPFRC-2% apresentou uma resistência à tração na flexão superior ao UHPC e UHPFRC-1%, na ordem de 20% e 35%, respectivamente.

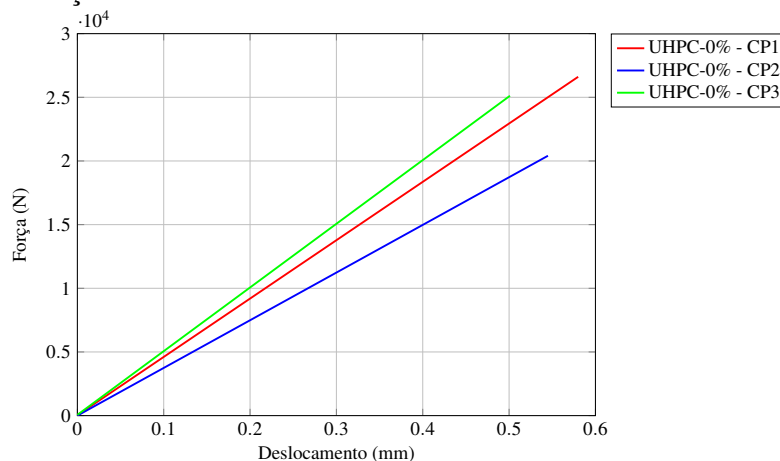
Tabela 12 – Resistência à tração na flexão do UHPC-0%, UHPFRC-1% e UHPFRC-2%.

UHPC	fct,f (MPa)	UHPFRC-1	fct,f (MPa)	UHPFRC-2	fct,f (MPa)
0-CP1	14,19	1-CP1	13,86	2-CP1	21,31
0-CP2	10,88	1-CP2	18,66	2-CP2	17,60
0-CP3	13,39	1-CP3	14,93	2-CP3	20,26
Média	12,82	Média	15,81	Média	19,72

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

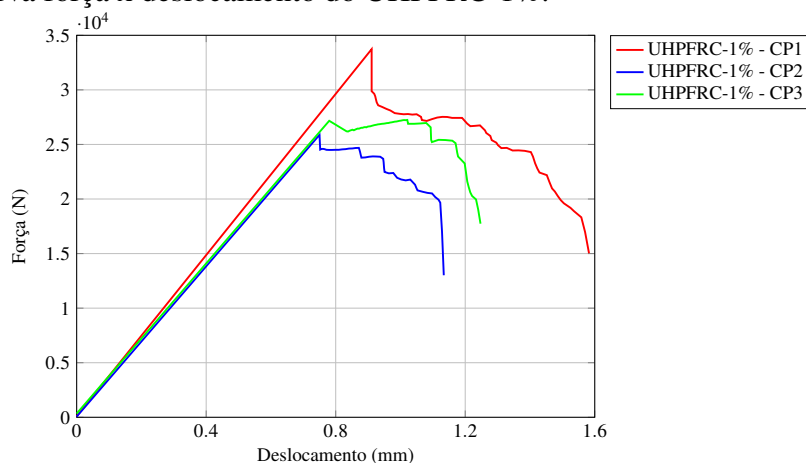
Além da melhoria da resistência, notou-se que a adição de fibras aumentou o caminho pós-pico, como pode ser visto nas Figuras 79, 80 e 81. Portanto, por meio desses ensaios foram gerados curvas de força-deslocamento. As curvas serviram para validação das modelagens numéricas.

Figura 79 – Curva força x deslocamento do UHPC-0%.



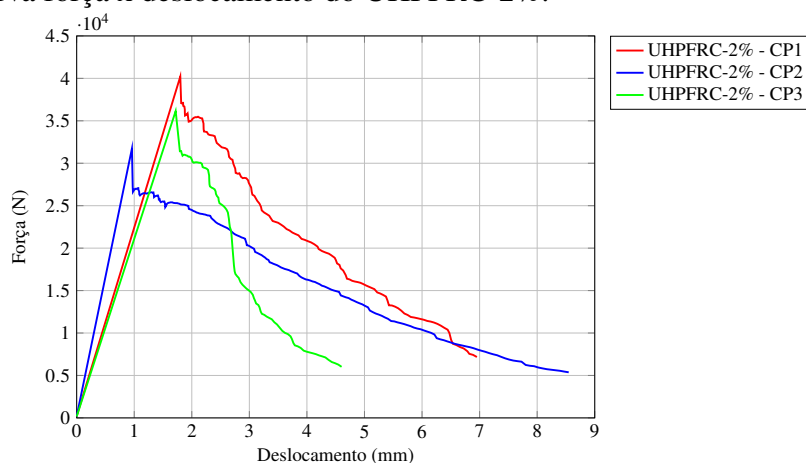
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 80 – Curva força x deslocamento do UHPFRC-1%.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

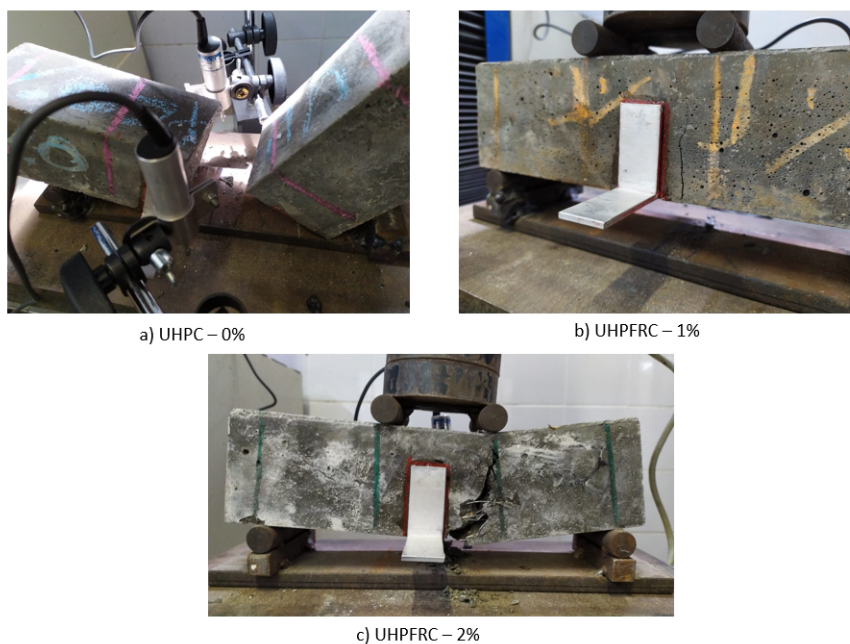
Figura 81 – Curva força x deslocamento do UHPFRC-2%.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

O procedimento de ruptura foi diferente para os três teores de fibras. Analisando a Figura 82, o UHPC-0% apresentou ruptura frágil e não avisada, o UHPFRC-1% apresentou ganho de ductilidade e ruptura avisada, o UHPFRC-2% apresentou maior ductilidade e resistência. É possível visualizar que todas as rupturas ocorreram no centro do CP, assim fica caracterizado a ruptura por flexão.

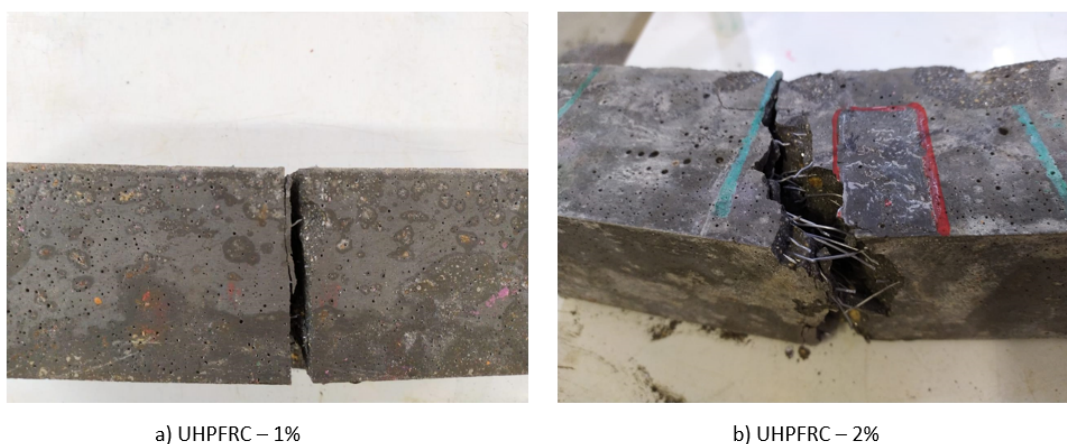
Figura 82 – Ruptura na flexão.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Além disso, o UHPFRC-1% na ruptura apresentou uma trinca, de modo que, ficou caracterizado que as fibras incorporadas não foram suficientes para aumentar o trecho pós-pico. O UHPFRC-2% apresentou uma trinca, entretanto, notou-se que as fibras adicionadas trabalharam na flexão, por consequência, a boa ancoragem das fibras garantiram captar todo trecho no caminho pós-pico.

Figura 83 – Ancoragem das fibras.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

6.7 Reforço estrutural

O reforço estrutural com a técnica EBR, inicialmente, foi proposto para realização da validação numérica via elementos finitos. Diferentemente dos ensaios de tração na flexão do UHPC e tração direta, nos ensaios de tração na flexão do reforço não foi possível captar a curva de força-deslocamento, pois o apoio móvel não suportava à alta rigidez da viga curta, que foi armada e reforçada. Nesse sentido, não foi realizada a modelagem numérica desses ensaios, porém foi possível verificar a resistência à flexão por meio da equação proposta na NBR 12142 (ABNT, 2010).

Para caracterização mecânica do concreto convencional (CC), foi obtida a resistência à compressão, como mostra a Tabela 13. Desse modo, percebe-se que o concreto convencional atingiu a resistência à compressão esperada aos 28 dias de idade. O $f_{ck} = 30$ MPa foi escolhido, pois é comumente utilizado em edifícios no Brasil.

Tabela 13 – Resistência à compressão do concreto convencional (CC).

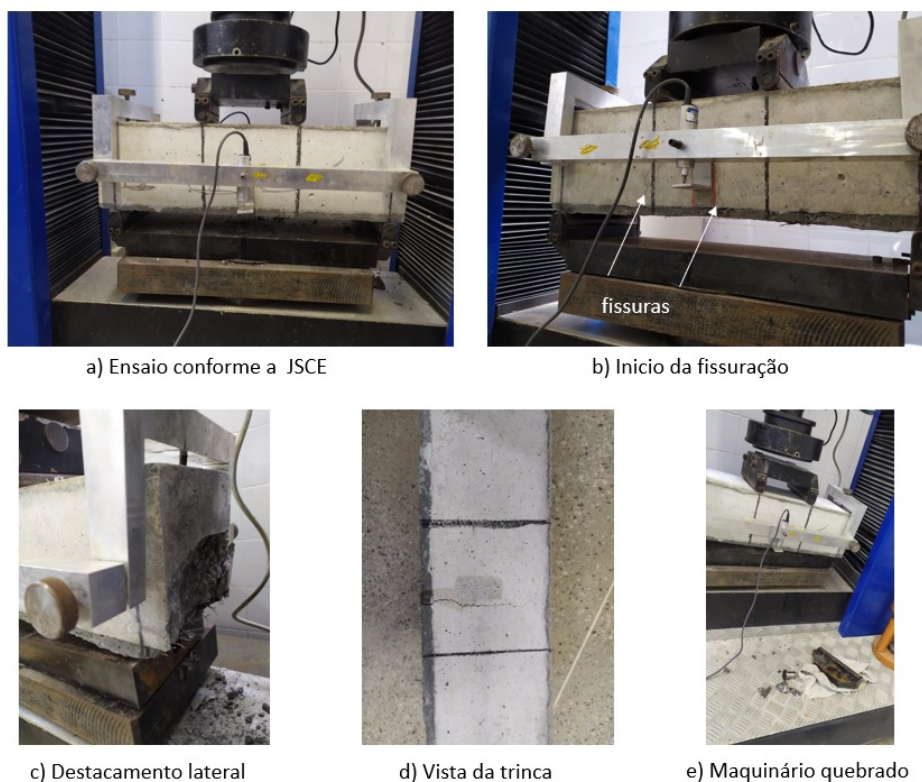
CC-28 dias	f_c (MPa)
CP1	24,24
CP2	43,51
CP3	42,11
Média	36,62

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Como pode ser visto na Figura 84, as vigas curtas com reforço estrutural foram ensaiadas tendo como base a JSCE - SF4 (JSCE, 1984). Percebeu-se nesses ensaios que a armadura adicionada conseguiu resistir aos esforços de tração, de modo que, as fissuras ficaram concentradas na área central. Porém, também notou-se que a viga apresentava elevada resistência à flexão, o destacamento lateral pode indicar uma ruptura por cisalhamento.

Devido à elevada carga necessária para romper os CPs, o apoio móvel sempre quebrava quando atingia o limite do regime linear. Por consequência, não foi possível obter o caminho pós-pico. Nesse sentido, foi comparado a resistência à flexão de vigas reforçadas com as de referência, apenas para quantificação do possível ganho de resistência. E, desse modo, não será apresentado as curvas de força-deslocamento, como explicado anteriormente.

Figura 84 – Fissuração nas vigas curtas.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Devido à elevada resistência à compressão e à tração na flexão é notório que há ganho de ductilidade quando o UHPFRC-2% é utilizado como reforço em estruturas. Com base na Tabela 14, é possível dizer que a metodologia de reforço utilizada apresentou um ganho da resistência à flexão quando comparado com os CPs referência (não reforçado).

Tabela 14 – Comparação da resistência à flexão

Reforço	fct,f (MPa)	Referência	fct,f (MPa)
0-CP1	13,76	1-CP1	9,12
0-CP2	10,66	1-CP2	7,94
0-CP3	12,00	1-CP3	7,39
Média	12,41	Média	8,15

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

O uso do UHPFRC-2% apresentou um ganho de resistência à flexão na ordem de 34,32%, quando comparado com os CPs referência. Levando em consideração a elevada resistência à compressão, tração, elevado módulo de elasticidade estático e dinâmico e a baixa porosidade apresentada nos ensaios de absorção, pode-se afirmar que, tais propriedades justificam o uso do UHPC como reforço de estruturas convencionais, como apresentado nessa seção.

6.8 Durabilidade do UHPC

A durabilidade é uma das principais propriedades dos materiais cimentícios desenvolvidos nessa pesquisa. Como mostrado em seções anteriores, na análise com as ondas ultrassônicas foi verificado que o UHPC e o UHPFRC são classificados como materiais de qualidade excelente. Isso ocorre devido à baixa porosidade e, conseqüentemente, menor penetração de agentes físicos, químicos e biológicos.

Nesse sentido, foi realizado um estudo sobre a durabilidade do UHPC e UHPFRC. Em consonância com a NBR 9778 (ABNT, 2009) foi determinada a massa específica, absorção e o índice de vazios. Conforme os critérios da NBR 9779 (ABNT, 2012) foi obtido a absorção de água por capilaridade. Esses estudos trazem resultados promissores sobre a durabilidade do UHPC desenvolvido, uma vez que, o material apresenta elevada durabilidade, logo as estruturas passarão por menos intervenções ao longo da sua vida útil. Em suma, há ganhos financeiros e na sustentabilidade, pois menos recursos naturais serão utilizados ao longo da vida útil dessas estruturas especiais.

6.8.1 Massa específica, absorção, índice de vazios

Na Tabela 15 está disposta a massa após a estufa, hidrostática e da superfície seca. Na Tabela 16 estão dispostos os resultados referente a massa específica, absorção e o índice de vazios. Os prefixos 0, 1 e 2 na identificação da Tabela 15 representam os teores de fibras.

Tabela 15 – Massas obtidas.

Identificação	Teor de fibra	Massa após a estufa (g)	Massa Hidrostática (g)	Massa superfície seca (g)
0-CP1	0%	0,626	0,365	0,634
0-CP2	0%	0,646	0,379	0,654
0-CP3	0%	0,606	0,354	0,615
Média	-	0,626	0,366	0,634
1-CP1	1%	0,626	0,377	0,635
1-CP2	1%	0,650	0,390	0,658
1-CP3	1%	0,644	0,385	0,649
Média	-	0,640	0,384	0,647
2-CP1	2%	0,641	0,389	0,650
2-CP2	2%	0,641	0,394	0,650
2-CP3	2%	0,640	0,391	0,649
Média	-	0,640	0,391	0,649

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Segundo Helene (1993), o concreto pode ser classificado por meio da absorção de água (A) e porosidade. Ainda conforme o mesmo autor, concretos duráveis apresentam $A < 4,2\%$, concretos normais apresentam $4,2\% < A < 6,3\%$ e concretos deficientes apresentam $A > 6,3\%$. Baseado no estudo realizado por Helene (1993), como já era esperado, o UHPC, UHPFRC-1% e UHPFRC-2% apresentam uma baixíssima absorção de água, como pode ser observado na Tabela 16. Logo, os materiais desenvolvidos nessa pesquisa é caracterizado como duráveis.

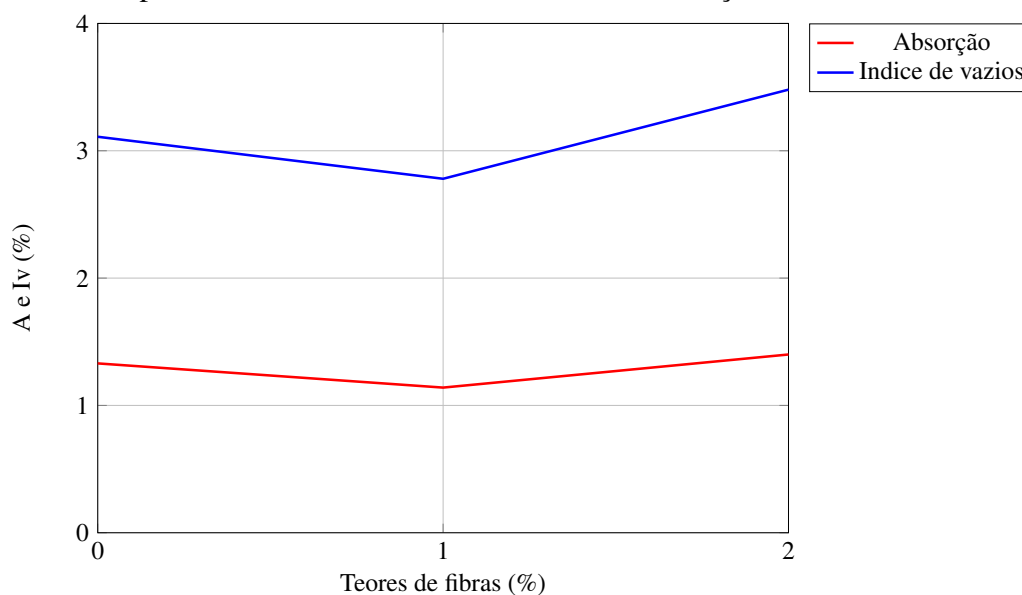
Tabela 16 – Índice de vazios, absorção e massa específica.

Identificação	Índice de vazios (%)	Absorção (%)	Massa específica seca (g/cm^3)	Massa específica real (g/cm^3)
0-CP1	2,973	1,277	2,327	2,356
0-CP2	2,909	1,238	2,349	2,378
0-CP3	3,448	1,485	2,321	2,356
Média	3,110	1,333	2,332	2,363
1-CP1	3,488	1,437	2,426	2,461
1-CP2	2,985	1,230	2,425	2,455
1-CP3	1,893	0,776	2,439	2,458
Média	2,788	1,147	2,430	2,458
2-CP1	3,448	1,404	2,455	2,490
2-CP2	3,515	1,404	2,503	2,539
2-CP3	3,488	1,406	2,480	2,515
Média	3,483	1,404	2,479	2,514

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

A NBR 8953 (ABNT, 2015c) classifica os concretos para fins estruturais por meio da massa específica, grupo de resistência e consistência. Entretanto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) engloba apenas concreto com resistência à compressão até 90 MPa, nesse sentido o UHPC e o UHPFRC desenvolvidos não estão nos grupos de resistência da referente norma. Porém, a NBR 9778 (ABNT, 2009) classifica como concreto convencional aqueles que apresentam massa específica de $2,0 g/cm^3$ a $2,8 g/cm^3$. Analisando a Tabela 16 todas as massas específicas estão dentro dos limites da NBR 9778 (ABNT, 2009). Logo, o UHPC e o UHPFRC apresentam elevada resistência à compressão e excelente comportamento físico-mecânico e, além disso, apresentam similaridade na massa específica com o concreto convencional. Como mostra a Figura 85, a absorção tem relação direta com o índice de vazios. Além disso, as fibras, sua orientação, distribuição, a relação L/d e o formato do CP podem influenciar nos resultados. Por exemplo, o UHPFRC-2% apresentou um índice de vazios 20% superior ao UHPFRC-1%. O UHPC sem fibras obteve um I_v superior ao UHPFRC-1%, na ordem de 10%.

Figura 85 – Compatibilidade entre o índice de vazios e a absorção.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Segundo Whiting e Nagi (1998), o índice de vazios deve ser menor que 6% para garantir um concreto durável e resistente. Como pode ser visto na Tabela 16, em todas as médias o índice de vazios é menor do que 3,5%, ou seja, quase metade do que é recomendável pelos autores. Em relação à absorção de água, Kosmatka *et al.* (2002) recomendam absorção entre 2% a 5% todos os dados experimentais ficaram dentro dos limites estabelecidos pelos autores.

Em consonância com o discorrido, anteriormente, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) o concreto deve ter relação a/c inferior à 0,45 e resistência à compressão superior à 40 MPa para a classe de agressividade ambiental IV, essa é a classe mais agressiva das normas brasileiras. A classe de agressividade IV é considerada para as regiões com respingos de maré, tanques industriais, indústrias químicas, galvanoplastia e demais ambientes agressivos. No presente trabalho, a relação a/c foi de 0,20 e resistência à compressão de 151 MPa, logo o concreto desensolvido pode ser utilizado em todas as classes de agressividade ambiental dispostas na NBR 6118 (ABNT, 2014).

6.8.2 Absorção de água por capilaridade

Nas Tabelas 17 e 18 estão dispostos os resultados sobre a absorção por capilaridade. Segundo a NBR 9779 (ABNT, 2012), deve ser realizada a estabilização da massa seca, de modo que a diferença entre os CPs não seja superior a 0,5%. Porém, como já foi dito anteriormente, a adição de fibras metálicas foi realizada em relação ao volume total de materiais e os CPs de cada

traço foram moldados em um único processo de mistura. Desse modo, a estabilização requerida pela NBR 9779 (ABNT, 2012) não é possível ser alcançada no UHPFRC-1% e UHPFRC-2%. Em suma, quando a adição de fibras é realizada em relação ao volume de materiais e é realizado uma única moldagem para vários CPs não é possível garantir que todos os CPs possuam a mesma quantidade de fibras.

A adição de fibras em relação ao volume total de materiais foi realizada em consonância com as pesquisas de Christ *et al.* (2019), Fang *et al.* (2020), Fehling *et al.* (2014), Abbass e Khan (2018), Graybeal e Baby (2013) e Middendorf *et al.* (2020). A adição de fibras em relação à massa do cimento não é capaz de conferir ao UHPC a ductilidade necessária para evitar uma ruptura frágil. Logo, para mitigar essa deficiência, a adição foi realizada em função do volume. Essa explicação é necessária, pois como mostra a Tabela 17, o UHPFRC com 2% de fibras apresentou maior massa quando comparado com o UHPC e UHPFRC-1%. Em síntese, a adição de fibras tende a aumentar a massa seca e, indiretamente, a saturada.

Tabela 17 – Verificação da massa seca e saturada.

Identificação	Massa seca (g)	Msat-3h (g)	Msat-6h (g)	Msat-24h (g)	Msat-48h (g)	Msat-72h (g)
0-CP1	452,68	454,89	455,54	455,33	455,43	455,47
0-CP2	458,94	461,33	461,35	461,49	461,76	461,63
0-CP3	450,83	452,90	452,90	453,05	453,20	453,26
0-CP4	458,31	460,41	460,48	460,66	461,03	460,94
0-CP5	459,32	461,40	461,51	461,74	461,80	461,95
1-CP1	457,58	459,49	459,52	459,67	459,82	460,2
1-CP2	459,76	462,13	462,19	462,44	462,56	462,72
1-CP3	465,17	467,30	467,31	467,55	467,79	467,81
1-CP4	473,69	475,92	475,97	476,12	476,25	476,51
1-CP5	465,81	467,88	467,9	468,06	468,18	468,53
2-CP1	489,29	491,87	491,94	492,11	492,30	492,34
2-CP2	483,94	485,87	485,93	486,47	486,41	486,53
2-CP3	493,31	495,90	495,81	495,95	496,06	496,37
2-CP4	471,31	473,46	473,40	473,71	474,15	474,40
2-CP5	—	—	—	—	—	—

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Tabela 17, percebe-se que para todos os traços foram ensaiados cinco CPs. Porém, no CP5 com 2% de fibras no processo de moldagem apresentou uma segregação excessiva, desse modo o CP5 foi descartado. A Tabela 18 mostra a evolução da capilaridade em função do tempo.

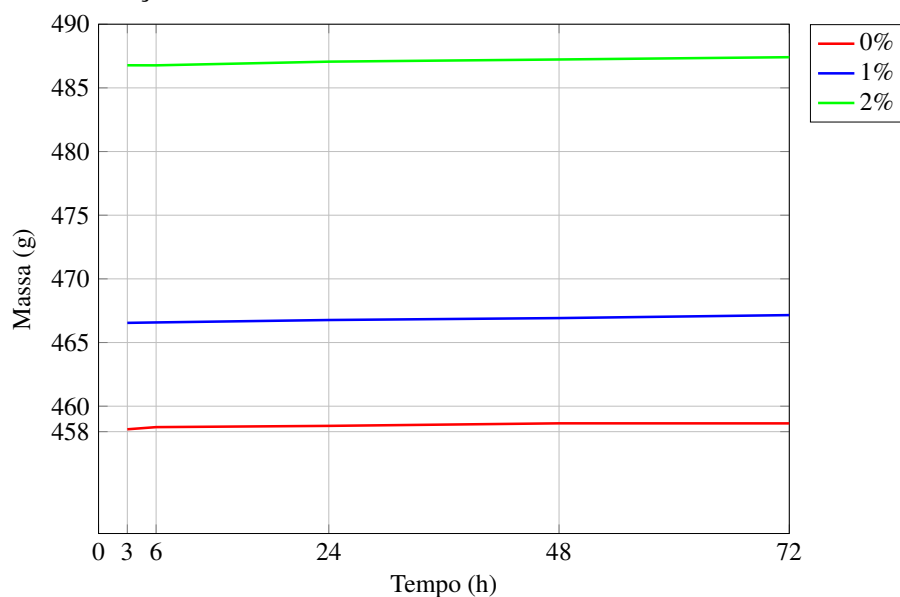
Tabela 18 – Capilaridade em função do tempo.

Tempo (horas)	C-0%(g/cm ³)	C-1%(g/cm ³)	C-2%(g/cm ³)
3	0,110	0,109	0,117
6	0,119	0,110	0,117
24	0,124	0,120	0,132
48	0,134	0,128	0,140
72	0,134	0,140	0,150

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Tabela 18, percebe-se que o aumento de adição de fibras acarreta no aumento da capilaridade. O UHPFRC-2% apresentou uma capilaridade de 11% e 7% superior ao UHPC e UHPFRC-1%, respectivamente. Isso ocorreu, pois como foi abordado na Figura 85 o UHPFRC-2% apresentou maior absorção e índice de vazios, em consequência, aumentou a capilaridade. A Figura 86 mostra a estabilização da massa.

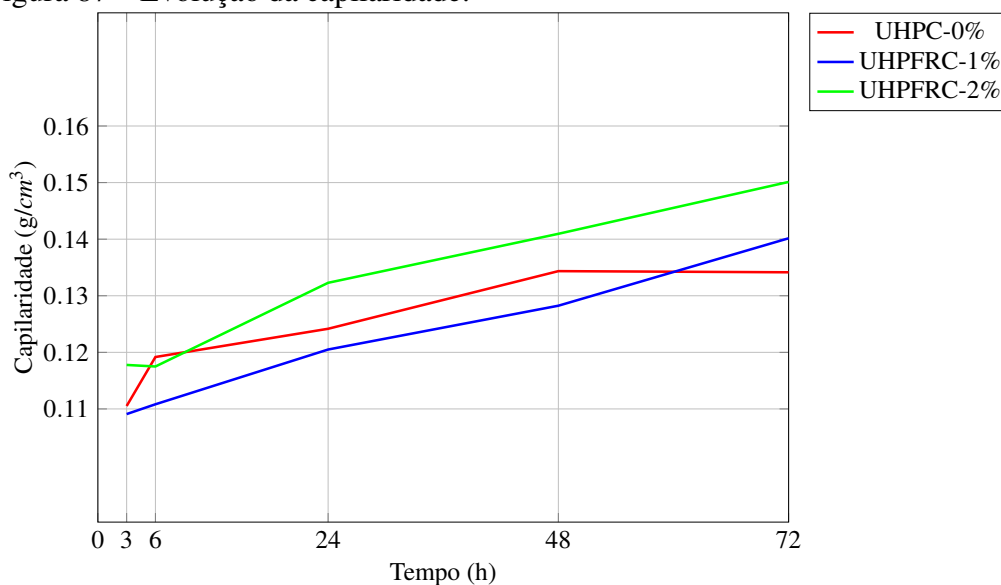
Figura 86 – Estabilização da massa.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Graficamente a evolução da capilaridade pode ser visualizada na Figura 87. Como pode ser visto, o UHPC sem fibras apresentou uma estabilização da capilaridade entre 48 e 72 horas. Já no UHPC com fibras percebe-se que a estabilização da capilaridade não ocorreu, esse efeito pode ter ocorrido devido à distribuição, orientação e volume de fibras, pois a estabilização da massa ocorreu conforme abordado na Figura 86.

Figura 87 – Evolução da capilaridade.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

6.9 Resultados da análise numérica

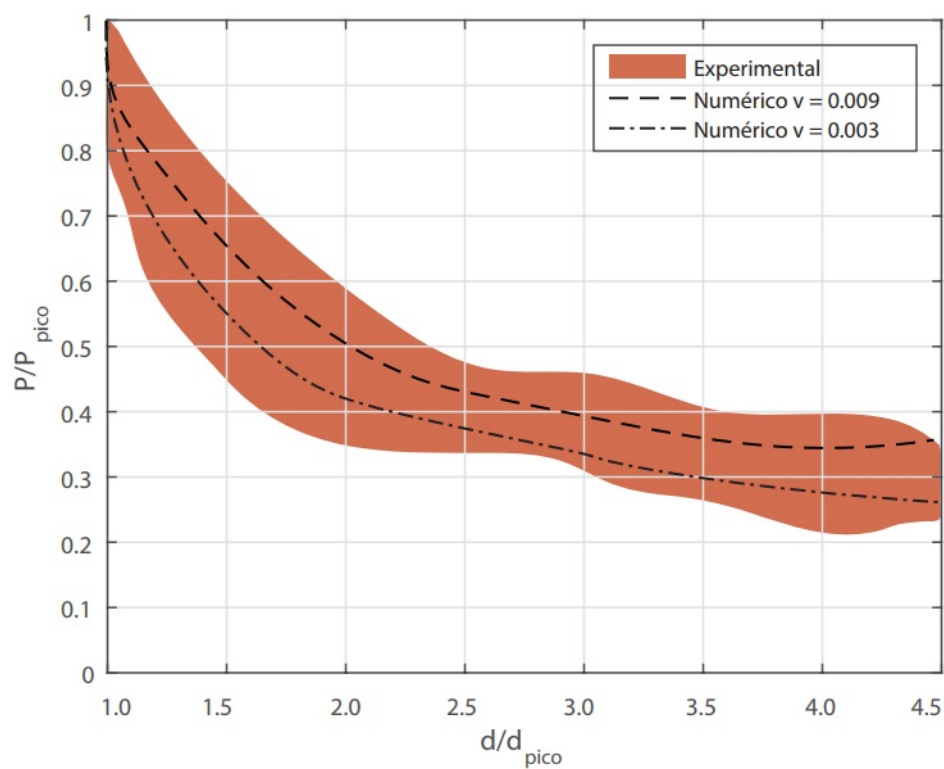
Os resultados a seguir foram obtidos por meio da validação das modelagens e simulações numéricas dos ensaios de tração uniaxial e flexão de quatro pontos. Desse modo, são apresentados os resultados para o UHPC e UHPFRC.

6.9.1 Simulação numérica do ensaio de tração direta

Para efeito de comparação, os resultados experimentais obtidos na Seção 6.2.2, foram normalizados. Assim sendo, foi possível plotar os gráficos das Figuras 88 e 89 juntamente com a resposta numérica.

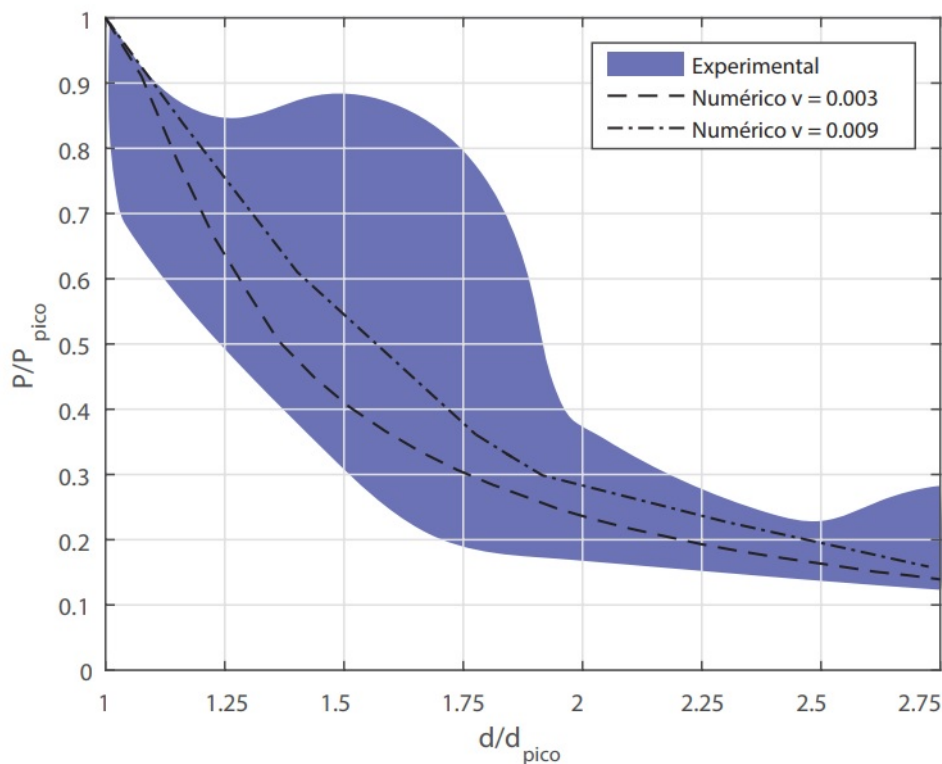
Nas modelagens foi notado que o aumento da viscosidade acarretava em um aumento da força de ruptura e, além disso, afastava a resposta numérica do experimental. Isso é importante ressaltar, pois no CDP o ideal é atribuir zero para essa propriedade. Entretanto, quando se atribui zero à essa propriedade há problemas de convergência. Por isso, foi realizado esse estudo paramétrico para balizar o valor ideal para essa propriedade.

Figura 88 – Carga x deslocamento pós-pico - Tração direta (normalizado) [1% de fibras].



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

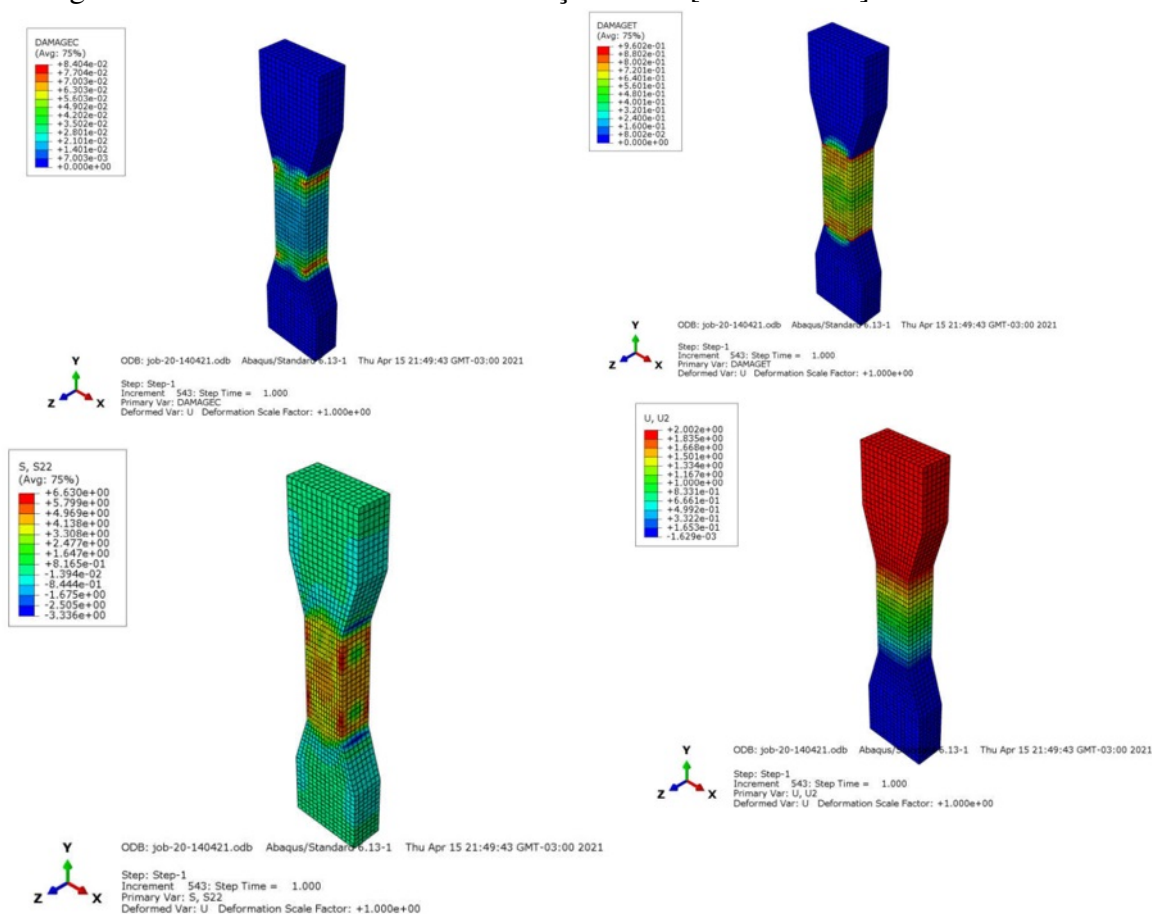
Figura 89 – Carga x deslocamento pós-pico - Tração direta (normalizado) [2% de fibras].



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando as Figuras 88 e 89 pode-se afirmar que os ensaios de tração uniaxial com 2% de fibras apresentam maior variabilidade dos resultados. Isso ocorre, pois o aumento do volume das fibras ocasionam em uma ruptura mais dúctil. Entretanto, os resultados numéricos são satisfatórios para os dois teores de fibras. Como pode ser visto, as curvas dos modelos numéricos ficaram dentro dos limites dos resultados experimentais. Nesse sentido, pode-se afirmar, que as condições de contorno, as propriedades lineares e não lineares e o modelo constitutivo utilizado convergiram para a resposta obtida via ensaios experimentais. Na Figura 90 é possível visualizar a tensão, deslocamento, dano na compressão e na tração.

Figura 90 – Resultados numéricos - Tração direta [1% de fibras].



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

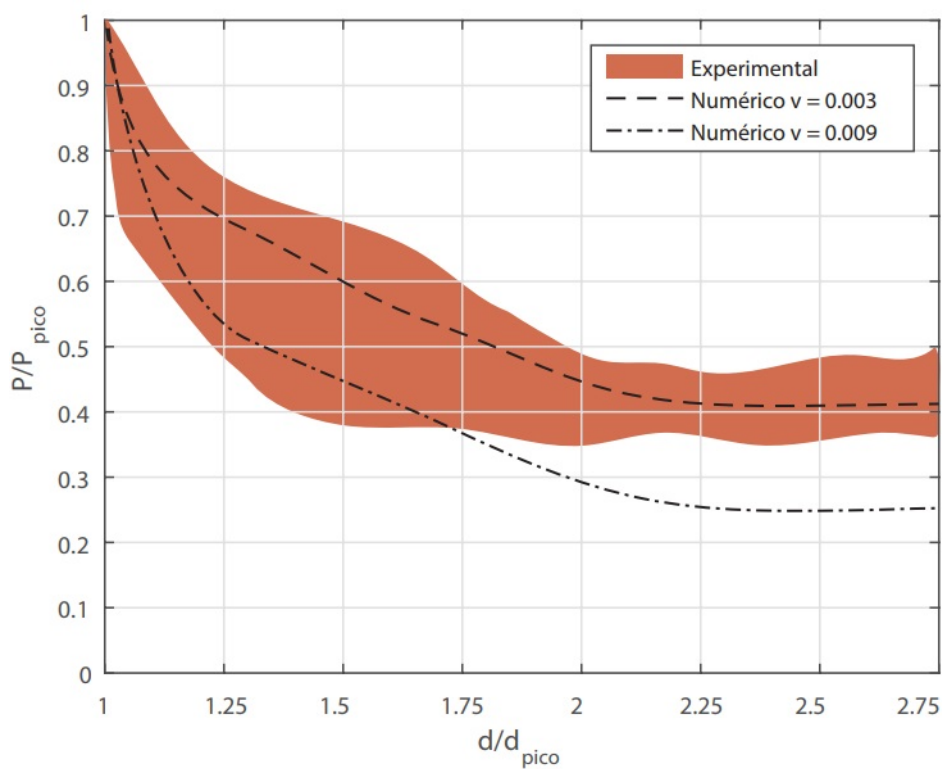
Analisando a Figura 90 fica notório a compatibilidade com o programa o experimental desensolvido, onde as maiores tensões ficaram no centro do CP e o deslocamento foi maior região em contato com os parafusos.

6.9.2 Simulação numérica do ensaio de flexão com quatro pontos

Assim como foi realizado para o ensaio de tração uniaxial, no ensaio de tração na flexão com quatro pontos, os resultados foram normalizados no trecho pós-pico para efeito de comparação com a resposta numérica.

Na flexão também foi realizado um estudo paramétrico sobre o efeito da viscosidade. Analisando a Figuras 91 é notório que o aumento da viscosidade aumentou a força de ruptura e, além disso, afastou a resposta numérica dos resultados experimentais.

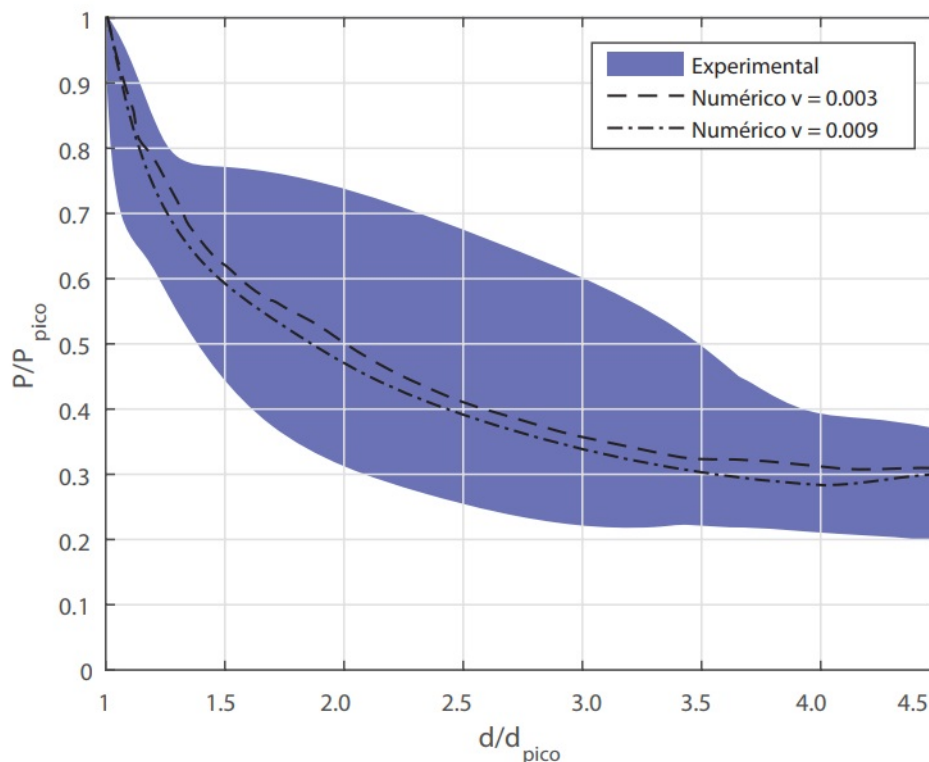
Figura 91 – Carga x deslocamento pós-pico - Tenacidade (normalizado) [1% de fibras].



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Figura 92 percebe-se que o aumento da viscosidade não ocasionou disparidade dos resultados. Além disso, é notório que o modelo com 2% de fibras apresenta maior dispersão dos resultados experimentais.

Figura 92 – Carga x deslocamento pós-pico - Tenacidade (normalizado) [2% de fibras].

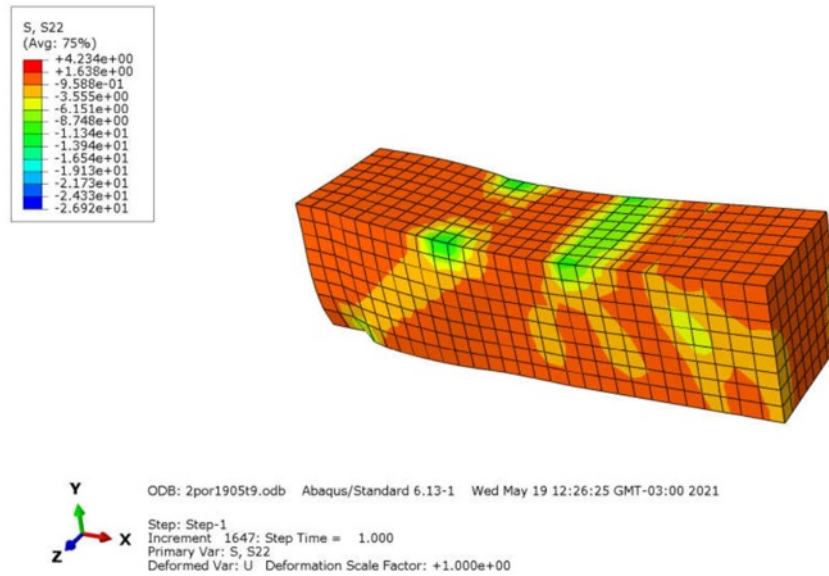


Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Diante disso, pode-se concluir que o CDP pode ser utilizado na validação numérica do UHPC e UHPFRC sujeitos à tração uniaxial e flexão. Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados, tais como: a apresentação do comportamento não linear na tração, o modelo de dano utilizado para representar a falha do material e um domínio sobre os parâmetros complementares utilizados no CDP.

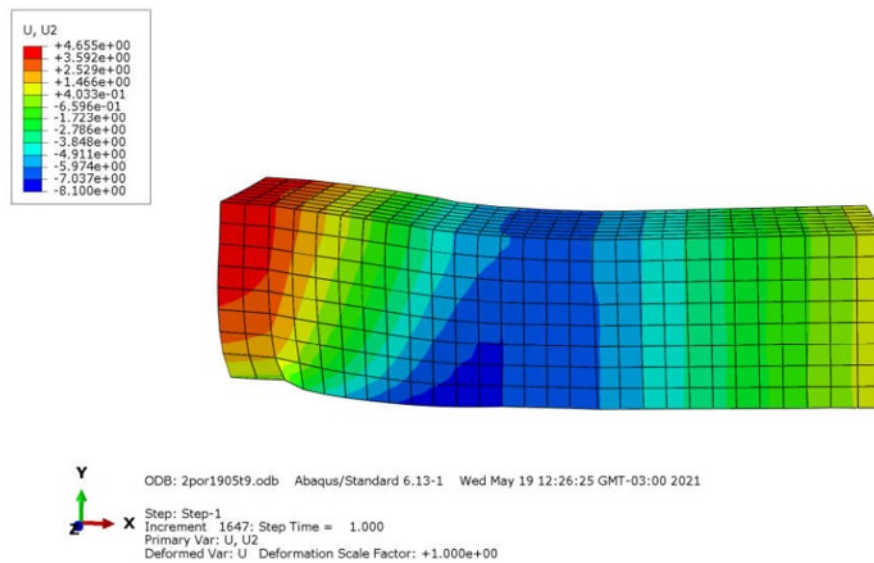
O comportamento pós-pico é extremamente importante para esses materiais cimentícios de alta performance, uma vez que, apresentam ruptura muito frágil. Devido à elevada resistência à compressão, esses materiais apresentam maior resistência à tração. Portanto, a adição de fibras conferem ao UHPC a ductilidade necessária para ser utilizado em projetos de estruturas. Como não há nenhuma normalização a respeito dos materiais desenvolvidos, os resultados aqui apresentados, podem ser utilizados para critérios de projetos. Por exemplo, a NBR 6118 (ABNT, 2014), utiliza o diagrama paábola-retângulo para concreto convencional e Fehling *et al.* (2014) propuseram diagramas similares. Nas Figuras 93, 94, 95 e 96 é possível visualizar a tensão, deslocamento, dano na compressão e na tração.

Figura 93 – Resultados numéricos - flexão [2% de fibras], tensão.



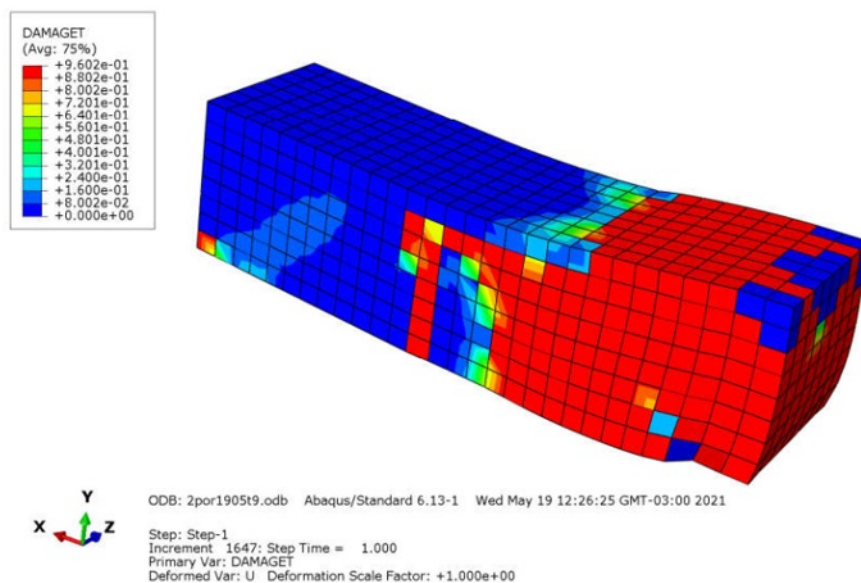
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 94 – Resultados numéricos - flexão [2% de fibras], deslocamento.



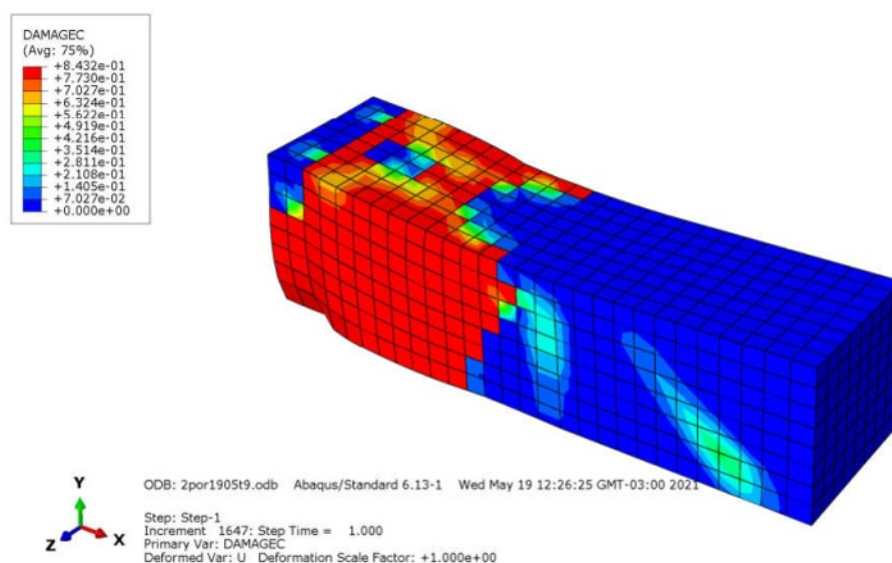
Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 95 – Resultados numéricos - flexão [2% de fibras], dano na tração.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Figura 96 – Resultados numéricos - flexão [2% de fibras], dano na compressão.



Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Figura 93 percebe-se que a tensão foi crescente na direção dos apoios. E o dano na compressão, tração e o deslocamento na direção y foi maior na direção do apoio. Isso ocorreu, pois, no LMCC, não havia os apoios ideais para realização desse ensaio. Nesse sentido, foi necessário confeccionar um apoio para realização desse ensaio. Logo, foi por esse motivo que os maiores deslocamentos não ficaram no terço médio do CP em análise.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi realizada a caracterização mecânica do *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) e *Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete* (UHPFRC). O traço adotado foi obtido por meio do empacotamento de partículas, exclusão do agregado graúdo, baixíssima relação água/cimento e com incorporação de fibras metálicas. Percebeu-se que, a adição de fibras em volume, tornou a ruptura mais dúctil na compressão, tração indireta, tração uniaxial, flexão e, em síntese, melhoraram todas as propriedades não lineares. Esse comportamento mecânico já era esperado, pois foi amplamente discutido tendo como base a literatura contemporânea. Os resultados experimentais evidenciam que o aumento do volume de fibras acarretam em acréscimo da resistência à compressão, tração e flexão, para materiais submetidos a cura padrão. Além disso, há ganhos significativos para as propriedades físicas e de durabilidade. Por exemplo, o material foi caracterizado como durável, pois apresentam baixíssima absorção por capilaridade, baixo índice de vazios e alta velocidade de propagação da ultrassônica.

Conforme abordado nos resultados, os maquinários disponíveis no LMCC apresentam algumas limitações, por exemplo, capacidade de carga do maquinário, moldes dos CPs, argamassadeira de baixo volume e garra inadequada para o ensaio de tração uniaxial. Portanto, essas limitações ocasionaram em problemas nas curvas de força-deslocamento, pois quando a força atingia a tensão de pico ocorria a queda brusca de tensão. A queda brusca de tensão ocasiona em problemas de convergência do modelo numérico, percebeu-se que os modelos de Carreira e Chu (1985) e Saenz (1964) conseguem representar o comportamento linear e não linear dos concretos de alta performance desenvolvidos. O comportamento não linear na tração foi por meio da energia de fratura, percebeu-se que o modelo utilizado pelo CEB-FIB (BÉTON, 2010b) foi o que mais se adequou a essa pesquisa. Curvas de tensão-deformação na tração não foram utilizadas, pois foi constatado que a resposta do modelo numérico se afastava dos resultados experimentais.

Em síntese, todos os objetivos do presente estudo foram alcançados. Foi possível obter uma resistência à compressão superior a 150 MPa, à tração superior a 14 MPa, à flexão superior a 21 MPa e módulo de elasticidade superior a 52 GPa. Nos ensaios de durabilidade todos as amostras obtiveram uma velocidade de propagação da onda ultrassônica superior a 4500 m/s. A absorção de água ficou abaixo de 1,5% e o índice de vazios ficou inferior a 3,5% e absorção por capilaridade inferior a 0,150 g/cm³. Todos esses resultados podem justificar o

uso do UHPC e UHPFRC em elementos estruturais, pois podem tornar as estruturas mais leves, duráveis e com menor custo de intervenção ao longo da vida útil.

Para trabalhos futuros, é recomendado que se estude a utilização de outros materiais cimentícios secundários, tais como: sílica, escória de alto forno e quartzo. Além disso, é recomendável a troca do tipo de cimento, redução do consumo de cimento, redução da relação a/c e um estudo mais amplo sobre o procedimento de mistura. Também é sugerido realizar uma análise micro-mecânica. Este trabalho contribuiu na caracterização mecânica, porém devido às limitações não foi possível realizar um estudo em elementos em escala real. Nesse sentido, para trabalhos futuros é aconselhável um estudo em vigas e pilares em escala real. Além disso, utilizar esses materiais como reforço em estruturas reais.

O modelo proposto por Mansur *et al.* (1999) leva em consideração a tipologia, o volume, comprimento e diâmetro das fibras. Assim sendo, os modelos que levam em consideração às fibras podem ser utilizados para verificar a influência das fibras nas curvas de tensão-deformação e, além disso, um estudo aprofundado sobre a orientação das fibras na matriz. Para trabalhos com ênfase em análise numérica, é recomendável que se estude outros modelos constitutivos para representar o material. Por exemplo, o modelo de Mazars *et al.* (2015) pode ser facilmente implementado no ABAQUS para realizar análise não lineares. Um estudo minucioso sobre os parâmetros do CDP também é recomendável.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, S.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 75, p. 429–441, jan. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017>>.
- ABBASS, W.; KHAN, M. I. Mechanical properties of hybrid steel/PVA fibers reinforced high strength concrete. **MATEC Web of Conferences**, EDP Sciences, v. 199, p. 11005, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/mateconf/201819911005>>.
- ABDULKAREEM, O. M.; FRAJ, A. B.; BOUASKER, M.; KHELIDJ, A. Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 163, p. 235–246, fev. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.107>>.
- ABNT. **NBR 5738: Concreto-Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto-Especificação**. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2019.
- ACI. **Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10)**. [S.l.]: ACI, 2010.
- AFROUGHSAKET, V.; BIOLZI, L.; OZBAKKALOGLU, T. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. **Journal of Materials Science**, Springer Science and Business Media LLC, v. 51, n. 14, p. 6517–6551, mar. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4>>.
- AHLBORN, T.; KOLLMORGEN, G. **Impact of Age and Size on the Mechanical Behavior of Ductal®**. [S.l.], 2004.
- AÏTCIN, P.-C. **Binders for durable and sustainable concrete**. [S.l.]: CRC Press, 2007.
- AÏTCIN, P.-C. Portland cement. In: **Science and Technology of Concrete Admixtures**. [S.l.]: Elsevier, 2016. p. 27–51.
- AÏTCIN, P.-C.; LESSARD, J.-M. The composition and design of high-strength concrete and ultrahigh-strength concrete. In: **Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete**. [S.l.]: Elsevier, 2019. p. 171–192.
- ALKAYSI, M.; EL-TAWIL, S. Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance. **Materials and Structures**, Springer Science and Business Media LLC, v. 49, n. 10, p. 4185–4200, dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1617/s11527-015-0780-6>>.
- ALMANSOUR, H.; LOUNIS, Z.; ENG, P. Innovative design of precast/prestressed girder bridge superstructures using ultra high performance concrete. In: **Annual Conference of the transportation Association of Canada**. [S.l.: s.n.], 2008.
- ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; MARTÍ-VARGAS, J. R.; HALE, W. M. Mixture-proportioning of economical UHPC mixtures. **Journal of Building Engineering**, Elsevier BV, v. 27, p. 100970, jan. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100970>>.

ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; PRINZ, G. S.; HALE, W. M. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 153, p. 918–928, 2017.

ANDREASEN, A. Über die beziehung zwischen kornabstufung und zwischenraum in produkten aus losen körnern (mit einigen experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, Springer, v. 50, n. 3, p. 217–228, 1930.

ARAUJO, A. V. P.; SILVA, F. A. N.; NOGUEIRA, C. L.; SILVA, J. A. Evaluation of mechanical damage in concrete subjected to uniaxial compression and tensile by diametrical compression with longitudinal and transverse ultrasonic waves. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, FapUNIFESP (SciELO), v. 11, n. 6, p. 1160–1177, dez. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000600002>>.

ARORA, A.; AGUAYO, M.; HANSEN, H.; CASTRO, C.; FEDERSPIEL, E.; MOBASHER, B.; NEITHALATH, N. Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, Elsevier BV, v. 103, p. 179–190, jan. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.013>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-2**: Alvenaria estrutural-blocos de concreto.parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681**: Calda de cimento para injeção. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento portland—preparo, controle, recebimento e aceitação—procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto-procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto-determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ASTM. Astm c 597: Standard test method for pulse velocity through concrete. In: AM. SOC. TEST. MATER WEST CONSHOHOCKEN, PA, USA. [S.l.], 2016.

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

BAE, Y.; PYO, S. Ultra high performance concrete (UHPC) sleeper: Structural design and performance. **Engineering Structures**, Elsevier BV, v. 210, p. 110374, maio 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110374>>.

BARROS, J. Steel fibre reinforced concrete: Material properties and structural applications. In: **Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications**. Elsevier, 2011. p. 95–155. Disponível em: <<https://doi.org/10.1533/9780857095583.2.95>>.

BASTOS, G.; PATIÑO-BARBEITO, F.; PATIÑO-CAMBEIRO, F.; ARMESTO, J. Admixtures in cement-matrix composites for mechanical reinforcement, sustainability, and smart features. **Materials**, MDPI AG, v. 9, n. 12, p. 972, nov. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma9120972>>.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2019.

BAŽANT, Z. P. Nonlocal damage theory based on micromechanics of crack interactions. **Journal of engineering mechanics**, American Society of Civil Engineers, v. 120, n. 3, p. 593–617, 1994.

BÉTON, F. I. D. Model code 2010—first complete draft. **fib Bulletin**, n. 55, p. 318, 2010.

BÉTON, F. I. D. Model code 2010—first complete draft. **fib Bulletin**, n. 55, p. 318, 2010.

BIRTEL, V.; MARK, P. Parameterised finite element modelling of rc beam shear failure. In: **ABAQUS users' conference**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 14.

BRÜHWILER, E. Recommendation: Ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (uhpfrc). **Construction material, dimensioning and application**. Lausanne, Switzerland, 2016.

BSI. **BS 8110-2: 1985 - Structural use of concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances**. London, UK: British Standards Institution, 1985.

BSI. **Eurocode 2: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings**. London, UK: British Standards Institution, 2004.

BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. Ultra high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, FapUNIFESP (SciELO), v. 10, n. 4, p. 957–971, ago. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000400011>>.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. [S.l.]: Pini, 1988.

CAPRARO, D. F. A.; CAPRARO, A. P. B.; ARGENTA, M. A.; MEDEIROS, M. H. F. Experimental and numerical evaluation of mortar specimens shape and size influence on compression tests. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, FapUNIFESP (SciELO), v. 12, n. 2, p. 429–444, abr. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000200013>>.

CAREY, A.; HOWARD, I.; SCOTT, D.; MOSER, R.; SHANNON, J.; KNIZLEY, A. Impact of materials, proportioning, and curing on ultra-high-performance concrete properties. **ACI Materials Journal**, v. 117, n. 1, 2020.

CARPINTERI, A.; CHIAIA, B.; NEMATI, K. M. Complex fracture energy dissipation in concrete under different loading conditions. **Mechanics of Materials**, Elsevier, v. 26, n. 2, p. 93–108, 1997.

CARREIRA, D. J.; CHU, K.-H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. In: **Journal Proceedings**. [S.l.: s.n.], 1985. v. 82, n. 6, p. 797–804.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, FapUNIFESP (SciELO), v. 55, n. 333, p. 18–32, mar. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s0366-69132009000100003>>.

CEB-FIP, M. 90. design of concrete structures. ceb-fip-model-code 1990. **British Standard Institution, London**, 1990.

CHEN, W.; SALEEB, A. **Constitutive equations for engineering materials, Vol. 1: Elasticity and modeling**. [S.l.]: Wiley, New York, 1982.

CHEN, W.-F.; HAN, D.-J. **Plasticity for structural engineers**. [S.l.]: J. Ross Publishing, 2007.

CHRIST, R.; PACHECO, F.; SIMONETTI, C.; TUTIKIAN, B. F. Conceitos e aplicações do concreto de ultra alto desempenho: Panorama nacional e internacional. **Revista Diálogos: Economia e Sociedade (ISSN: 2594-4320)**, n. 1, p. 89–102, 2019.

CODE, P. Eurocode 2: Design of concrete structures-part 1-1: General rules and rules for buildings. 2005.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, FapUNIFESP (SciELO), v. 10, n. 5, p. 998–1024, set. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000500004>>.

DERE, Y.; KOROGLU, M. A. Nonlinear fe modeling of reinforced concrete. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 6, n. 1, p. 71–74, 2017.

DESPREZ, C.; MAZARS, J.; KOTRONIS, P.; PAULTRE, P. Damage model for frp-confined concrete columns under cyclic loading. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 48, p. 519–531, 2013.

DOIRON, G. Pier repair/retrofit using uhpc—examples of completed projects in north america. In: IOWA STATE UNIVERSITY DIGITAL PRESS. **International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete**. [S.l.], 2016. v. 1, n. 1.

DRAGON, A.; MROZ, Z. A continuum model for plastic-brittle behaviour of rock and concrete. **International Journal of Engineering Science**, Elsevier, v. 17, n. 2, p. 121–137, 1979.

FANG, C.; ALI, M.; XIE, T.; VISINTIN, P.; SHEIKH, A. H. The influence of steel fibre properties on the shrinkage of ultra-high performance fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 242, p. 117993, maio 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117993>>.

FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; WALRAVEN, J.; LEUTBECHER, T.; FRÖHLICH, S. **Ultra-high performance concrete UHPC: Fundamentals, design, examples**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.

FEO, L.; ASCIONE, F.; PENNA, R.; LAU, D.; LAMBERTI, M. An experimental investigation on freezing and thawing durability of high performance fiber reinforced concrete (HPFRC). **Composite Structures**, Elsevier BV, v. 234, p. 111673, fev. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111673>>.

FUNK, J.; DINGER, D. Particle packing. vi: Applications of particle size distribution concepts. **Interceram**, v. 43, n. 5, p. 350–353, 1994.

FURNAS, C. C. **Flow of gases through beds of broken solids**. [S.l.]: US Government Printing Office, 1929. v. 307.

GENIKOMSOU, A. S.; POLAK, M. A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in abaqus. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 98, p. 38–48, 2015.

GRASSL, P.; JIRÁSEK, M. Damage-plastic model for concrete failure. **International journal of solids and structures**, Elsevier, v. 43, n. 22-23, p. 7166–7196, 2006.

GRASSL, P.; XENOS, D.; NYSTRÖM, U.; REMPLING, R.; GYLLTOFT, K. Cdpm2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. **International Journal of Solids and Structures**, Elsevier, v. 50, n. 24, p. 3805–3816, 2013.

GRAYBEAL, B.; DAVIS, M. Cylinder or cube: strength testing of 80 to 200 mpa (11.6 to 29 ksi) ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, American Concrete Institute, v. 105, n. 6, p. 603, 2008.

GRAYBEAL, B. A. Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **ACI materials journal**, American Concrete Institute, v. 104, n. 2, p. 146, 2007.

GRAYBEAL, B. A.; BABY, F. Development of direct tension test method for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, v. 110, n. 2, 2013.

GRAYBEAL, B. A.; STONE, B. *et al.* **Compression response of a rapid-strengthening ultra-high performance concrete formulation.** [S.l.], 2012.

GU, C.; YE, G.; SUN, W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. **Science China Technological Sciences**, Springer Science and Business Media LLC, v. 58, n. 4, p. 587–599, jan. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11431-015-5769-4>>.

GUNES, O.; YESILMEN, S.; GUNES, B.; ULM, F.-J. Use of UHPC in bridge structures: Material modeling and design. **Advances in Materials Science and Engineering**, Hindawi Limited, v. 2012, p. 1–12, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2012/319285>>.

HABER, Z. B.; VARGA, I. De la; GRAYBEAL, B. A.; NAKASHOJI, B.; EL-HELOU, R. **Properties and behavior of UHPC-class materials.** [S.l.], 2018.

HASHIM, D. T.; HEJAZI, F.; LEI, V. Y. Simplified constitutive and damage plasticity models for uhpfrc with different types of fiber. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, Springer, v. 14, n. 1, p. 1–21, 2020.

HE, Z. hai; DU, S. gui; CHEN, D. Microstructure of ultra high performance concrete containing lithium slag. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier BV, v. 353, p. 35–43, jul. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.03.063>>.

HELENE, P. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. **São Paulo**, v. 231, p. 14, 1993.

HILLERBORG, A.; MODÉER, M.; PETERSSON, P.-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 6, n. 6, p. 773–781, 1976.

HUANG, H.; GAO, X.; WANG, H.; YE, H. Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 149, p. 621–628, 2017.

JASON, L.; HUERTA, A.; PIJAUDIER-CABOT, G.; GHAVAMIAN, S. An elastic plastic damage formulation for concrete: Application to elementary tests and comparison with an isotropic damage model. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, Elsevier, v. 195, n. 52, p. 7077–7092, 2006.

JIN, L.; ZHANG, R.; DOU, G.; XU, J.; DU, X. Experimental and numerical study of reinforced concrete beams with steel fibers subjected to impact loading. **International Journal of Damage Mechanics**, SAGE Publications, v. 27, n. 7, p. 1058–1083, jul. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1056789517721616>>.

JIRÁSEK, M. Non-local damage mechanics with application to concrete. **Revue française de génie civil**, Taylor & Francis, v. 8, n. 5-6, p. 683–707, 2004.

JONES, T.; CATHER, B. Ultra-high performance fibre-reinforced concrete. **Concrete Engineering International**, v. 9, n. 1, 2005.

JSCE. Method of tests for steel fiber reinforced concrete. **Concrete Library of JSCE, The Japan Society of Civil Engineers**, 1984.

KARTHIKEYAN, G.; BALAJI, M.; PAI, A. R.; KRISHNAN, A. M. High-performance concrete (HPC)—an innovative cement concrete mix design to increase the life span of structures. In: **Lecture Notes in Civil Engineering**. Springer Singapore, 2018. p. 189–199. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0_17>.

KHAYAT, K. H.; MENG, W.; VALLURUPALLI, K.; TENG, L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete — an overview. **Cement and Concrete Research**, Elsevier BV, v. 124, p. 105828, out. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105828>>.

KIM, Y. J.; WANG, J. Development of ultra-high-performance concrete with various silica admixtures. **ACI Materials Journal**, American Concrete Institute, v. 116, n. 2, p. 33–44, 2019.

KONG, F. K.; EVANS, R. H. **Reinforced and prestressed concrete**. [S.l.]: Springer, 2013.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. *et al.* **Design and control of concrete mixtures**. [S.l.]: Portland Cement Association Skokie, IL, 2002. v. 5420.

KRAHL, P. A.; CARRAZEDO, R.; DEBS, M. K. E. Mechanical damage evolution in UHPFRC: Experimental and numerical investigation. **Engineering Structures**, Elsevier BV, v. 170, p. 63–77, set. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.064>>.

KUMAR, S.; RAI, B. A review on wider application of supplementary cementitious materials on the development of high-performance concrete. **International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)**, v. 9, n. 8, p. 187–204, 2018.

LARRARD, F. D. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. [S.l.]: CRC Press, 1999.

LARRARD, F. D.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 32, n. 11, p. 1699–1704, 2002.

LARRARD, F. de; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 24, n. 6, p. 997–1009, 1994.

LEE, J.; FENVES, G. L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. **Journal of engineering mechanics**, American Society of Civil Engineers, v. 124, n. 8, p. 892–900, 1998.

LI, F.; CUI, Y.; CAO, C.; WU, P. Experimental study of the tensile and flexural mechanical properties of directionally distributed steel fibre-reinforced concrete. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, SAGE Publications, v. 233, n. 9, p. 1721–1732, jun. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1464420718782555>>.

LI, J.; WU, Z.; SHI, C.; YUAN, Q.; ZHANG, Z. Durability of ultra-high performance concrete—a review. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 255, p. 119296, 2020.

LI, P.; YU, Q.; BROUWERS, H. Effect of PCE-type superplasticizer on early-age behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 153, p. 740–750, out. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.145>>.

LIU, J.; SHI, C.; WU, Z. Hardening, microstructure, and shrinkage development of uhpc: A review. **Journal of Asian Concrete Federation**, v. 5, n. 2, p. 1–19, 2019.

LIU, J.; WU, C.; SU, Y.; LI, J.; SHAO, R.; CHEN, G.; LIU, Z. Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts. **Engineering Structures**, Elsevier BV, v. 173, p. 166–179, out. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.098>>.

LU, Z.-H.; ZHAO, Y.-G. Empirical stress-strain model for unconfined high-strength concrete under uniaxial compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 22, n. 11, p. 1181–1186, 2010.

LUBLINER, J.; OLIVER, J.; OLLER, S.; OÑATE, E. A plastic-damage model for concrete. **Int. J. Solids and Structures**, 1989.

LYDON, F.; BALENDRAN, R. Some observations on elastic properties of plain concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 16, n. 3, p. 314–324, 1986.

MA, J.; ORGASS, M.; DEHN, F.; SCHMIDT, D.; TUE, N. Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates. In: **International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 205–212.

MA, J.; SCHNEIDER, H. Properties of ultra-high-performance concrete. **Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER)**, Universität Leipzig Germany, v. 7, p. 25–32, 2002.

MAKITA, T.; BRÜHWILER, E. Damage models for uhpfrc and r-uhpfrc tensile fatigue behaviour. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 90, p. 61–70, 2015.

MANSUR, M.; CHIN, M.; WEE, T. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression. **Journal of materials in civil engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 11, n. 1, p. 21–29, 1999.

MAZARS, J.; HAMON, F.; GRANGE, S. A new 3d damage model for concrete under monotonic, cyclic and dynamic loadings. **Materials and structures**, Springer, v. 48, n. 11, p. 3779–3793, 2015.

MAZARS, J.; PIJAUDIER-CABOT, G. Continuum damage theory—application to concrete. **Journal of engineering mechanics**, American Society of Civil Engineers, v. 115, n. 2, p. 345–365, 1989.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2017.

MIDDENDORF, B.; FEHLING, E.; WETZEL, A. Ultra-high performance concrete and high performance construction materials. kassel university press, 2020.

MOSAVINEJAD, S. G.; LANGAROUDI, M. A. M.; BARANDOUST, J.; GHANIZADEH, A. Electrical and microstructural analysis of UHPC containing short PVA fibers. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 235, p. 117448, fev. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117448>>.

NAAMAN, A. **High Performance Fiber Cement Composites. High-performance Construction Materials: Science and Applications**. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, 2008.

NASRIN, S.; IBRAHIM, A. Finite-element modeling of uhpc hybrid bridge deck connections. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, Springer, v. 10, n. 3, p. 199–210, 2018.

NIS, A. Experimental studies of short concrete reinforced steel fiber beams under bending. **International Journal of Engineering Technologies-IJET**, v. 4, n. 1, p. 33–40, jan. 2018.

NORHASRI, M. M.; HAMIDAH, M.; FADZIL, A. M.; MEGAWATI, O. Inclusion of nano metakaolin as additive in ultra high performance concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 127, p. 167–175, nov. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.127>>.

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

OTTOSEN, N. S. Constitutive model for short-time loading of concrete. **Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE**, v. 105, p. 127–141, 1979.

PEREIRA, E. N. B.; BARROS, J. A. O.; CAMÕES, A. Steel fiber-reinforced self-compacting concrete: Experimental research and numerical simulation. **Journal of Structural Engineering**, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 134, n. 8, p. 1310–1321, ago. 2008. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2008\)134:8\(1310\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2008)134:8(1310))>.

POPOVICS, S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 3, n. 5, p. 583–599, 1973.

PRISCO, M. di; MAZARS, J. Crush-crack': a non-local damage model for concrete. **Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures**, Wiley Online Library, v. 1, n. 4, p. 321–347, 1996.

RAGUENEAU, F.; BORDERIE, C. L.; MAZARS, J. Damage model for concrete-like materials coupling cracking and friction, contribution towards structural damping: first uniaxial applications. **Mechanics of Cohesive-frictional Materials: An International Journal on Experiments, Modelling and Computation of Materials and Structures**, Wiley Online Library, v. 5, n. 8, p. 607–625, 2000.

RAHEEM, A. H. A.; MAHDY, M.; MASHALY, A. A. Mechanical and fracture mechanics properties of ultra-high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 213, p. 561–566, jul. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.298>>.

SADRMOMTAZI, A.; TAJASOSI, S.; TAHMOURESI, B. Effect of materials proportion on rheology and mechanical strength and microstructure of ultra-high performance concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 187, p. 1103–1112, out. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.070>>.

SAENZ, L. P. discussion of "equation for the stress-strain curve of concrete" by desayi and krishnan. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 61, p. 1229–1235, 1964.

SAHOO, K. K.; SARKAR, P.; DAVIS, R. Mechanical properties of silica fume concrete designed as per construction practice. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, Thomas Telford Ltd., v. 172, n. 1, p. 20–28, fev. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00085>>.

SARTORTI, A. L.; BARBOZA, L. da S.; CALIXTO, B. S. de A.; MOGI, P. G.; FLORIANO, M. de O.; GRANJEIRO, R. da C. TORÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS. **Revista Tecnológica**, Universidade Estadual de Maringá, v. 29, n. 1, p. 62–76, jan. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.4025/revtecnol.v29i1.50070>>.

SCHLEITING, M.; WETZEL, A.; KROOSS, P.; THIEMICKE, J.; NIENDORF, T.; MIDDENDORF, B.; FEHLING, E. Functional microfibre reinforced ultra-high performance concrete (FMF-UHPC). **Cement and Concrete Research**, Elsevier BV, v. 130, p. 105993, abr. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105993>>.

SCRIBIANI, P. Setra (service d'études techniques des routes et autoroutes). **SEA Applied to Multimodal Corridors Methodology Developed by France The Case of the North Corridor**, 2002.

SEIFAN, M.; MENDOZA, S.; BERENJIAN, A. Mechanical properties and durability performance of fly ash based mortar containing nano- and micro-silica additives. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 252, p. 119121, ago. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119121>>.

SHAIKH, F. U. A.; LUHAR, S.; AREL, H. Ş.; LUHAR, I. Performance evaluation of ultrahigh performance fibre reinforced concrete – a review. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 232, p. 117152, jan. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117152>>.

SHEN, W.; ZHANG, W.; WANG, J.; HAN, C.; ZHANG, B.; LI, J.; XU, G. The microstructure formation of c-s-h in the HPC paste from nano-scale feature. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, Informa UK Limited, v. 8, n. 4, p. 199–213, jan. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1564397>>.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z.; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: Part i. raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 101, p. 741–751, dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>>.

SIDODIKROMO, E. P.; CHEN, Z.; HABIB, M. Review of the cement-based composite ultra-high-performance concrete (uhpc). **The Open Civil Engineering Journal**, v. 13, n. 1, 2019.

SIMO, J. C.; JU, J. Strain-and stress-based continuum damage models—i. formulation. **International journal of solids and structures**, Elsevier, v. 23, n. 7, p. 821–840, 1987.

SINAEI, H.; SHARIATI, M.; ABNA, A. H.; AGHAEI, M.; SHARIATI, A. Evaluation of reinforced concrete beam behaviour using finite element analysis by abaqus. **Scientific Research and Essays**, Academic Journals, v. 7, n. 21, p. 2002–2009, 2012.

SINGH, M.; SHEIKH, A.; ALI, M. M.; VISINTIN, P.; GRIFFITH, M. Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 138, p. 12–25, 2017.

SOLHMIRZAEI, R.; KODUR, V. Modeling the response of ultra high performance fiber reinforced concrete beams. **Procedia engineering**, Elsevier, v. 210, p. 211–219, 2017.

SOLTANZADEH, F.; BARROS, J.; SANTOS, R. High performance fiber reinforced concrete for the shear reinforcement: Experimental and numerical research. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 77, p. 94–109, fev. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.003>>.

TAFRAOUI, A.; ESCADEILLAS, G.; LEBAILI, S.; VIDAL, T. Metakaolin in the formulation of UHPC. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 23, n. 2, p. 669–674, fev. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.018>>.

TAFRAOUI, A.; ESCADEILLAS, G.; VIDAL, T. Durability of the ultra high performances concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 112, p. 980–987, jun. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.169>>.

TOUFAR, W.; BORN, M.; KLOSE, E. Contribution of optimisation of components of different density in polydispersed particles systems. **Freiberger booklet A**, v. 558, p. 29–44, 1976.

WANG, R.; GAO, X.; HUANG, H.; HAN, G. Influence of rheological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 144, p. 65–73, jul. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.173>>.

WANG, X.; YU, R.; SONG, Q.; SHUI, Z.; LIU, Z.; WU, S.; HOU, D. Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density. **Cement and Concrete Research**, Elsevier BV, v. 126, p. 105921, dez. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105921>>.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. **Manual on control of air content in concrete**. [S.l.: s.n.], 1998.

WILLE, K.; KIM, D. J.; NAAMAN, A. E. Strain-hardening uhp-frc with low fiber contents. **Materials and Structures**, Springer, v. 44, n. 3, p. 583–598, 2011.

WILLE, K.; NAAMAN, A. E. Effect of ultra-high-performance concrete on pullout behavior of high-strength brass-coated straight steel fibers. **ACI Materials Journal**, American Concrete Institute, v. 110, n. 4, p. 451, 2013.

WILLE, K.; NAAMAN, A. E.; EL-TAWIL, S.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing. **Materials and Structures**, Springer Science and Business Media LLC, v. 45, n. 3, p. 309–324, ago. 2011.

WILLE, K.; NAAMAN, A. E.; PARRA-MONTESINOS, G. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. **ACI Materials Journal**, American Concrete Institute, v. 108, n. 1, 2011.

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K. H.; XIE, L. Effect of SCM and nano-particles on static and dynamic mechanical properties of UHPC. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 182, p. 118–125, set. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.126>>.

XU, L.; WU, F.; CHI, Y.; CHENG, P.; ZENG, Y.; CHEN, Q. Effects of coarse aggregate and steel fibre contents on mechanical properties of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 206, p. 97–110, maio 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.190>>.

YAO, W.; LI, J.; WU, K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. **Cement and Concrete Research**, Elsevier BV, v. 33, n. 1, p. 27–30, jan. 2003.

YIN, W.; LI, X.; SUN, T.; WANG, J.; CHEN, Y.; YAN, G. Experimental investigation on the mechanical and rheological properties of high-performance concrete (HPC) incorporating sinking bead. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 243, p. 118293, maio 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118293>>.

YOO, D.-Y.; BANTHIA, N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier BV, v. 73, p. 267–280, out. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>>.

YU, A. B.; ZOU, R. P.; STANDISH, N. Modifying the linear packing model for predicting the porosity of nonspherical particle mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, American Chemical Society (ACS), v. 35, n. 10, p. 3730–3741, jan. 1996.

ZHANG, Z.; SHAO, X.-D.; ZHU, P. Direct tensile behaviors of steel-bar reinforced ultra-high performance fiber reinforced concrete: Effects of steel fibers and steel rebars. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 243, p. 118054, maio 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118054>>.

ZHAO, M.; ZHAO, M.; CHEN, M.; LI, J.; LAW, D. An experimental study on strength and toughness of steel fiber reinforced expanded-shale lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 183, p. 493–501, set. 2018.

ZHU, Y.; ZHANG, Y.; HUSSEIN, H. H.; CHEN, G. Numerical modeling for damaged reinforced concrete slab strengthened by ultra-high performance concrete (uhpc) layer. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 209, p. 110031, 2020.

ZOLLO, R. F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier BV, v. 19, n. 2, p. 107–122, jan. 1997.