

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - Mestrado**

**APARECIDO MARINHO SILVA JUNIOR**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS FLETIDOS DE  
CONCRETO REFORÇADOS COM CONCRETO DE ULTRA  
ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS**

MARINGÁ  
2023

**APARECIDO MARINHO SILVA JUNIOR**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS FLETIDOS DE  
CONCRETO REFORÇADOS COM CONCRETO DE ULTRA  
ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador(a): Prof. Romel Dias Vanderlei

MARINGÁ  
2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

S586a

Silva Junior, Aparecido Marinho

Análise experimental de elementos fletidos de concreto reforçados com concreto de ultra alto desempenho com fibras / Aparecido Marinho Silva Junior. -- Maringá, PR, 2023. 103 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Concreto de ultra alto desempenho (UHPC). 2. Concreto - Desempenho. 3. Concreto - Reforço de fibra. I. Vanderlei, Romel Dias, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 624.18

Jane Lessa Monção - CRB 9/1173

APARECIDO MARINHO SILVA JUNIOR

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS FLETIDOS DE CONCRETO  
REFORÇADOS COM CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO COM FIBRAS**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 02/06/2023, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

**BANCA EXAMINADORA**



**Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual de Maringá  
Professor Orientador



**Prof. Dr. Vladimir José Ferrari**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual de Maringá



**Prof. Dr. Gustavo de Miranda Saleme Gidrão**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me dado força, paciência, e muita sabedoria para nunca desistir nos momentos difíceis, e agora poder estar me dando a conquista de finalizar e apresentar a minha pesquisa.

A minha família, em especial minha mãe Sonia e minha namorada Daniela, por terem sido muitas vezes minha base e meus ouvidos para desabafo e me dado força para não desistir.

Aos meus colegas, em especial Fernando, Henrique e Rodolfo, por terem me dado todo auxílio na pesquisa, seja com ajuda, dicas e apoio nas atividades laboratoriais.

Ao professor Romel Dias Vanderlei, por toda orientação e dicas para o bom desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Rodrigo Mazia Enami, por toda ajuda na pesquisa, sempre muito solícito e um grande amigo que encontrei no mestrado.

Ao professor José Wilson Assunção, por toda ajuda e dicas que contribuíram para o desenvolvimento do programa experimental.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A Universidade Estadual de Maringá, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV), por toda infraestrutura disponível para me dar condições de desenvolver a presente pesquisa. Também meu agradecimento a todos os professores do programa por terem passado seus conhecimentos e experiência, que, com certeza, enriqueceram minha carreira. Minha gratidão.

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se aos pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem a vitória, nem a derrota.

Theodore Roosevelt

## RESUMO

O concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) é um compósito onde se utiliza pós reativos, geralmente cimento, sílica ativa e pó de quartzo, juntamente com agregados miúdos, aditivos e fibra de aço. Trata-se de um material com alta resistência à compressão, comparado ao concreto convencional e de alta resistência, produzido com baixa relação água/cimento. A alta ductilidade e o aumento da resistência à tração se dá pelo uso das fibras, em especial a fibra de aço, além de apresentar grande durabilidade, exigindo uma quantidade menor de manutenções periódicas, o que possibilita ser uma alternativa na utilização como reforço estrutural. Neste sentido, este trabalho avaliou o comportamento do UHPFRC como material de reforço em estruturas de concreto sob esforços de flexão, a partir da análise experimental de prismas com substratos de concreto de diferentes resistências. Foram ensaiados prismas à tração por flexão em 4 pontos com diferentes espessuras de reforço em UHPFRC (20 e 30 mm), e diferentes substratos de concreto, sendo um substrato em concreto convencional (C40) e dois em concreto de alta resistência (C70 e C85). Os resultados mostraram um aumento na ordem de 55 % na capacidade resistente à tração por flexão no conjunto de substrato em concreto C40, 45 % para o concreto de alta resistência C70 e 42 % para o conjunto referente a superfície em concreto de alta resistência C85, logo, percebe-se que quanto menor a resistência do substrato, maior a eficiência e contribuição do reforço no conjunto. Indicou-se também um papel fundamental do reforço de UHPFRC em garantir uma maior deformação do elemento reforçado antes de romper, por conta de ser um material mais dúctil que os substratos em concreto, mostrando ser uma alternativa positiva como reforço estrutural em elementos de concreto.

**Palavras-chave:** UHPFRC; Concreto de ultra alto desempenho; Reforço; Flexão.

## ABSTRACT

Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) is a composite using reactive powders, usually cement, silica fume and quartz powder, along with fine aggregates, additives and steel fiber. It is a material with high compressive strength, compared to conventional high-strength concrete, produced with a low water/cement ratio. The high ductility and increased tensile strength are due to the use of fibers, in particular steel fiber, in addition to having great durability, requiring less periodic maintenance, which makes it possible to be an alternative in use as structural reinforcement. In this sense, this work evaluated the behavior of UHPFRC as a reinforcing material in concrete structures under bending stress, based on the experimental analysis of prisms with concrete substrates of different strengths. Tensile prisms were tested by bending at 4 points with different reinforcement thicknesses in UHPFRC (20 and 30 mm), and different concrete substrates, one substrate in conventional concrete (C40) and two in high-strength concrete (C70 and C85). The results showed an increase in the order of 55% in the flexural tensile strength in the C40 concrete substrate set, 45% for the C70 high-strength concrete and 42% for the C85 high-strength concrete surface set, therefore, it is clear that the lower the resistance of the substrate, the greater the efficiency and contribution of the reinforcement to the set. A fundamental role of UHPFRC reinforcement was also indicated in ensuring greater deformation of the reinforced element before breaking, as it is a more ductile material than concrete substrates, proving to be a positive alternative as structural reinforcement in concrete elements.

**Keywords:** UHPFRC; Ultra high performance concrete; Reinforcement; Flexural

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Exemplo de Dosagem por Volume comparando UHPFRC e Concreto Convencional .....	19
<b>Figura 2</b> – Gráfico Tensão x Deformação, para UHPFRC no Estado Limite Último – <i>Strain Softening</i> .....	22
<b>Figura 3</b> – Gráfico Tensão x Deformação, para UHPFRC no Estado Limite Último – <i>Strain Hardening</i> .....	23
<b>Figura 4</b> – Gráfico Tensão x Deformação para UHPFRC no Estado Limite Último.....	24
<b>Figura 5</b> – Comparação do gráfico Tensão x Deformação com UHPFRC e Concreto Convencional.....	26
<b>Figura 6</b> – Esquema de Ruptura Ocorrendo Fora do Terço Médio .....	31
<b>Figura 7</b> – Disposição do CP no ensaio de compressão diametral .....	32
<b>Figura 8</b> – Amostra de um ensaio <i>Slant Shear Test</i> .....	34
<b>Figura 9</b> – (a) Amostra do ensaio <i>Slant Shear Test</i> e (b) Microestrutura da amostra após o ensaio .....	35
<b>Figura 10</b> – Modos de Falha de Vigas de Concreto Reforçadas .....	36
<b>Figura 11</b> – Detalhamento das Vigas Com e Sem Reforço de Granato (2020).....	38
<b>Figura 12</b> – Amostras Submetidas ao ensaio de flexão de 3 pontos de Granato (2020) .....	38
<b>Figura 13</b> – Detalhamento das Vigas de Concreto de Al-Osta <i>et al.</i> (2016).....	39
<b>Figura 14</b> – Detalhamento do Grupo Amostral de Al-Osta <i>et al.</i> (2016).....	40
<b>Figura 15</b> – Malha dos Elementos de Al-Osta <i>et al.</i> (2016) – (a) Concreto, (b) Armadura e (c) UHPFRC.....	41
<b>Figura 16</b> – Gráficos Comparando Modelo Numérico x Experimental de Al-Osta <i>et al.</i> (2016) – (a) RC-Control, (b) RC-BOT SJ, (c) RC-2 SJ e (d) RC-3 SJ.....	41
<b>Figura 17</b> – Leis dos materiais no modelo analítico de Al-Osta <i>et al.</i> (2016) – (a) Armadura, (b) UHPFRC à tração, (c) Concreto Convencional à compressão e (d) UHPFRC à compressão .....	42
<b>Figura 18</b> – Modelo analítico de Al-Osta <i>et al.</i> (2016) .....	43
<b>Figura 19</b> – Fluxograma modelo analítico de Al-Osta <i>et al.</i> (2016) .....	45
<b>Figura 20</b> – Comparação Analítico x Experimental de Al-Osta <i>et al.</i> (2016).....	46
<b>Figura 21</b> – Ensaios de caracterização de Yoo <i>et al.</i> (2016) .....	47
<b>Figura 22</b> – Grupo Amostral de Yoo <i>et al.</i> (2016) .....	47
<b>Figura 23</b> – Análise dos Resultados de Yoo <i>et al.</i> (2016).....	48
<b>Figura 24</b> – Comparação entre o Modelo Analítico e Experimental de Yoo <i>et al.</i> (2016) .....	49
<b>Figura 25</b> – Curva granulométrica da sílica ativa.....	54
<b>Figura 26</b> – Modelo de Estudo do Programa Experimental .....	56
<b>Figura 27</b> – Fluxograma Parte I: Materiais.....	57

<b>Figura 28</b> – Equipamentos usados para mistura do Concreto e UHPFRC.....	57
<b>Figura 29</b> – <i>Slump Test</i> realizado no concreto convencional .....	59
<b>Figura 30</b> – Amostras Cilíndricas e Prismáticas na Fôrma .....	62
<b>Figura 31</b> – Amostras Cilíndricas e Prismáticas na Câmara Úmida .....	62
<b>Figura 32</b> – Fluxograma Parte II: Métodos .....	63
<b>Figura 33</b> – Ensaio de Compressão Axial no Concreto.....	63
<b>Figura 34</b> – Ensaio de Tração por Compressão Diametral no Concreto .....	64
<b>Figura 35</b> – Ensaio de Módulo de Elasticidade Longitudinal no Concreto.....	64
<b>Figura 36</b> – Ensaio de Compressão Axial no UHPFRC.....	65
<b>Figura 37</b> – Ensaio de Tração por Compressão Diametral no UHPFRC .....	65
<b>Figura 38</b> – Ensaio de Módulo de Elasticidade Longitudinal no UHPFRC.....	66
<b>Figura 39</b> – Representação do Grupo Amostral .....	66
<b>Figura 40</b> – Amostra reforçada na prensa para o ensaio de 4 pontos .....	67
<b>Figura 41</b> – Modelo Experimental dos Prismas Reforçados com UHPFRC.....	67
<b>Figura 42</b> – Nomenclatura adotada nos modelos .....	68
<b>Figura 43</b> – Ferramentas usadas para o preparo do substrato em concreto .....	69
<b>Figura 44</b> – Superfície do substrato em concreto após o lixamento.....	69
<b>Figura 45</b> – Superfície do substrato em concreto após a aplicação da resina epóxi.....	69
<b>Figura 46</b> – Representação da Posição dos Extensômetros nas Vigas .....	70
<b>Figura 47</b> – Sistema de Aquisição de Dados .....	71
<b>Figura 48</b> – Amostra Concreto C40 após o Ensaio de Flexão 4 pontos .....	76
<b>Figura 49</b> – Amostra Concreto C70 após o Ensaio de Flexão 4 pontos .....	77
<b>Figura 50</b> – Amostra Concreto C85 após o Ensaio de Flexão 4 pontos .....	77
<b>Figura 51</b> – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C40 (reforço 20mm) .....	79
<b>Figura 52</b> – Amostra Concreto C40 (reforço 20mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos.....	79
<b>Figura 53</b> – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C40 (reforço 30mm) .....	80
<b>Figura 54</b> – Amostra Concreto C40 (reforço 30mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos.....	81
<b>Figura 55</b> – Comparativo Amostras com e sem Reforço UHPFRC: Concreto C40 .....	81
<b>Figura 56</b> – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C70 (reforço 20mm) .....	82
<b>Figura 57</b> – Amostra Concreto C70 (reforço 20mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos.....	82
<b>Figura 58</b> – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C70 (reforço 30mm) .....	83
<b>Figura 59</b> – Comparativo Amostras com e sem Reforço UHPFRC: Concreto C70 .....	84
<b>Figura 60</b> – Amostra Concreto C70 (reforço 30mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos.....	84
<b>Figura 61</b> – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C85 (reforço 20mm) .....	85
<b>Figura 62</b> – Amostra Concreto C85 (reforço 20mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos.....	85

<b>Figura 63</b> – Amostra Concreto C85 (reforço 30mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos.....	86
<b>Figura 64</b> – Amostra Concreto C85 (ref. 30mm) rompida na Interface Reforço x Substrato .	86
<b>Figura 65</b> – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C85 (reforço 30mm) .....	87
<b>Figura 66</b> – Comparativo Amostras com e sem Reforço UHPFRC: Concreto C85 .....	88
<b>Figura 67</b> – Gráfico Força x Deformação Específica à Tração Concreto C40.....	90
<b>Figura 68</b> – Gráfico Força x Deformação Específica à Tração Concreto C70.....	91
<b>Figura 69</b> – Gráfico Força x Deformação Específica à Tração Concreto C85.....	91

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Dosagem típica para UHPFRC .....	18
<b>Tabela 2</b> – Características Gerais do UHPFRC .....	21
<b>Tabela 3</b> – Coeficientes de Majoração para o UHPFRC .....	21
<b>Tabela 4</b> – Propriedades físicas e mecânicas do cimento .....	50
<b>Tabela 5</b> – Propriedades físicas da Areia I .....	51
<b>Tabela 6</b> – Propriedades químicas da Areia II.....	51
<b>Tabela 7</b> – Análise granulométrica da Areia II.....	52
<b>Tabela 8</b> – Propriedades físicas da Pedra Britada.....	53
<b>Tabela 9</b> – Propriedades químicas do pó de quartzo .....	53
<b>Tabela 10</b> – Análise granulométrica do pó de quartzo .....	53
<b>Tabela 11</b> – Propriedades físicas da sílica ativa .....	54
<b>Tabela 12</b> – Propriedades químicas da sílica ativa .....	54
<b>Tabela 13</b> – Propriedades do aditivo superplastificante ADVA 458.....	55
<b>Tabela 14</b> – Propriedades do aditivo superplastificante ADVA 548.....	55
<b>Tabela 15</b> – Traço do Concreto Convencional e de Alta resistência (consumo em kg/m <sup>3</sup> ) ....	58
<b>Tabela 16</b> – Resistência à Compressão dos Traços de UHPC Testados .....	60
<b>Tabela 17</b> – Traço final usado na produção do UHPFRC .....	60
<b>Tabela 18</b> – Ensaio de Caracterização do Concreto e do UHPFRC .....	62
<b>Tabela 19</b> – Amostras do Ensaio de Flexão em 4 Pontos.....	68
<b>Tabela 20</b> – Abatimentos obtidos no <i>Slump Test</i> .....	72
<b>Tabela 21</b> – Resultados do ensaio de compressão axial nos concretos .....	73
<b>Tabela 22</b> – Teste ANOVA dos Concretos aos 28 dias e 56 dias .....	73
<b>Tabela 23</b> – Resultados do ensaio de tração, por compressão diametral, nos concretos .....	74
<b>Tabela 24</b> – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade nos concretos .....	74
<b>Tabela 25</b> – Resultados do ensaio de compressão axial no UHPFRC.....	75
<b>Tabela 26</b> – Resultados do ensaio de tração, por compressão diametral, no UHPFRC .....	75
<b>Tabela 27</b> – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade no UHPFRC .....	76
<b>Tabela 28</b> – Resultados do ensaio de 4 pontos: Amostras sem o reforço.....	78
<b>Tabela 29</b> – Resultados do ensaio de 4 pontos: Amostras com o reforço em UHPFRC.....	89
<b>Tabela 30</b> – Análise da Tenacidade com as amostras com o reforço em UHPFRC.....	93

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

AFGC – Associação Francesa de Engenharia Civil

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/c – Relação água cimento

CP – Corpo de Prova

CPs – Corpos de Prova

UHPC – Concreto de Ultra Alto Desempenho

UHPFRC – Concreto de Ultra Alto Desempenho Reforçado com Fibras

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo geral .....	15
1.2.2 Objetivos específicos .....	15
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC).....	16
2.1.1 Breve Histórico do UHPC .....	16
2.1.2 Composição do UHPFRC.....	17
2.1.3 Determinação do traço do UHPC .....	19
2.1.4 Propriedades do UHPFRC.....	20
2.1.4.1 Resistência à Compressão .....	20
2.1.4.2 Resistência à Tração .....	22
2.1.4.3 Ductilidade .....	25
2.1.4.4 Durabilidade .....	26
2.1.4.5 Retração Autógena .....	27
2.1.5 Ensaio de caracterização .....	28
2.1.5.1 Ensaio de compressão e módulo de elasticidade longitudinal estático .....	28
2.1.5.2 Ensaio de tração à flexão 4 pontos .....	30
2.1.5.3 Ensaio de tração por compressão diametral .....	32
2.3 USO DO UHPFRC COMO REFORÇO ESTRUTURAL .....	33
2.3.1 Vigas em concreto submetidas à flexão e reforçadas com UHPFRC .....	37
2.3.1.1 Granato (2020).....	37
2.3.1.2 Al-Osta <i>et al.</i> (2016).....	39
2.3.1.3 Yoo <i>et al.</i> (2016).....	46
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
3.1 MATERIAIS.....	50
3.1.1 Cimento .....	50
3.1.2 Agregado miúdo .....	50
3.1.3 Agregado graúdo .....	52
3.1.4 Pó de Quartzo .....	53
3.1.5 Sílica Ativa .....	53
3.1.6 Água .....	54

3.1.7 Aditivos .....	55
3.1.8 Fibra de Aço .....	56
3.2 MÉTODOS.....	56
3.2.1 Programa Experimental .....	56
3.2.2 Ensaios de caracterização do Concreto e do UHPFRC .....	63
3.2.3 Análise dos Prismas Reforçados com UHPFRC .....	66
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>72</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS E UHPFRC.....	72
4.1.1 Concretos .....	72
4.1.1.1 Abatimento ( <i>Slump Test</i> ) .....	72
4.1.1.2 Resistência à Compressão Axial .....	72
4.1.1.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	74
4.1.1.3 Módulo de Elasticidade Longitudinal .....	74
4.1.2 UHPFRC.....	75
4.1.2.1 Resistência à Compressão Axial .....	75
4.1.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	75
4.1.2.3 Módulo de Elasticidade Longitudinal .....	76
4.2 ENSAIO DE FLEXÃO EM 4 PONTOS.....	76
4.2.1 Concretos .....	76
4.2.2 Reforço em UHPFRC.....	78
4.2.3 Deformação Específica à Tração .....	89
4.2.4 Análise da tenacidade nos prismas reforçados .....	92
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>94</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE A – Procedimentos Envolvidos na Instrumentação das Amostras.....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais estruturais mais utilizados no mundo. Contudo, esse material apresenta algumas fragilidades em suas propriedades mecânicas, como a baixa resistência à tração e pequena ductilidade.

Em virtude disto, a pesquisa tecnológica em materiais estruturais avançou sistematicamente para minimizar essas deficiências utilizando técnicas como a combinação do concreto com o aço, com ótima aderência entre os materiais, garantindo com que o concreto trabalhe aos esforços de compressão enquanto o aço suporte as forças de tração, originando o concreto armado.

Mesmo com a adoção do concreto armado, em algumas situações, o uso deste material também pode sofrer algumas limitações decorrentes das condições específicas de sua utilização. Nesses casos faz-se necessário a incorporação de produtos que possam corrigir os efeitos adversos provocados por estas limitações, como por exemplo a adoção de partículas extremamente finas para se obter compósitos densos e, conseqüentemente, mais resistentes, obtendo o concreto de ultra alto desempenho (UHPC).

Este material não possui uma definição específica, sendo assim considerado como um material a base de pós reativos, com uma relação água/cimento entre 0,16 e 0,2, possibilitando o alcance de altas propriedades como elevada resistência à compressão, sendo que a Associação Francesa de Engenharia Civil (2002) considera uma resistência à compressão acima de 150 MPa para ser considerado como um concreto de ultra alto desempenho.

O objetivo principal deste concreto está em eliminar as interferências do agregado graúdo na mistura, reduzindo os vazios internos e, conseqüentemente, a zona de transição, aumentando a estrutura intragranular. Este incremento promove uma mistura mais homogênea, aperfeiçoando a microestrutura do concreto e reduzindo as tensões em uma possível falha da microestrutura, garantindo um acréscimo na resistência última do UHPC. (HELENE *et al.*, 2011).

Apesar das altas resistências obtidas com o UHPC, verifica-se que este material possui comportamento frágil na ruptura, o que pode comprometer significativamente a segurança das obras. Para contornar esse problema muitas pesquisas têm promovido o uso da adição de fibras metálicas, cuja principal vantagem é proporcionar maior ductilidade, aumentando o patamar de escoamento, surgindo assim, o compósito denominado de concreto de ultra alto desempenho com adição de fibras (UHPRFC).

O concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) é um compósito contendo pós reativos, geralmente cimento, sílica ativa e pó de quartzo, juntamente com agregados miúdos, aditivo superplastificante e fibra de aço. Possui diversas aplicações como reforço estrutural, uso em pontes e produção de peças pré-fabricadas, seja para uso decorativo ou para uso em construções industrializadas.<sup>1</sup>

Trata-se de um material com alta resistência à compressão, comparado ao concreto convencional, produzido com baixa relação água/cimento, entre 0,1 e 0,2, e, até mesmo por essa questão, faz-se o uso de aditivo superplastificante na composição para que haja uma melhor trabalhabilidade do material. A alta ductilidade e o aumento da resistência à tração se dá pelo uso das fibras, em especial a fibra de aço, como é possível constatar nos trabalhos de Oh (1994) e Ashour et al (2000), pelo fato de as tensões se transferirem entre as fibras de aço.

Além do excelente comportamento mecânico, o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras apresenta grande durabilidade, exigindo uma quantidade menor de manutenções periódicas.

Uma alternativa para o uso do UHPFRC está no reparo dessas estruturas de concreto armado, tendo em vista o fato de ser um material que apresenta alta resistência, seja à compressão quanto à tração, podendo ser utilizado para aumentar a capacidade de carga do elemento estrutural, propiciando ainda, uma diminuição nas intervenções durante a vida útil da peça por conta da sua alta durabilidade.

Apesar disso, a interação entre o UHPFRC e a armadura de flexão em peças construídas em escala real ainda necessita de um maior esclarecimento com relação ao mecanismo de transferência de esforços e a deformação necessária para mobilização de um diagrama de resistência em condições de ruptura.

Neste sentido, este trabalho realizou uma análise experimental em prismas de concreto convencional e de alta resistência reforçadas com concreto de ultra alto desempenho com adição de fibras de aço e submetidas à flexão simples. Foi avaliado também a influência de diferentes espessuras de reforço em UHPFRC.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Compreender o comportamento do concreto de ultra alto desempenho como reforço estrutural traz um enorme ganho para a engenharia de estruturas, pois, por conta das elevadas propriedades mecânicas que ele possui, como alta resistência à tração na flexão e à compressão, este material tende a promover um aumento na capacidade de carga de vigas. Além disso, o

reforço em UHPFRC trará um aumento na vida útil da peça estrutural a ser reforçada, tendo em vista a alta durabilidade que este material possui, reduzindo as manutenções periódicas do elemento estrutural.

Outro fator que faz desse compósito uma promissora solução dentro do reforço de estruturas é a excelente aderência entre o UHPFRC e o concreto, desde que executado de forma correta o preparo do substrato em concreto convencional para a inserção do UHPFRC. Por esses fatores que se pode considerar o reforço em UHPFRC como uma solução inovadora para a recuperação de estruturas em concreto, cujos casos são diversos como com excessos de carga, fissuração, dentre outros.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento do UHPFRC como material de reforço em estruturas de concreto sob esforços de flexão, a partir da análise experimental de prismas com substratos de concreto de diferentes resistências.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o ganho de capacidade resistente à flexão com o reforço de UHPFRC.
- Avaliar a influência da espessura do reforço de UHPFRC na capacidade resistente à flexão.
- Analisar o comportamento do reforço de UHPFRC em substratos com concretos de classe de resistência convencional e alta resistência.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será feito um breve histórico do concreto de ultra alto desempenho (UHPC) e concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC), bem como a importância das fibras como reforço neste concreto, e na sequência, será analisado por meio de outros trabalhos as propriedades deste material.

### 2.1 Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC)

#### 2.1.1 Breve Histórico do UHPC

O concreto de ultra alto desempenho (UHPC) começou a ser estudado por volta da década de 1930, com o concreto de pós reativos (CPR) o qual pode ser considerado como um composto que faz o uso de materiais finos em substituição ao agregado graúdo, de modo a eliminar os vazios da estrutura granular, tornando uma matriz mais homogênea, cuja principal característica está em apresentar elevadas propriedades mecânicas, levando-se em consideração a utilização de parâmetros básicos como a composição dos materiais, a dosagem e a cura térmica no estado endurecido do concreto. (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

Os autores supracitados comentam que as seguintes condições devem ser atendidas para se obter o CPR:

- Melhora da homogeneidade dos grãos a partir da eliminação do agregado graúdo.
- Melhora da massa específica seca por meio da otimização da mistura de grãos, juntamente com a aplicação de pressão antes e durante o procedimento.
- Aprimoramento da microestrutura através de cura térmica.
- Aumento da ductilidade mediante inserção de microfibras de aço.
- Executar os procedimentos de mistura e modelagem o mais próximo do procedimento prático, de acordo com as normas técnicas.

As três primeiras condições promovem uma matriz com elevada resistência a compressão, mas ainda apresenta uma ductilidade frágil, quando comparado ao concreto convencional. O uso das fibras de aço faz com que aumente a resistência a tração, além de obter um nível considerado de ductilidade. Dessa forma, pelo uso da fibra de aço no concreto de ultra alto desempenho surge a denominação de concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC). (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

Não há uma definição específica para o UHPFRC, mas segundo autores como Eide e Hisdal (2012), pode ser definido como um modelo de concreto de pós reativos que apresenta resistência a compressão acima de 150 MPa, segundo a recomendação da Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC, 2002), e relação água/cimento abaixo de 0,25, geralmente entre 0,16 e 0,2.

Já outros autores (BRÜHWILER e DENARIÉ, 2013; TAYEH *et al.*, 2013), não abordam números específicos, em relação as propriedades que definem o UHPFRC, e sim definem este tipo de concreto como um composto de elevada resistência, tanto à tração como à compressão, excelente trabalhabilidade, e alta durabilidade e ductilidade quando comparado ao concreto convencional.

Para atingir resistência à compressão acima de 150 MPa, a AFGC (2002) sugere que a cura do concreto de ultra alto desempenho com fibras seja uma cura térmica, tendo em vista que a influência da temperatura durante o processo de reação com os compósitos promove o surgimento de altas propriedades que já são conhecidas do UHPFRC. No entanto, pode haver situações em que não seja possível a execução da cura térmica em virtude de infraestrutura necessária.

Graybeal (2007), por exemplo, produziu um concreto do tipo UHPFRC sem cura térmica, e atingiu uma resistência à compressão aos 28 dias de 119 MPa, considerando, mesmo com  $f_{ck}$  menor que 150 MPa, como um concreto de ultra alto desempenho. Já Hassan *et al.* (2012), considerou como um concreto de ultra desempenho em seu trabalho um compósito que atingiu 121,32 MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

Não apenas a resistência à compressão deve ser levada em consideração, aponta Enami (2017), mas sim propriedades que o UHPC possui que são elevadas quando comparadas aos concretos de alta resistência, como a durabilidade, a ductilidade, e, até mesmo a resistência à compressão, já que é considerado um concreto de alta resistência que possua no máximo 90 MPa de resistência à compressão, segundo a norma ABNT NBR 6118:2014.

### **2.1.2 Composição do UHPFRC**

Para a produção do concreto de ultra alto desempenho, são necessários os seguintes componentes: cimento Portland, areia, sílica ativa, pó de quartzo, aditivo superplastificante. A adição da fibra de aço é tratada como uma inserção especial, gerando o termo UHPFRC.

Richard e Cheyrezy (1995), comentam que o diâmetro das partículas dos materiais é definido, de forma indireta, de acordo com os diâmetros máximos e mínimos que se desejam

na mistura. O diâmetro máximo é limitado a 600  $\mu\text{m}$ , enquanto o diâmetro mínimo das partículas não deve ultrapassar 150  $\mu\text{m}$ .

A areia é considerada o material principal na mistura, com tamanho da partícula em torno de 250  $\mu\text{m}$ . Já o material com menor partícula dentro da composição do UHPC é o cimento, com diâmetro do grão variando entre 11 e 15  $\mu\text{m}$ . (RICHARD E CHEYREZY, 1995).

Voort (2008), elaborou uma tabela com as principais faixas de mistura por peso do UHPFRC para cada material constituinte baseando nas pesquisas da época. Essa dosagem, presente na Tabela 1, é considerada por Tayel (2013) e Enami (2017) como dosagem típica para o UHPFRC. Outro exemplo de mistura, considerando o volume, é proposto por Naaman e Wille (2012), comparando o UHPFRC com o concreto convencional como mostra a Figura 1.

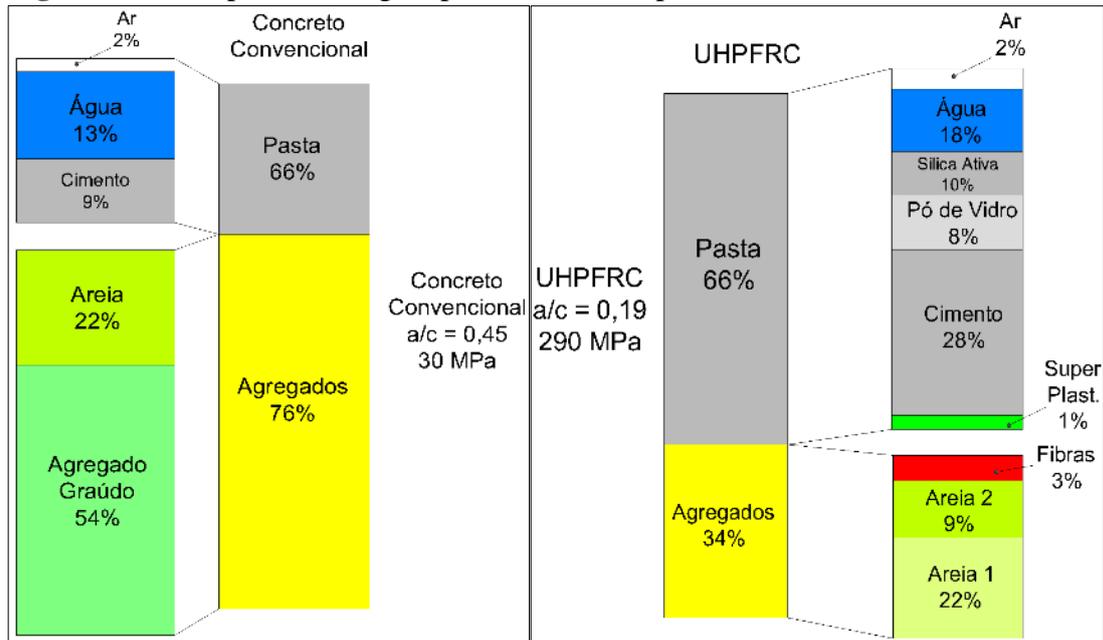
**Tabela 1 – Dosagem típica para UHPFRC**

<b>Componentes</b>	<b>Mistura típica por peso (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>)</b>
Areia	490 – 1390
Cimento	610 – 1081
Sílica Ativa	50 – 334
Pó de Quartzo	0 – 410
Fibras	40 – 250
Superplastificante*	9 – 71
Água	126 – 261

\*Expresso como peso da fração sólida.

**Fonte:** VOORT, 2008.

**Figura 1** – Exemplo de Dosagem por Volume comparando UHPFRC e Concreto Convencional



Fonte: NAAMAN E WILLE, 2012, adaptado pelo autor.

### 2.1.3 Determinação do traço do UHPC

A mistura dos componentes do UHPFRC se dá por meio do empacotamento dos materiais, com o objetivo de garantir uma melhor otimização entre as partículas, diminuindo os vazios inter granulares e, assim, promover uma maior eficácia no aproveitamento das propriedades dos materiais. O método mais utilizado para distribuição dos grãos é o método de Andreasen e Andersen (1930), pelo pode ser definido pela Equação 2.1.

$$P(D_i) = \left( \frac{D_i}{D_{\max}} \right)^q \quad (2.1)$$

Onde:

$P(D_i)$ : Fração do material fino dentro da mistura total.

$D_i$ : Diâmetro do material fino específico.

$D_{\max}$ : Diâmetro máximo da partícula fina usado na mistura.

$q$ : Coeficientes de distribuição, varia de acordo com o tipo de concreto.

Yu *et al.* (2014), comentam que para misturas de partículas maiores, recomenda-se utilizar o coeficiente “q” da Equação 2.1 com valores maiores que 0,5, enquanto para misturas envolvendo partículas mais finas usa-se  $q < 0,25$ .

Granato (2020) e Buttignol *et.al.* (2017), abordam o fato de o modelo de Andreasen e Andersen (1930) não levar em consideração o diâmetro mínimo das partículas presentes na mistura e a importância que este parâmetro poderia resultar em uma melhor distribuição granulométrica. Assim, um modelo proposto por Funk e Dinger (1994), baseado no modelo de Andreasen e Andersen (1930), leva em consideração o diâmetro mínimo das partículas ( $D_{min}$ ) como é visto na Equação 2.2.

$$P(D_i) = \left( \frac{D_i^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right) \quad (2.2)$$

O método de Funk e Dinger (1994), foi amplamente utilizado para otimização granulométrica em diversos tipos de concreto o que mostra sua eficácia para vários compósitos. (GRANATO, 2020).

## 2.1.4 Propriedades do UHPFRC

### 2.1.4.1 Resistência à Compressão

A compressão pode ser considerada como uma propriedade capaz de classificar o concreto como um UHPFRC, apesar de gerar diversas considerações sobre qual valor de resistência à compressão que define o UHPFRC, como foi mostrado no item 2.1.1. A norma francesa NF P 18-710 (2016), aponta que um concreto de ultra alto desempenho com fibras deve possuir uma resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ ) entre 150 e 200 MPa, como mostra a Tabela 2.

É possível determinar a resistência à compressão para dimensionamento do UHPFRC através da Equação 2.3, segundo a norma francesa NF P 18-710 (2016).

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.3)$$

Onde:

$f_{cd}$ : Resistência à compressão de dimensionamento do UHPFRC.

$\alpha_{cc}$ : Coeficiente de redução que leva em consideração os efeitos a longo prazo da resistência a compressão do UHPFRC, bem como as condições de aplicação da carga. Para o UHPFRC, a norma recomenda adotar  $\alpha_{cc} = 0,85$ .

$\gamma_c$ : Coeficiente de minoração para resistência à compressão do UHPFRC (Tabela 3).

**Tabela 2** – Características Gerais do UHPFRC

Módulo de Elasticidade $E_{cm}$	45 – 65 GPa
Resistência à compressão característica $f_{ck}$	150 – 200 MPa
Resistência à compressão média $f_{ck}$	160 – 230 MPa
Resistência à tração elástica característica $f_{ctk,el}$	7 – 10 MPa
Resistência à tração elástica média $f_{ctk,el}$	8 – 12 MPa
Resistência à tração característica pós-pico $f_{ctf k}$	6 – 10 MPa
Resistência à tração média pós-pico $f_{ctf k}$	7 – 12 MPa
Fator Global de orientação das fibras $K_{global}$	1,25
Fator Local de orientação das fibras $K_{local}$	1,75
Coeficiente Linear Térmico de Expansão	11 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$
Comprimento da fibra $L_f$	12 – 20 mm

Fonte: NF P 18-710, 2016, adaptado pelo autor.

**Tabela 3** – Coeficientes de Majoração para o UHPFRC

Condições de Projeto	$\gamma_c$ (UHPFRC à compressão)	$\gamma_{cf}$ (UHPFRC à tração)	$\gamma_s$ (UHPFRC com barras de aço)	$\gamma_s$ (UHPFRC com aço protendido)
Cargas Permanentes	1,5	1,3	1,15	1,15
Cargas Acidentais	1,2	1,05	1,0	1,0

Fonte: NF P 18-710, 2016.

Além da própria resistência à compressão, é possível determinar um outro parâmetro com a propriedade da compressão que é o módulo de elasticidade. Segundo Granato (2020), os ensaios tradicionais para determinação do módulo de elasticidade, como o próprio ensaio de compressão axial, por exemplo, não apresentam resultados confiáveis, principalmente no comportamento pós-pico, tendo em vista o elevado valor que o UHPFRC possui de módulo de elasticidade, podendo apresentar valores de 45 a 65 GPa, como mostra a Tabela 2.

Graybeal (2007), propõe que o módulo de elasticidade longitudinal estático (E) pode ser calculado pela Equação 2.4. Além disso, o mesmo autor conclui que a deformação máxima na compressão uniaxial seja considerada em 3,7 %. Em contrapartida, a Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC, 2002), recomenda que, em caso de não conhecimento do módulo de

elasticidade longitudinal estático do UHPFRC, deve-se adotar o valor de 55 GPa para efeito de projeto.

$$E = 3,840 \cdot \sqrt{f_c} \quad (2.4)$$

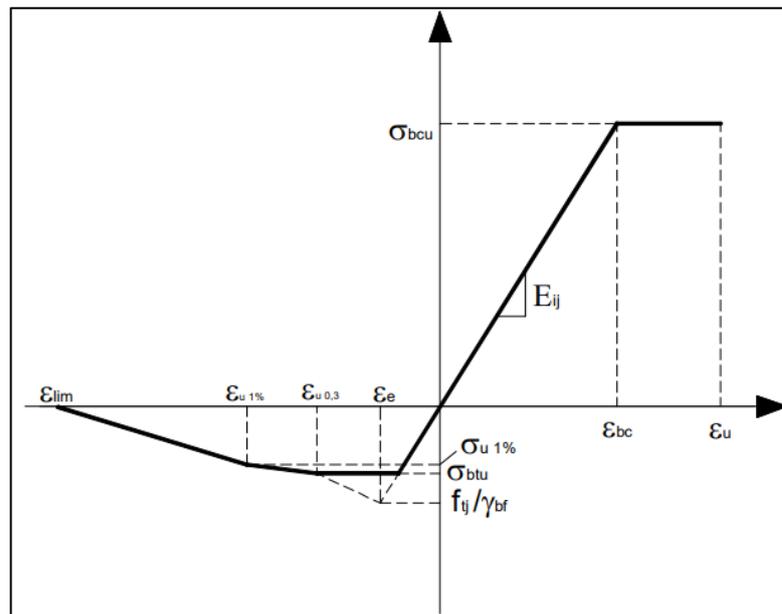
Aonde  $f_c$  é a resistência à compressão do concreto.

#### 2.1.4.2 Resistência à Tração

A AFGC (2002), comenta que o UHPFRC pode apresentar, no pós-pico, um comportamento do tipo pseudo-encruamento, ou *strain hardening*, ou *strain softening*. Segundo Resplendino (2011) e Eide e Hisdal (2012), o parâmetro *strain hardening* é quando acontece um aumento na tensão à tração mesmo após a fissuração do UHPFRC, ou seja, as fibras formam uma espécie de malha com o concreto criando pontes de transmissões de tensões acima da capacidade suportada pelo concreto caso a fibra não estivesse presente na mistura. Já o comportamento *strain softening* acontece a partir do momento que a tensão máxima à tração cai com o início da fissuração do UHPFRC, no entanto, é válido destacar que a adição das fibras promove um aumento da resistência a tração na matriz cimentícia, mesmo nesta situação.

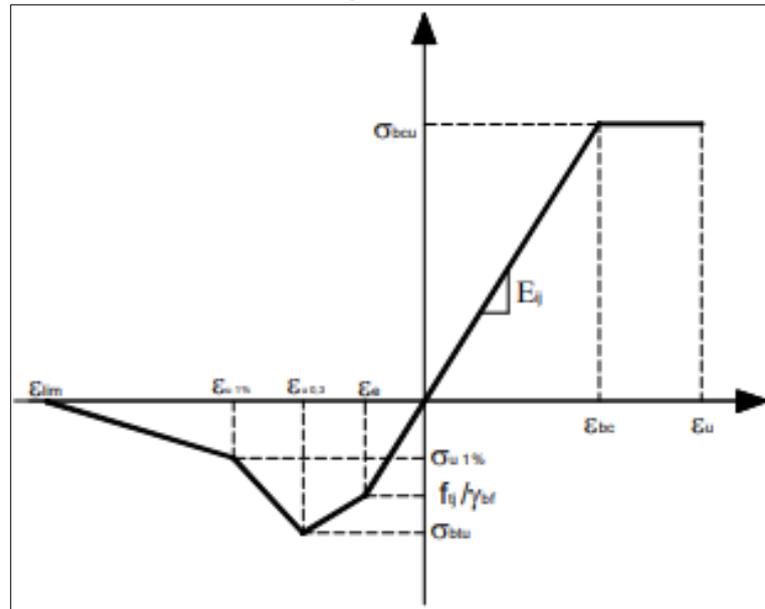
O comportamento *strain softening* é ilustrado na Figura 2, enquanto o comportamento *strain hardening* pode ser observado na Figura 3.

**Figura 2** – Gráfico Tensão x Deformação, para UHPFRC no Estado Limite Último – *Strain Softening*



Fonte: AFGC, 2002.

**Figura 3** – Gráfico Tensão x Deformação, para UHPFRC no Estado Limite Último – *Strain Hardening*

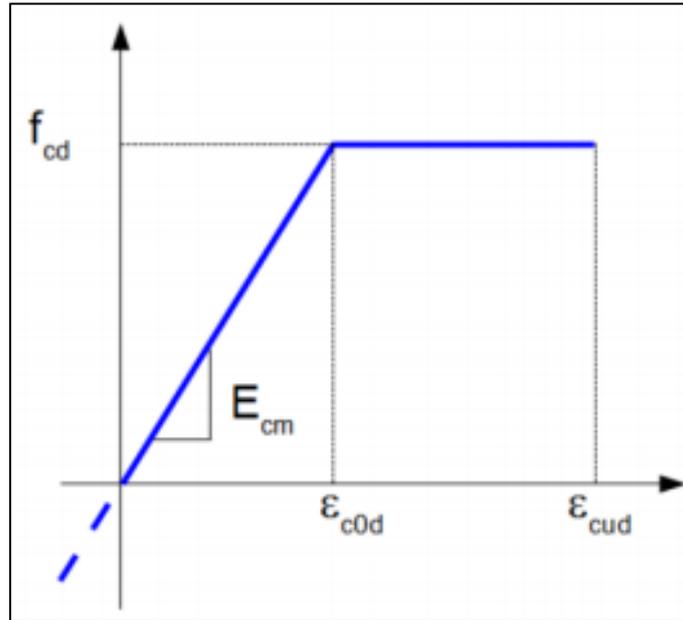


Fonte: AFGC, 2002.

A resistência à tração pode ser determinada por vários ensaios experimentais como ensaio de tração direta, compressão diametral e ensaios de flexão. Granato (2020), comenta que o ensaio de tração direta apresenta resultados melhores, porém a sua execução é mais detalhada e requer cuidados específicos, sendo assim, o motivo de ser mais utilizado os ensaios de flexão e os ensaios de compressão diametral para materiais frágeis como o UHPFRC.

As Equações 2.5 e 2.6 provém da Figura 4 da norma francesa, que corresponde ao gráfico tensão deformação para o concreto de ultra alto desempenho com fibras, aonde é possível observar a fase de deformação linear, assim como o regime de escoamento do UHPFRC. Este gráfico pode ser estendido para a parcela a esquerda do eixo de tensões, como é possível visualizar na Figura 2 surgindo novos elementos de deformação à tração do UHPFRC, provenientes da alta ductilidade do material.

**Figura 4** – Gráfico Tensão x Deformação para UHPFRC no Estado Limite Último



Fonte: NF P 18-710, 2016.

A deformação no reforço em UHPFRC é obtido por meio das Equações 2.5 e 2.6, de acordo com a norma francesa, NF P18-710/2016, que regulamenta o dimensionamento do concreto de ultra alto desempenho com fibras. Já a Equação 2.7 determina a deformação no estado último à tração do UHPFRC e da Equação 2.8 obtém-se a tensão de tração do UHPFRC.

$$\varepsilon_{cod} = \frac{f_{cd}}{E_{cm}} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{cud} = \varepsilon_{cod} \left( 1 + 14 \frac{f_{ctm}}{K_{global} \cdot f_{cm}} \right) \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{u,el} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_{cf} \cdot E_{cm}} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{rt} = \frac{f_{ctk}}{(\gamma_{cf} \cdot K_{global})} \quad (2.8)$$

Aonde:

$\varepsilon_{cod}$ : Deformação de escoamento do UHPFRC.

$\varepsilon_{cud}$ : Deformação última na compressão do UHPFRC.

$\varepsilon_{u,el}$ : Deformação no estado ultimo à tração do UHPFRC.

$E_{cm}$ : Módulo de elasticidade estático médio do UHPFRC.

$f_{ctm}$ : Resistência a tração média do UHPFRC.

$f_{ctk}$ : Resistência à tração característica do UHPFRC.

$f_{cm}$ : Resistência à compressão média do UHPFRC.

$f_{cd}$ : Resistência à compressão de dimensionamento do UHPFRC.

$K_{global}$ : Fator de ponderação relacionado a orientação das fibras associado com ações globais.

$\gamma_{cf}$ : Coeficiente de majoração (Tabela 3).

O fator  $K_{global}$  é adotado pela norma francesa como 1,25 como é possível observar na Tabela 2, enquanto o coeficiente de majoração é adotado 1,3 para ações em estado ultimo como mostra a Tabela 3.

A deformação última na compressão (Equação 2.6), segundo a recomendação da Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC, 2002), não deve passar de 3 %. A deformação limite para tração ( $\epsilon_{lim}$ ) pode ser definido conforme a Equação 2.9.

$$\epsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c} \quad (2.9)$$

Onde:

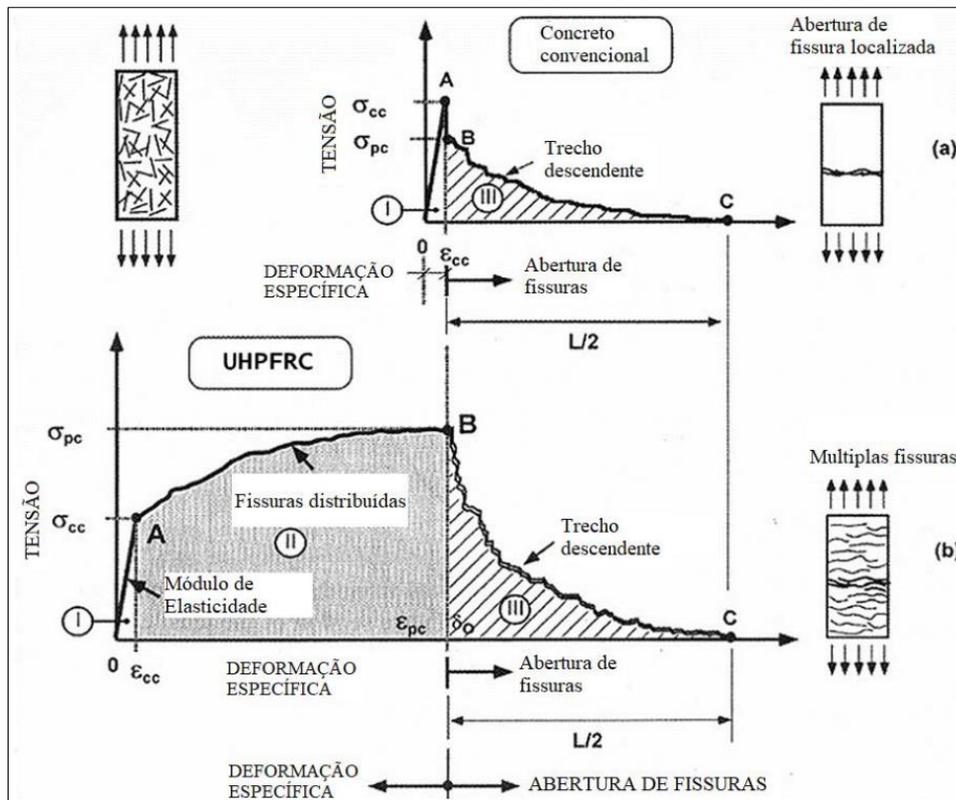
$l_f$ : Comprimento da fibra de aço.

$l_c$ : Comprimento característico da seção transversal (geralmente adota-se  $\frac{2}{3}h$ ).

#### 2.1.4.3 Ductilidade

Por conta de o UHPC ser um concreto extremamente frágil, quanto as deformações, ele é mais utilizado com a adição de fibras (UHPFRC), geralmente as fibras de aço, como já citado anteriormente no item 2.1.1. Ao interagirem com a matriz, as fibras passam a suportar uma taxa de tensões que o concreto não suportaria, proporcionando um aumento na resistência ao surgimento de fissuras no concreto, ou seja, contribui para uma melhor ductilidade e a capacidade de resistir a maiores deformações do mesmo, como é possível observar na Figura 5 que ilustra a comparação de um gráfico tensão e deformação de um concreto com e sem a adição de fibras.

**Figura 5** – Comparação do gráfico Tensão x Deformação com UHPFRC e Concreto Convencional



Fonte: NAAMAN, 2012.

Vale destacar que para o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras a eficiência das fibras retas curtas é maior do que outros tipos de fibras. Diferentemente de um concreto com fibras, onde as fibras com gancho promovem uma melhor aderência com a matriz, no UHPFRC por ser um compósito com materiais mais finos, as microfibras sem gancho já proporcionam a aderência necessária com a matriz, de modo a garantir com que as tensões pós fissuração consiga ser suportadas.

#### 2.1.4.4 Durabilidade

Durabilidade está relacionado com a vida útil longa de uma estrutura, e como está se comportará quando exposta ao ambiente que for projetada, segundo a sua forma, qualidade e capacidade original. Geralmente a durabilidade das estruturas está ligada as propriedades mecânicas e custo inicial dos materiais de construção utilizados. (METHA e MONTEIRO, 2008).

Um dos parâmetros que afetam significativamente a durabilidade do concreto é permeabilidade deste material. Segundo Metha e Monteiro (2008), a granulometria,

deformações provenientes de retração por secagem e térmica afetam diretamente a permeabilidade do concreto com o controle de microfissuração na zona de transição na interface agregado graúdo e matriz. Logo, uma estrutura porosa, permite a fácil passagem da água no concreto, tornando-o menos resistente e com uma vida útil menor que o esperado.

Dessa forma, reduzir o volume dos grandes vazios capilares da matriz garante a redução da permeabilidade, tornando o concreto um material mais durável. Uma das maneiras de garantir esta diminuição é o uso de baixa relação água/cimento, um consumo adequado de cimento, e cura e adensamento adequados. (METHA e MONTEIRO, 2008).

O UHPFRC é um compósito constituído de materiais finos, logo, trata-se de um material com baixa porosidade. Além de ser um material extremamente resistente, possui alta durabilidade sendo mais um fator para diversas aplicações que este produto vem obtendo em países como Japão, Canadá e França. Segundo Corvez e Bernardi (2018), O UHPFRC pode chegar a ser de 100 à 1000 vezes mais durável que o concreto convencional. Além disso, a sua vida útil em estruturas pode ultrapassar a marca de 150 anos.

Outros fatores, segundo os autores acima, além da baixa porosidade, explicam o fato de o UHPFRC ser um material altamente durável como a resistência contra cloretos, através de ensaios de difusão e penetração, alta resistência à abrasão e choque, resistência ao gelo-degelo e fragmentação, e baixa permeabilidade à água e gases. Todos esses parâmetros vêm sendo estudados por vários autores como Graybeal (2007), através de ensaios laboratoriais e obtendo os mesmos resultados.

Percebe-se que as elevadas propriedades do UHPFRC promovem uma maior durabilidade em estruturas, podendo até ser utilizadas em menores espessuras em relação ao concreto convencional, além de reduzir o número de intervenções periódicas nas estruturas. (GRANATO, 2020).

#### 2.1.4.5 Retração Autógena

A retração autógena é uma propriedade que ocorre puramente no menor volume dos produtos de hidratação em comparação ao volume dos reagentes. A origem da retração autógena acontece com a retração química, a qual provoca uma redução real direta do volume total. Após a pega, a estrutura intragranular sólida resiste a essa deformação e os poros parcialmente vazios são formados. (SANT; LURA; WEISS, 2006; ONGHERO, 2022).

Este fenômeno é desprezado em concretos e argamassas convencionais, onde os poros não são muitos refinados (ONGHERO, 2022). Contudo, a análise deste efeito é fundamental

para concretos que apresentam comportamento viscoelástico, como é o caso do concreto de ultra alto desempenho com fibras e concretos de alto desempenho (relação a/c menor que 0,45 e com adições de sílica ativa). Segundo DINIZ, FERNANDES e KUPERMAN (2011), a remoção da água dos poros maiores não apresenta influência sobre o fenômeno autógeno.

Segundo Onghero (2022), a retração autógena e o risco de fissuração por esse fenômeno são significativos em concretos com baixa relação água/cimento, por conta de uma menor quantidade de água presente na reação e uma estrutura de poros muito fina que geram a auto dessecação. O autor ainda comenta que a retração autógena pode ser influenciada pelos seguintes fatores: relação a/c, composição do cimento, teor de sílica ativa, finura do cimento, teor de agregado e temperatura de exposição.

Em estruturas de UHPFRC que apresentam certa rigidez, a retração química promove a geração de volumes gasosos no interior da pasta sob condições autógenas, sendo que durante as reações de hidratação do cimento mais poros são produzidos, trazendo assim uma redução no equilíbrio de pressões existentes. (HUA et al., 1995).

Para combater a retração autógena em UHPFRC, as fibras podem resistir à deformação de retração da matriz cimentícia com um baixo módulo de elasticidades, principalmente nas idades iniciais, retardando a o surgimento de fissuras decorrentes da transferência de tensão da matriz para as fibras. Vale ressaltar que a eficiência das fibras neste controle depende do seu tamanho, tipo e conteúdo, dispersão e orientação, módulo de elasticidade e razão de aspecto (L/D). (ONGHERO, 2022)

## **2.1.5 Ensaios de caracterização**

### **2.1.5.1 Ensaio de compressão e módulo de elasticidade longitudinal estático**

Para o preparo das amostras será seguido a norma técnica ABNT NBR 5738:2016, a qual define os procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova de concreto. Serão utilizados corpos de prova cilíndricos para determinação dos ensaios à compressão e à tração, por compressão diametral, do concreto convencional assim como do UHPFRC.

O concreto convencional será produzido por meio de uma betoneira de uso geral em obra, enquanto que o UHPFRC será fabricado através de um misturador. O objetivo é atingir um concreto com abatimento entre 50 a 100 mm, sendo considerado um concreto de classe S50 segundo a norma NBR 5738:2016. A determinação do abatimento, verificando a consistência do concreto, será realizado por meio do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento

do tronco de cone, mais conhecido como *Slump test*, obedecendo as condições de ensaio impostas pela norma ABNT NBR 16889:2020.

A célula de carga que será utilizada é à compressão, que pode chegar a um carregamento de 500 KN, da marca Geo Instrumentos, com campo de leitura de duas casas significativas.

As amostras de concreto convencional e UHPFRC serão moldadas em corpos de prova (CPs) com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para o concreto convencional será feita o adensamento no CPs por meio de 2 camadas, aplicando 12 golpes em cada camada. Já no UHPFRC não será necessário em virtude de, por ter um aspecto mais fluído em relação ao concreto convencional, ele seja autoadensável.

O ensaio de compressão será executado segundo a norma ABNT NBR 5739:2018, utilizando a prensa EMIC MU3 100, sendo conduzido a aplicação da carga a uma taxa de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s. A determinação da resistência a compressão se dará pela Equação 2.10.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (2.10)$$

Onde:

$f_c$ : Resistência a compressão.

F: Força máxima obtida em ensaio.

A: Área da seção transversal do corpo de prova.

Para determinação do módulo de elasticidade longitudinal será realizado ensaio obedecendo a norma técnica ABNT NBR 8522:2017. Na execução do ensaio, serão utilizados três corpos de prova cilíndricos, moldados conforme a explicação apresentada anteriormente neste item, e será necessário o aproveitamento dos resultados do ensaio à compressão, a partir da Equação 2.10.

O processo ocorrerá através da metodologia A da norma ABNT NBR 8522:2017, que consiste em quatro etapas.

Na primeira etapa, o CP será carregado até a força correspondente à tensão do limite superior, e, este carregamento deverá ser mantido por 60 segundos. Em seguida, o corpo de prova é descarregado até uma força próxima de zero, não devendo este perder o contato com o prato superior da máquina Instron EMIC 23-600. Na sequência (etapa 2), o modelo será carregado até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa e manter a mesma por 60 segundos. Após esse processo, a carga é aumentada no CP até a força correspondente à tensão do limite

superior e mantida por 60 segundos. Por fim, a etapa 2 é finalizada descarregando o CP até uma força próxima de zero. A etapa 3 é a repetição da etapa 2.

O ensaio é finalizado com a etapa 4, aonde o corpo de prova deve ser carregado pela força proveniente à tensão de 0,5 MPa e mantida por 60 segundos. Registrar as deformações lidas em um intervalo máximo de 30 segundos. Em seguida, carrega-se o CP até a força correspondente à tensão do limite superior e mantida por 60 segundos e registre as deformações lidas em um intervalo máximo de 30 segundos. Ao final, retira-se a instrumentação da amostra, caso seja necessário, e aplica-se um carregamento no corpo de prova na mesma taxa de velocidade, explanada anteriormente, até atingir a sua ruptura denominada de resistência efetiva. Assim, o módulo de elasticidade pode ser calculado pela Equação 2.11.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (2.11)$$

Aonde:

$E_{ci}$ : Módulo de Elasticidade [GPa].

$\sigma_b$ : Tensão do limite superior, considerada como 30% da resistência à compressão [MPa].

0,5: Valor da tensão básica [MPa].

$\varepsilon_b$ : Deformação específica do concreto, correspondente ao  $\sigma_b$ .

$\varepsilon_a$ : Deformação específica do concreto sob a tensão básica (0,5 MPa).

#### 2.5.1.2 Ensaio de tração à flexão 4 pontos

O ensaio de tração à flexão será baseado na norma ABNT NBR 12142:2010, onde inicia-se com a preparação do molde prismático, conforme a norma técnica NBR 5738:2016, com dimensões de 15 x 15 x 45 cm (base x altura x comprimento entre os apoios) como é possível observar na seção genérica ilustrada na Figura 12. Vale ressaltar que para as amostras reforçadas com UHPFRC a espessura vai variar 1 cm, adotando-se assim, a camada de reforço à flexão nas espessuras de 3 cm, 4 cm e 5 cm, como mostra a Figura 13. Serão necessárias três amostras de cada grupo apresentado.

O procedimento inicia-se inserindo o corpo de prova com seu lado maior paralelo ao eixo longitudinal, sobre os apoios, deixando-o centrado. As faces laterais devem ser posicionadas de maneira que fiquem em contato com os elementos de aplicação de força, assim

como os apoios. A força deve ser aplicada continuamente e sem choques, de maneira que o aumento de tensão esteja entre 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min, até atingir a ruptura. No final, mede-se a largura e altura média da seção, com precisão de 1 mm. A média do ensaio é realizado com 3 amostras.

A resistência à tração na flexão deve ser calculada de acordo com a Equação 2.12. No caso de ruptura que aja fora do terço médio, como é apresentado na Figura 6, a uma distância menor que 5% de comprimento  $l$  do prisma, a resistência à tração na flexão é obtida pela Equação 2.13. O ensaio será executado no equipamento Instron EMIC 23-600 presente no laboratório de estruturas da Universidade Estadual de Maringá.

$$f_{ct, f} = \frac{F * l}{b * d^2} \quad (2.12)$$

$$f_{ct, f} = \frac{3F * a}{b * d^2} \quad (2.13)$$

Aonde:

$f_{ct, f}$ : Resistência à tração na flexão [MPa].

F: Força máxima registrada [N].

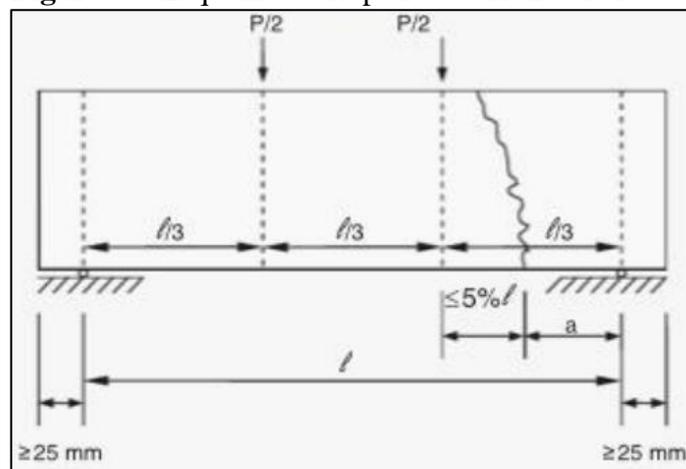
$l$ : Dimensão do vão entre os apoios [mm].

b: Largura média do corpo de prova [mm].

d: Altura média do corpo de prova [mm].

a: Distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo [mm].

**Figura 6** – Esquema de Ruptura Ocorrendo Fora do Terço Médio



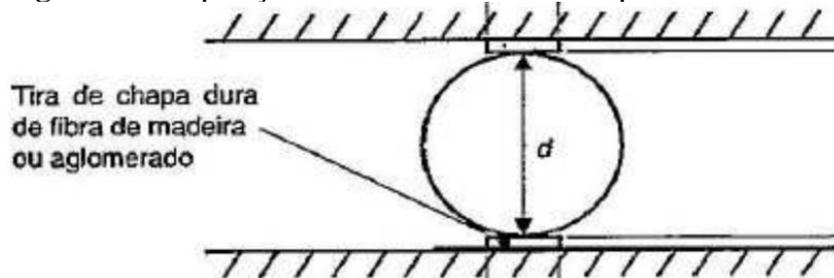
Fonte: ABNT NBR 12142, 2010.

### 2.5.1.3 Ensaio de tração por compressão diametral

Este ensaio é regulamentado pela norma ABNT NBR 7222:2011, onde a amostra deve ser colocada na prensa de forma que a aplicação da carga ocorra sobre a o comprimento do CP, de modo que a aplicação de forças de compressão no decorrer do seu comprimento irá provocar tensões de tração ao longo do diâmetro da amostra.

A norma pede que a amostra deva ser colocar em tiras de chapa dura de fibra de madeira ou aglomerado, isentas de defeitos, com o objetivo de promover uma distribuição uniforme da carga ao longo do comprimento, como mostra a Figura 7.

**Figura 7** – Disposição do CP no ensaio de compressão diametral



Fonte: ABNT NBR 7222, 2011.

A carga deve ser aplicada continuamente, a uma velocidade de  $0,05 \pm 0,02$  MPa/s até a ruptura do corpo de prova. Para determinar a resistência à tração por compressão diametral, utiliza-se a Equação 2.14.

$$f_{ct, sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot \ell} \quad (2.14)$$

Aonde:

$f_{ct, sp}$ : Resistência à tração por compressão diametral [MPa].

F: Força máxima registrada [N].

$\ell$ : Comprimento do corpo de prova [mm].

d: Diâmetro do corpo de prova [mm].

### 2.3 USO DO UHPFRC COMO REFORÇO ESTRUTURAL

Apesar das estruturas em concreto convencional garantir, na maioria das situações em que é solicitada, uma alta performance estrutural, com o passar da sua vida útil, estados de exposição ambiental severas, carregamentos não previstos em projeto, elementos com fissuração além do aceitável, falha na execução da peça, dentre outros cenários, torna a sua durabilidade comprometida. Quando a estrutura atinge este estágio, o uso de técnicas de reforço ou recuperação de estruturas se fazem necessárias.

É importante ressaltar a diferença entre os termos recuperação e reforço de estruturas. Julio, Branco e Silva (2003) e Granato (2020), comentam que a recuperação é a técnica que restaura a peça estrutural danificada a sua resistência original. Reforço de estruturas é um procedimento com o objetivo de recuperar a estrutura e, promover a mesma, um aumento na sua resistência em relação ao elemento original. Logo, para realizar determinada técnica de reforço, deve-se recuperar a estrutura previamente.

Existem diversas técnicas de reforço e reabilitação para estruturas em concreto armado como colagem de placas de aço externamente (ROBERTS; HAJI-KAZEMI, 1989), polímeros reforçados com fibras (AL-MEKHLAFY; ASHTEYAT, 2011; FERRARI, 2002; FERRARI, 2007, e recentemente o uso de concreto de ultra alto desempenho como reforço, dando ênfase a este concreto com adição de fibras (OH, 1994; BRÜHWILLER; DENARIÉ, 2013; GRANATO, 2020; PONCETTI, 2021; TAYEH *et al.*, 2013; DOO-YEOL *et al.*, 2015; AL-OSTA *et al.*, 2016).

Uma das vantagens do uso do UHPFRC, principalmente as que apresentam comportamento de pseudo-encruamento, como reforço estrutural está ligada à sua alta durabilidade, em relação ao concreto convencional. Essa alta durabilidade promove uma redução no número de manutenções periódicas na estrutura reforçada, garantindo assim, além de um aumento na resistência, uma economia nos custos de intervenções na estrutura e uma maior segurança aos usuários daquela estrutura.

O desempenho do reforço na estrutura está ligado a diversos fatores como a ligação entre o UHPFRC e a estrutura em concreto convencional que será reforçada, a qual dá-se o nome de substrato. Segundo Martinola *et al.* (2010), podem ocorrer várias falhas na ligação reforço – substrato como tensões induzidas entre as camadas, escorregamento entre camadas em função da má aderência entre as mesmas.

A boa aderência entre o reforço e o substrato é essencial para a garantia de um bom desempenho, tendo em vista que, dessa forma, o conjunto trabalhe de forma homogênea. Para

que esta premissa aconteça na prática, mesmo com o conhecimento de que essas duas camadas são compostas de materiais distintos, é muito importante a preparação da interface.

Um dos testes que pode ser realizado para verificar a aderência entre materiais de propriedades diferentes é o ensaio de cisalhamento inclinado (*slant shear test*), cuja sua execução é baseada em um ensaio de compressão em um corpo de prova moldado com os dois materiais, aonde na metade do CP deve haver uma interface entre os materiais em um plano inclinado a 45°, aproximadamente, como mostra a Figura 8. Ao aplicar a carga a tendência é ocorrer uma ruptura por cisalhamento e escorregamento ao longo deste plano inclinado.

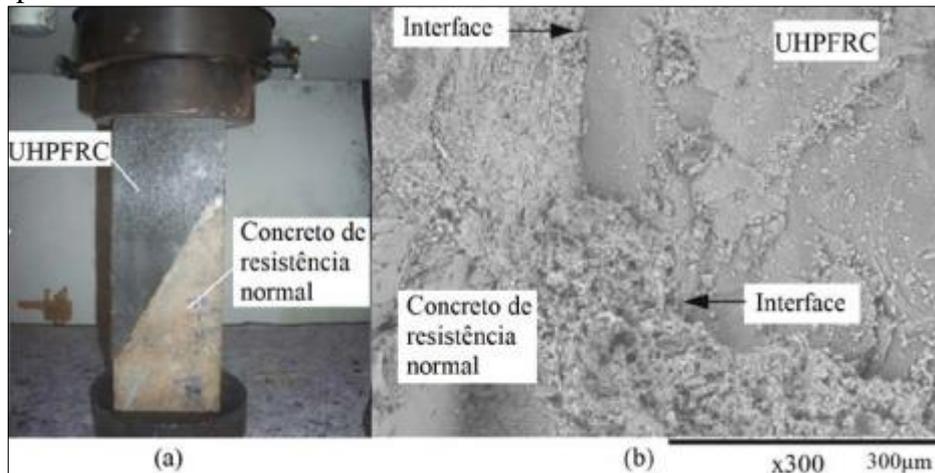
**Figura 8** – Amostra de um ensaio *Slant Shear Test*



Fonte: GRANATO, 2020.

A aderência entre o concreto convencional (como substrato) e o UHPFRC (como camada de reforço) apresenta resultados excelentes, segundo Tayeh *et al.* (2012). O autor relata em seu estudo que devido o UHPFRC ser um material com baixa porosidade, a interface entre este e o concreto convencional gera uma zona rígida e com altas propriedades que, durante o *slant shear test*, a ruptura ocorre no substrato em concreto convencional, possuindo uma maior zona de transição que o UHPFRC, e não na interface entre os materiais como era de se esperar. A Figura 9 apresenta o CP utilizado no *slant shear test* e a microestrutura da interface UHPFRC e substrato em concreto convencional, após o ensaio, do estudo do autor citado.

**Figura 9** – (a) Amostra do ensaio *Slant Shear Test* e (b) Microestrutura da amostra após o ensaio



Fonte: TAYEH *et al.*, 2012.

Desta forma, Tayeh *et al.* (2012), mostra o alto desempenho entre o UHPFRC e o concreto convencional, promovendo um futuro promissor para o uso do UHPFRC como reforço em estruturas de concreto convencional pois a alta aderência e a rigidez na interface entre esses dois materiais garantem um reforço eficiente e durável, além de ser reforço que necessitará de um número menor de intervenções periódicas durante a sua vida útil.

É claro que, para garantir está excelente aderência, o autor comenta a importância de se fazer um correto preparo do substrato antes da inserção do reforço, devendo eliminar toda a nata do concreto e deixando toda a rugosidade do material aparente.

A retração do material de reforço também pode ser um fator de patologias e queda no desempenho da estrutura reforçado, pois o material do reforço apresenta propriedades diferentes do material do substrato, ocasionando em possíveis restrições de deformações na interface, promovendo um aumento de tensões e, conseqüentemente, o surgimento de fissuração e/ou delaminação. (GRANATO, 2020).

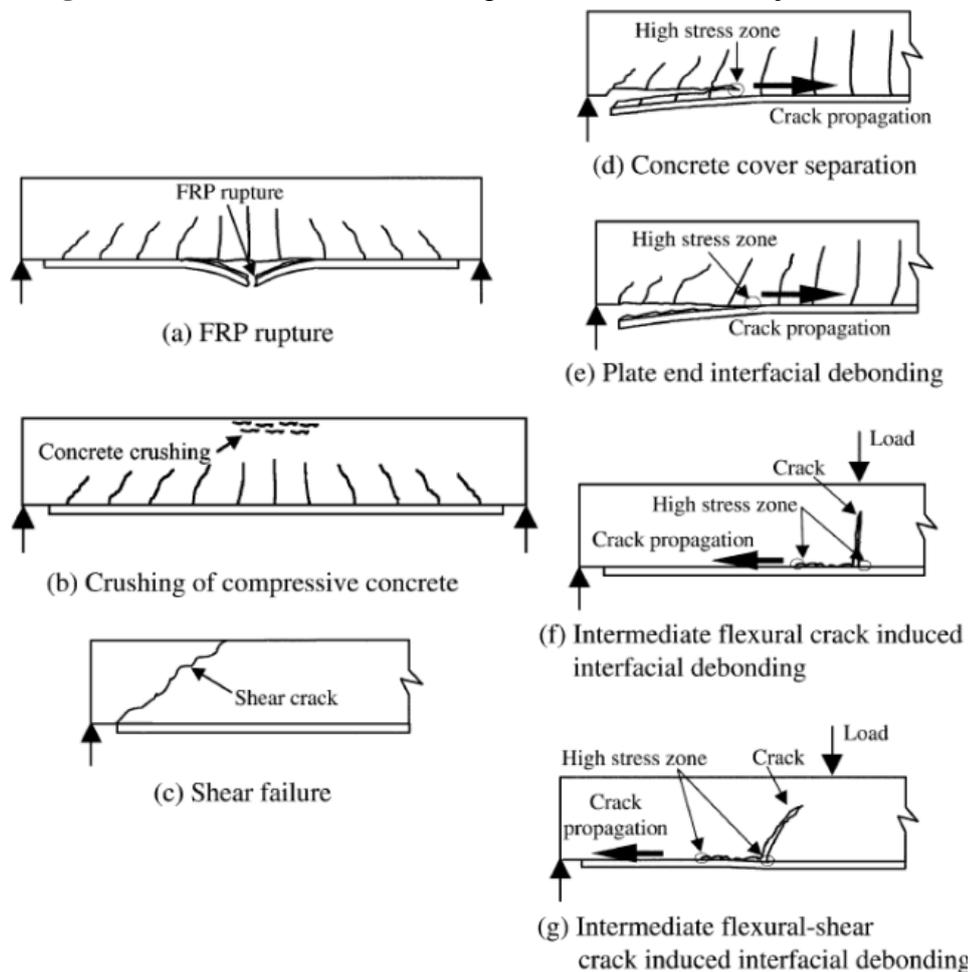
O módulo de elasticidade também influencia na eficiência do reforço, pois quanto maior este parâmetro mais resistente ele estará contra o surgimento de fissuração, porém, provocam maiores tensões na interface reforço-substrato.

No caso do UHPFRC, por ser um material com baixa porosidade, sua retração é muito pequena sendo mais um fator para que seja um material de reforço que apresente resultados promissores. Já com relação ao módulo de elasticidade, este material possui alto módulo, graças ao uso das fibras, conferindo maior resistência à fissuração e, mesmo com a indução de tensões na interface, esta possui alta rigidez, conforme Tayeh *et al.* (2012), podendo estas tensões induzidas serem suportadas.

Mesmo com a alta aderência que existe entre o UHPFRC e o concreto convencional, há a possibilidade de ocorrer uma concentração de tensões na interface entre os materiais, promovendo o surgimento de fissuras nesta região. Estas fissuras podem provocar a falha da camada de reforço com o substrato por meio do descolamento da camada de reforço.

Segundo Teng et al. (2003), os modos de falha em estruturas de concreto podem ocorrer de duas maneiras principais: pelo surgimento de tensões altas nas extremidades ou pelo aparecimento de fissuração na região central da placa de reforço, como é possível observar na Figura 10.

**Figura 10** – Modos de Falha de Vigas de Concreto Reforçadas



Fonte: TENG *et al.*, 2003.

Esse mecanismo pode acontecer a partir do momento em que a fissura passa do concreto para o reforço em UHPFRC, ou seja, que ela atinge essa interface. Esta fissura promove uma concentração de tensões na região da interface substrato e reforço e quando a tensão crítica é atingida ocorre um processo de descolamento do reforço, sentido a extremidade da camada, gerando o colapso da viga. Por esse motivo, em uma modelagem é importante definir a ligação

na interface entre concreto e reforço sem ser rígida podendo permitir pequenas deformações e microfissurações nesta região. (TENG *et al.*, 2003).

### **2.3.1 Vigas em concreto submetidas à flexão e reforçadas com UHPFRC**

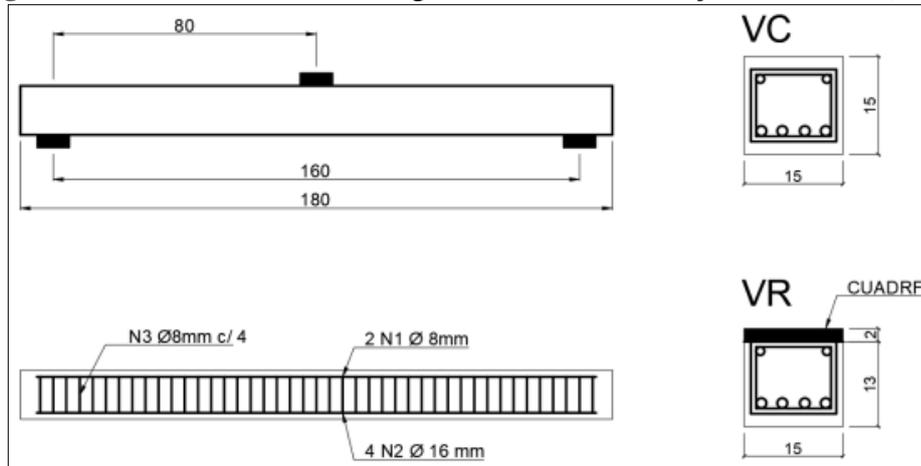
O uso do concreto de ultra alto desempenho com adição de fibras como reforço estrutural já está presente em várias pesquisas envolvendo diversas técnicas de reforço como encamisamento de pilares (ENAMI, 2017; PONCETTI, 2021; JULIO *et al.*, 2003), técnicas de recuperação (MARTINOLA, 2010; BRÜHWILER; DENARIÉ, 2013), reforço de vigas com armaduras sujeitas à corrosão aonde é possível aumentar a capacidade do elemento, mesmo possuindo armadura com seção prejudicada por conta da exposição (CHEN, YU e LEUNG, 2018).

Abordando especificamente o uso de UHPFRC em vigas à flexão, os estudos mostram a alta eficiência deste material em recuperar a peça e promover um aumento na sua capacidade de carga. Estudos experimentais mostram a eficiência deste compósito agindo na parte tracionada da viga, sendo que, quando é adicionado armadura junto ao reforço, o aumento na rigidez e no suporte de cargas é significativo. Além disso, o uso das fibras promove uma fissuração mais distribuída e tardia no seu aparecimento, e o seu comportamento monolítico com a viga é um fator fundamental para a garantia destes resultados (HABEL, 2004; HABEL, DENARIÉ; BRÜHWILER, 2007).

#### **2.3.1.1 Granato (2020)**

Granato (2020), realizou um estudo experimental utilizando o UHPFRC como reforço à flexo-compressão, isto é, a inserção do reforço na parte superior (região comprimida) da viga. As vigas, com seção transversal de 15 x 15 x 180 cm e vão livre de 160 cm, conforme a Figura 11, foram submetidas ao ensaio de flexão em três pontos como mostra a Figura 12. As vigas não reforçadas que serviram de referência possuem as dimensões de 15 x 15 cm. Nesse sentido, percebe-se que a ideia do autor é substituir o reforço na camada de recobrimento da viga. Tanto as vigas reforçadas quanto as vigas não reforçadas possuem duas barras de aço de 8 mm na região comprimida e quatro barras de 16 mm na região tracionada. Foram moldadas 6 amostras, sendo 2 do tipo não reforçada e 4 do tipo reforçada.

**Figura 11** – Detalhamento das Vigas Com e Sem Reforço de Granato (2020)



Fonte: GRANATO, 2020.

**Figura 12** – Amostras Submetidas ao ensaio de flexão de 3 pontos de Granato (2020)



Fonte: GRANATO, 2020.

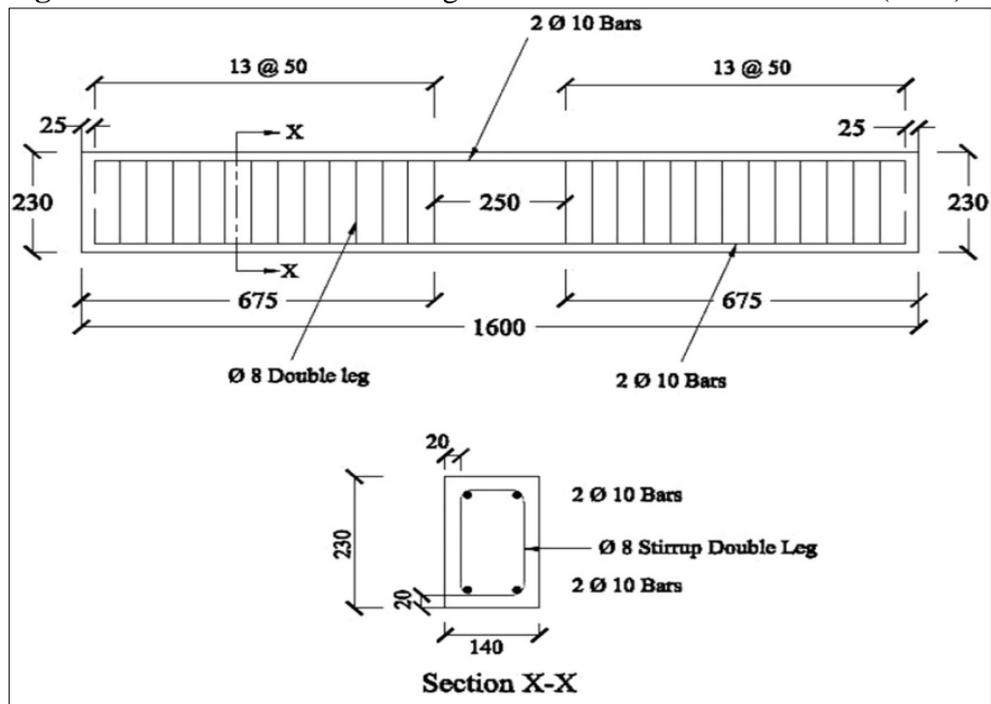
Os resultados obtidos, segundo Granato (2020), mostraram a viabilidade do uso do UHPFRC como reforço inclusive de vigas superarmadas, isto é, com ruptura prevista para acontecer no domínio 4. A resistência à compressão obtida foi na ordem de 140 MPa, enquanto que a resistência à tração apresentada foi de 11 MPa. O autor ainda comenta que houve um aumento de 45% na carga última da viga e 32 % na sua rigidez, utilizando apenas a camada de cobrimento, que no estudo foi de 2 cm. Esses resultados demonstra as excelentes propriedades que esse material compósito proporciona na estrutura, e, com sua alta durabilidade, ser um grande material para o uso em reforço.

### 2.3.1.2 Al-Osta *et al.* (2016)

Outro estudo sobre a análise do comportamento de vigas de concreto reforçadas com UHPFRC à flexão foi o de Al-Osta *et al.* (2016), onde ele realizou um estudo experimental, bem como a validação por meio de análise computacional através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

No programa experimental, os autores fabricaram vigas em concreto, contendo 2 barras de aço de 10 mm, tanto na parte comprimida como na parte tracionada da seção, e armadura transversal com barra de 8 mm, espaçados a cada 50 mm como mostra a Figura 13. Para o controle tecnológico dos materiais, tanto concreto convencional quanto o UHPFRC, toda a fabricação das amostras para o estudo foi realizada por uma empresa de pré-moldados. AL-OSTA *et al.* (2016).

**Figura 13** – Detalhamento das Vigas de Concreto de Al-Osta *et al.* (2016)

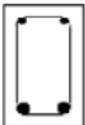


Fonte: AL-OSTA *et al.*, 2016.

Foi realizado no estudo os ensaios de resistência à compressão axial, utilizando extensômetros para obter o comportamento tensão x deformação das amostras, ensaios de aderência entre o concreto convencional e o UHPFRC, como o ensaio de cisalhamento inclinado (*slant shear test*), e o ensaio de resistência à flexão de 4 pontos. Em relação ao grupo amostral, tem-se o grupo da viga de concreto convencional como referência da pesquisa (RC-

Control), o grupo onde foi inserido a camada de UHPFRC, de 3 cm, apenas na parte tracionada da viga (RC-BOT SJ), o grupo com reforço em UHPFRC apenas nas laterais da viga em concreto (RC-2 SJ), e o grupo onde o reforço foi inserida em todas as faces da viga, menos o topo da seção (RC-3 SJ), correspondente a parte comprimida da mesma, conforme a Figura 14. AL-OSTA *et al.* (2016).

**Figura 14** – Detalhamento do Grupo Amostral de Al-Osta *et al.* (2016)

Strengthening configurations (thickness of UHPFRC Jacket = 30 mm)	
Strengthening pattern	Specimen identification
	RC Control
	RC-BOT SJ
	RC-2 SJ
	RC-3 SJ

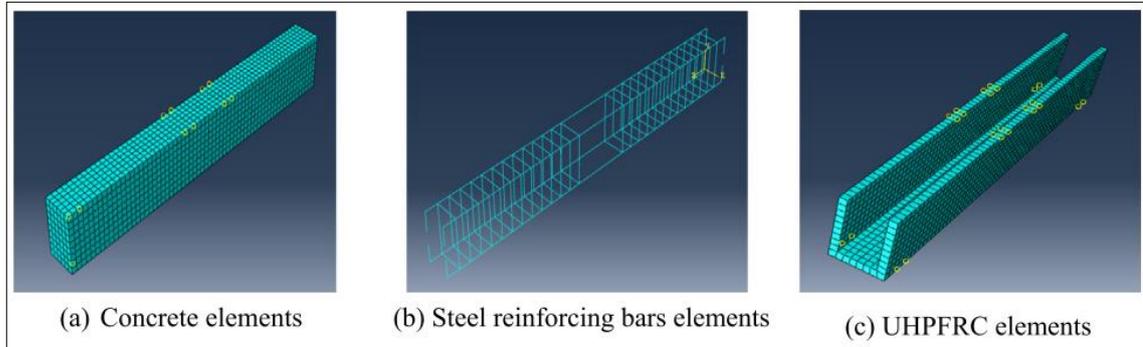
Fonte: AL-OSTA *et al.*, 2016.

Os resultados apresentados foi um aumento de 89% na capacidade de carga para a viga reforçada nas 3 faces de sua seção com UHPFRC, com ruptura dúctil, seguido de 16 % de aumento da capacidade de carga das vigas com reforço em UHPFRC apenas na parcela tracionada, com ruptura frágil, e para as vigas com UHPFRC apenas nas laterais houve um aumento de 46 % no suporte de carregamentos e uma ruptura dúctil. Dentro dos três grupos, segundo Al-Osta *et al.* (2016), as vigas com reforço em UHPFC apenas nas laterais são os que apresentaram melhores resultados promissores, não apenas por suportar maiores cargas, mas também pela ductilidade apresentada na peça.

Foram realizadas análises numéricas e analíticas para avaliar o comportamento à flexão do reforço em UHFRC e comparar com o programa experimental desenvolvido. De acordo com

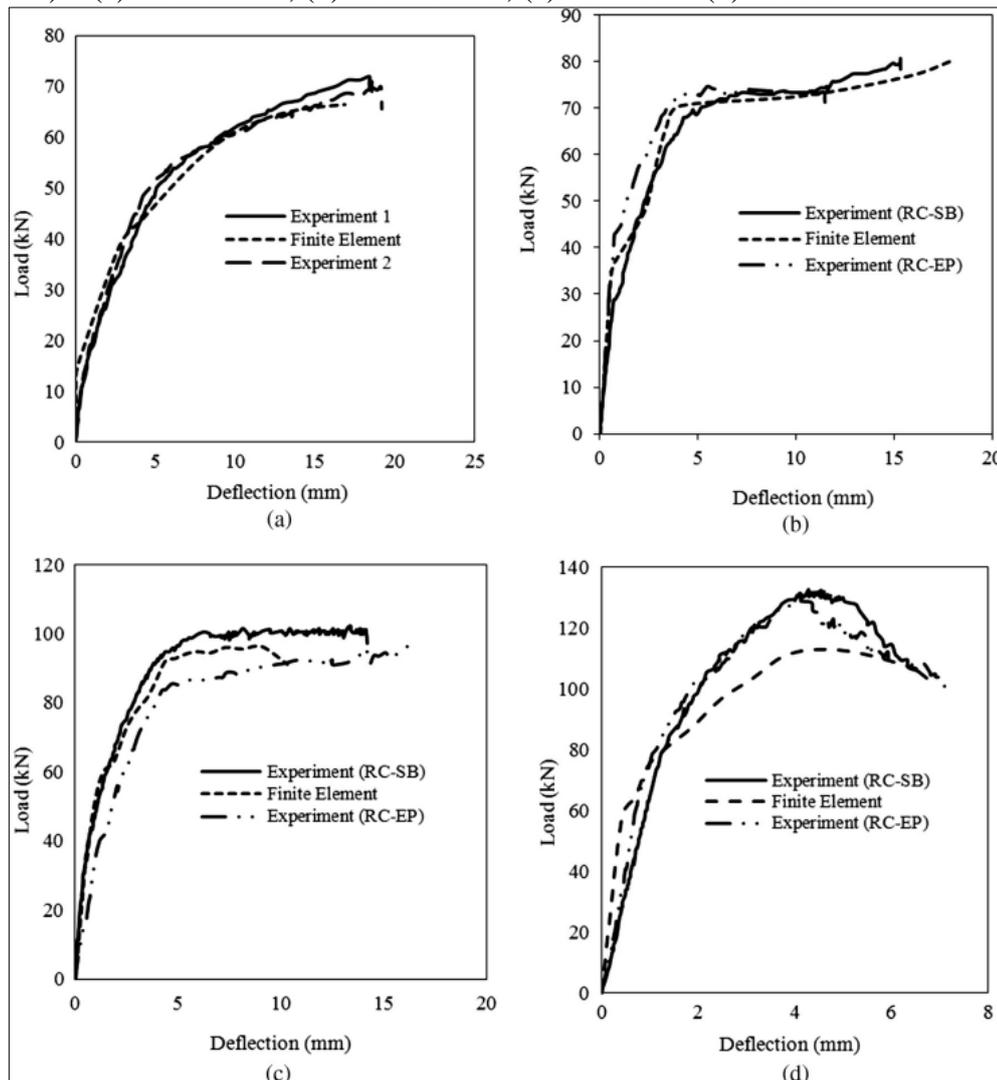
Al-Osta *et al.* (2016), o software utilizado foi o Abaqus, e a modelagem bem como os gráficos comparando o modelo numérico com o experimental constam nas Figuras 15 e 16.

**Figura 15** – Malha dos Elementos de Al-Osta *et al.* (2016) – (a) Concreto, (b) Armadura e (c) UHPFRC



Fonte: AL-OSTA *et al.*, 2016.

**Figura 16** – Gráficos Comparando Modelo Numérico x Experimental de Al-Osta *et al.* (2016) – (a) RC-Control, (b) RC-BOT SJ, (c) RC-2 SJ e (d) RC-3 SJ

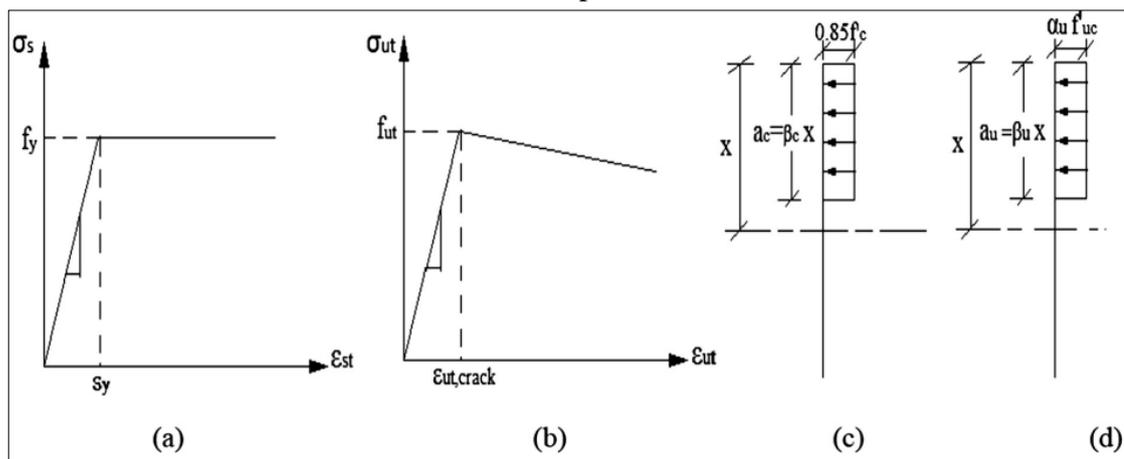


Fonte: AL-OSTA *et al.*, 2016.

Analisando os gráficos, observa-se uma similaridade entre o modelo numérico e o experimental entre os grupos RC-Control, RC-BOT SJ e RC-2 SJ, validando assim o método numérico desenvolvido por Al-Osta *et al.* (2016). Já o grupo RC-3 SJ apresentou uma certa discrepância depois da fase elástica das curvas do modelo numérico com o experimental, em relação aos outros grupos o que é justificado, segundo os autores, por conta do comportamento da ruptura entre os dois modelos, e no caso do experimental, a orientação das fibras no momento da ruptura e propagação da fissuração é um fator preponderante, parâmetro este que não se consegue simular no modelo dos elementos finitos.

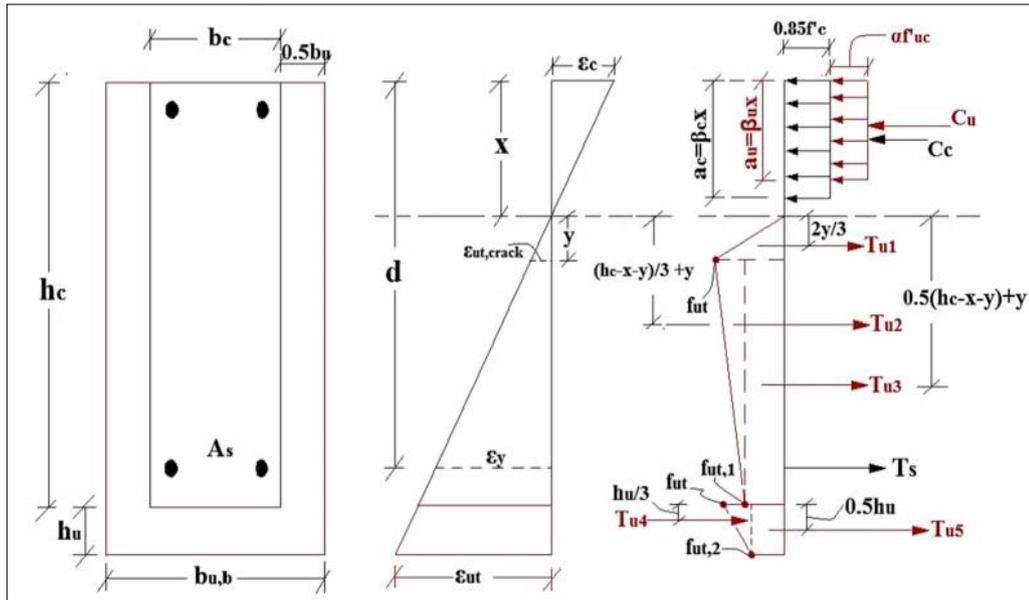
Na investigação analítica, o momento resistente das amostras, tanto em concreto convencional quanto nas seções reforçadas em UHPFRC, foi analisado por meio de um modelo analítico/mecânico na seção fissurada proposto pelos autores supracitados na Figura 17. O momento da ruptura é calculado através das Equações 2.15-2.26, considerando o equilíbrio entre as forças internas na região específica que ocorre a fissuração na peça. As considerações feitas para os materiais são observadas na Figura 18. Percebe-se que na tração, o comportamento considerado para o UHPFRC foi na deformação ótima, correspondente ao momento em que o material inicia a fissuração. Já para o comportamento à compressão, foi considerado o modelo de distribuição das tensões do retângulo equivalente.

**Figura 17** – Leis dos materiais no modelo analítico de Al-Osta *et al.* (2016) – (a) Armadura, (b) UHPFRC à tração, (c) Concreto Convencional à compressão e (d) UHPFRC à compressão



Fonte: AL-OSTA *et al.*, 2016.

Figura 18 – Modelo analítico de Al-Osta *et al.* (2016)



Fonte: AL-OSTA *et al.*, 2016.

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_c \cdot x \cdot b_c \quad (2.15)$$

$$C_u = \alpha_u \cdot f'_{uc} \cdot \beta_u \cdot x \cdot b_u \quad (2.16)$$

$$\beta_c = 0,85 - 0,05 \cdot \frac{f'_c - 28}{7} \cdot f'_c > 28 \text{ MPa} \quad (2.17)$$

$$\alpha_u = \begin{cases} 0,85 & f'_{uc} \leq 69 \text{ MPa} \\ 0,85 - 0,0029 \cdot (f'_{uc} - 69) \geq 0,75 & f'_{uc} > 69 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\beta_u = \begin{cases} 0,85 & f'_{uc} \leq 28 \text{ MPa} \\ 0,85 - 0,00725 \cdot (f'_{uc} - 28) \geq 0,65 & f'_{uc} > 28 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad (2.20)$$

$$T_{u1} = 0,5 \cdot f_{ut} \cdot b_u \cdot y \quad (2.21)$$

$$T_{u2} = 0,5 \cdot (f_{ut} - f_{ut,1}) \cdot b_u \cdot (h_c - x - y) \quad (2.22)$$

$$T_{u3} = b_u \cdot (h_u - x - y) \cdot f_{ut,1} \quad (2.23)$$

$$T_{u4} = 0,5 \cdot h_u \cdot (f_{ut} - f_{ut,2}) \cdot b_{u,b} \quad (2.24)$$

$$T_{u5} = h_u \cdot b_{u,b} \cdot f_{ut,2} \quad (2.25)$$

$$\Sigma F = (C_c + C_u) - (T_s + T_{u1} + T_{u2} + T_{u3} + T_{u4} + T_{u5}) = 0 \quad (2.26)$$

Aonde:

$C_c$ : Força de compressão no concreto convencional.

$C_u$ : Força de compressão no UHPFRC.

$T_s$ : Força de tração da armadura de aço.

$T_u$ : Força de tração no UHPFRC.

$f_c$ : Resistência à compressão do concreto convencional.

$f_{uc}$ : Resistência à compressão do UHPFRC.

$f_{ut}$ : Tensão de pico do UHPFRC.

$f_{ut,n}$ : Resistência à tração do UHPFRC correspondente a deformação  $\epsilon_{ut,n}$ .

$h_c$ : Altura da viga em concreto convencional.

$h_u$ : Espessura da camada de reforço em UHPFRC.

$x$ : Posição da linha neutra da seção.

$y$ : Profundidade da fissura, a partir da linha neutra da seção, no diagrama de deformação.

$\alpha_u$ : Fator de redução da largura do UHPFRC correspondente ao bloco de tensões do retângulo equivalente.

$\beta_u$ : Fator de redução da profundidade do UHPFRC correspondente ao bloco de tensões do retângulo equivalente.

$\beta_c$ : Fator de redução da profundidade do concreto convencional correspondente ao bloco de tensões do retângulo equivalente.

$\epsilon_c$ : Deformação de compressão na camada superior da viga.

$\epsilon_{ut}$ : Deformação de tração na camada superior da viga.

$\epsilon_{ut,crack}$ : Deformação de pico do UHPFRC.

$\epsilon_y$ : Deformação de escoamento do aço

$a_c$ : Altura do retângulo equivalente de tensões do concreto convencional.

$a_u$ : Altura do retângulo equivalente de tensões do UHPFRC.

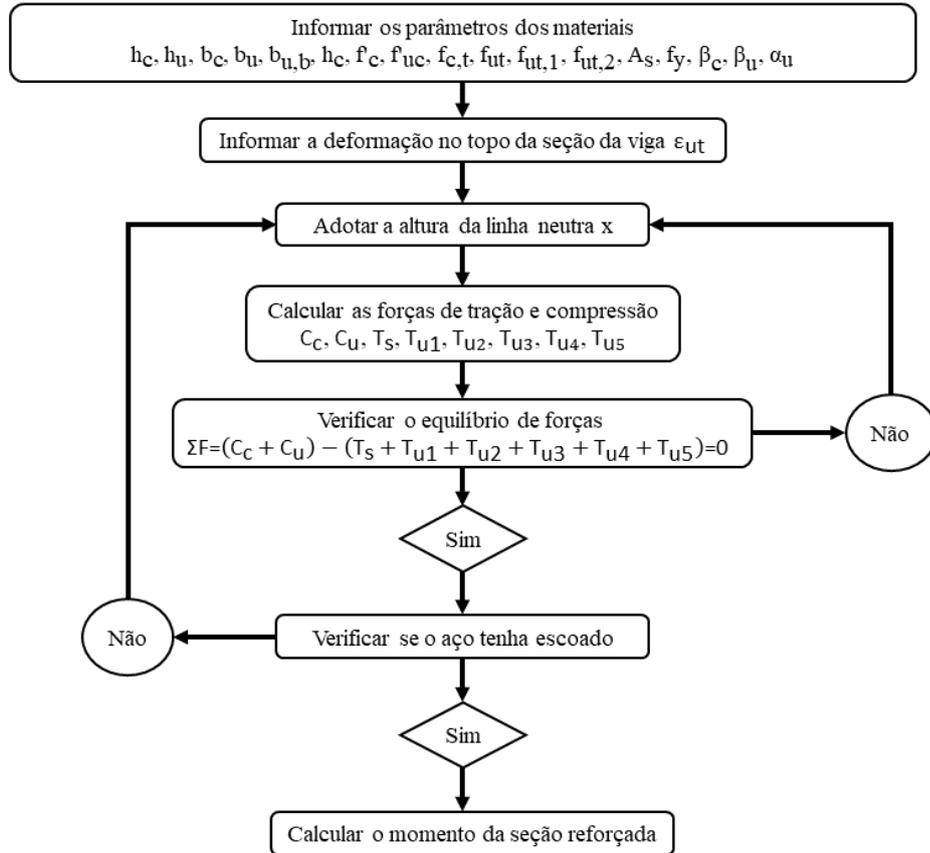
$b_c$ : Base correspondente ao concreto convencional.

$b_u$ : Base correspondente ao UHPFRC nas laterais.

$b_{u,b}$ : Base inferior correspondente ao UHPFRC.

Segundo Al-Osta *et al.* (2016), o momento da viga reforçada é determinado obedecendo o procedimento descrito no fluxograma da Figura 19.

**Figura 19** – Fluxograma modelo analítico de Al-Osta *et al.* (2016)

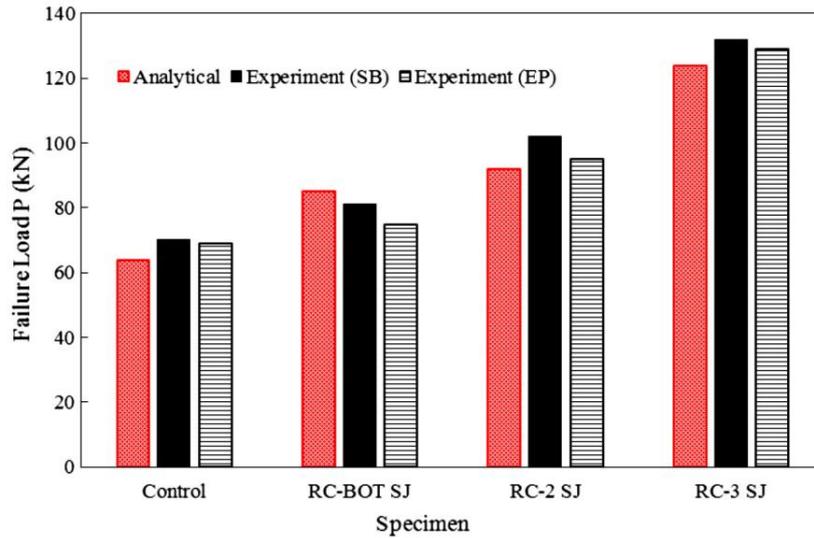


Fonte: AL-OSTA *et al.* adaptado, 2016.

O modelo analítico apresentou bom desempenho, quando comparado a pequena diferença entre os valores obtidos de forma analítica com o experimental como mostra a Figura 20. Percebe-se um baixo erro entre as colunas em vermelho, representando o método analítico, com as demais colunas sinalizando a parcela experimental do estudo.

De acordo com Al-Osta *et al.* (2016), o estudo pode mostrar a excelente aderência que o UHPFRC apresenta com o concreto convencional; o aumento da capacidade de carga que a viga reforçada apresenta com o reforço em UHPFRC, sendo mais eficientes quando usado o reforço nas três faces do corpo de prova, reduzindo as deformações apresentadas anteriormente com as amostras em concreto convencional; os excelentes resultados apresentados tanto pelo modelo numérico desenvolvido como pelo modelo analítico proposto, obtendo valores muito semelhantes como a análise experimental, validando assim os mesmos.

**Figura 20** – Comparação Analítico x Experimental de Al-Osta *et al.* (2016)

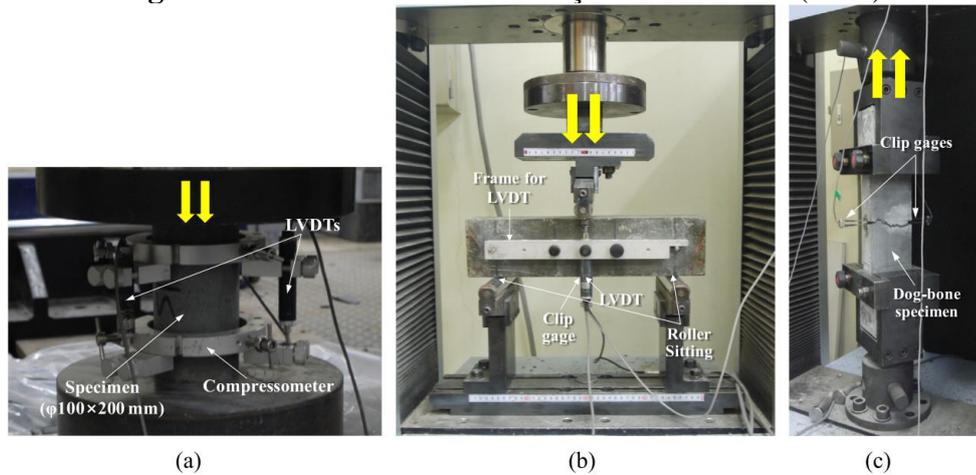


Fonte: AL-OSTA *et al.*, 2016.

### 2.3.1.3 Yoo *et al.* (2016)

O trabalho de Yoo *et al.* (2016), que estuda o comportamento à flexão de vigas em UHPFRC reforçadas com barras de aço e barras de fibra de vidro, sendo um pouco diferente do problema que será analisado neste estudo pois o reforço não é em UHPFRC, como em Granato (2020) e Al-Osta *et al.* (2016), mas sim o elemento estrutural em si é confeccionado com UHPFRC. Dentro do programa experimental foi realizado o ensaio de compressão axial (Figura 21a), o ensaio de flexão de 3 pontos (Figura 21b) e o ensaio de tração direta (Figura 21c). Os corpos de provas utilizados foram 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para os CPs cilíndricos, e seção 100 x 100 mm com 400 mm de comprimento, para as amostras prismáticas. Para análise e medição das deformações fora utilizado extensômetros do tipo *Clip gage* e transdutores de deslocamento LVDT.

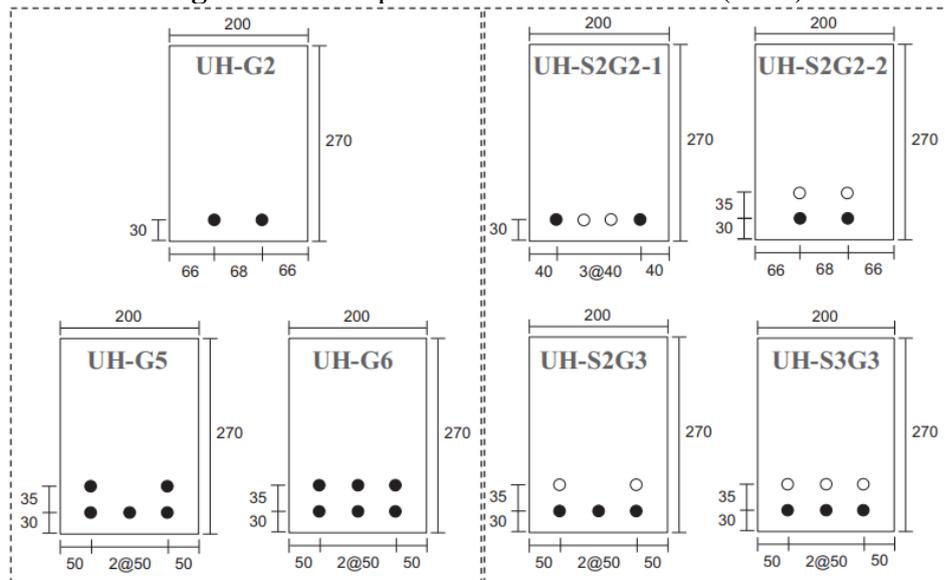
**Figura 21 – Ensaio de caracterização de Yoo *et al.* (2016)**



Fonte: YOO *et al.*, 2016.

No ensaio de flexão de três pontos foi executado previamente um entalhe no meio do vão do prisma. O objetivo do experimento foi em obter uma curva tensão – deformação do tipo *softening*. Segundo Yoo *et al.* (2016), o estudo é dividido em dois grupos principais, sendo as vigas em UHPFRC reforçadas com barras de fibra de vidro e o grupo das vigas em UHPFRC reforçadas com barras de aço e barras de fibra de vidro, definido pelos autores como vigas híbridas. A Figura 22 mostra o grupo amostral, aonde o círculo preenchido simboliza as barras em fibra de vidro enquanto o círculo sem preenchimento indica as barras de aço.

**Figura 22 – Grupo Amostral de Yoo *et al.* (2016)**

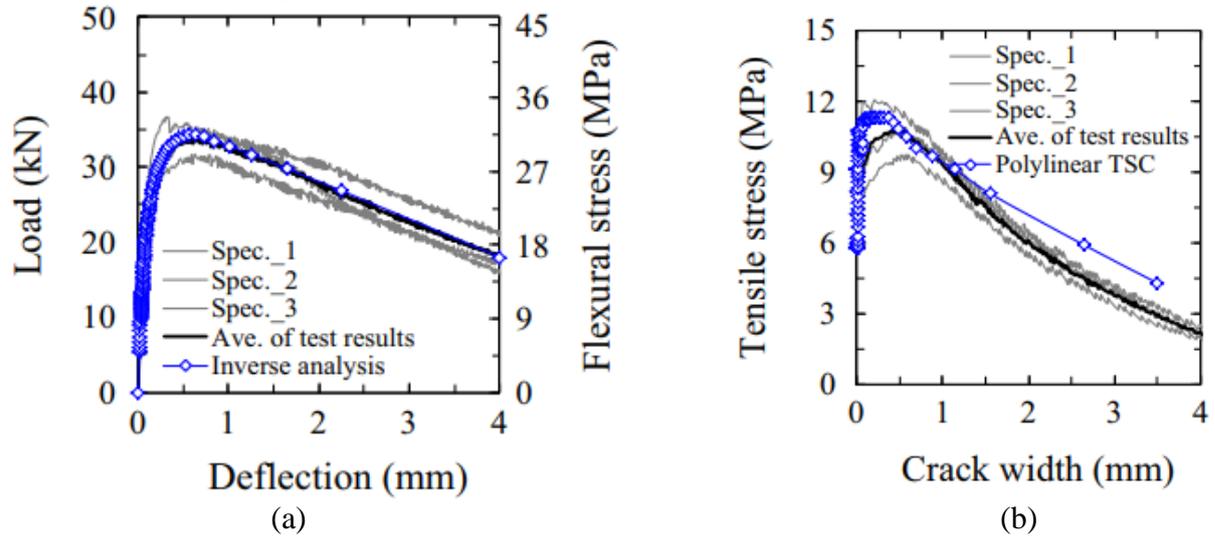


Fonte: YOO *et al.*, 2016.

A Figura 23 apresenta o resultado experimental de Yoo *et al.* (2016). Percebe-se o comportamento dúctil característico deste material na Figura 23a e 23b, aonde mesmo após

atingir a carga máxima, existe uma capacidade de suporte e a presença de deformabilidade da peça. Também é possível observar que a curva tensão-deformação no pós-pico apenas decresce, simbolizando um comportamento do tipo *softening*.

**Figura 23** – Análise dos Resultados de Yoo *et al.* (2016)

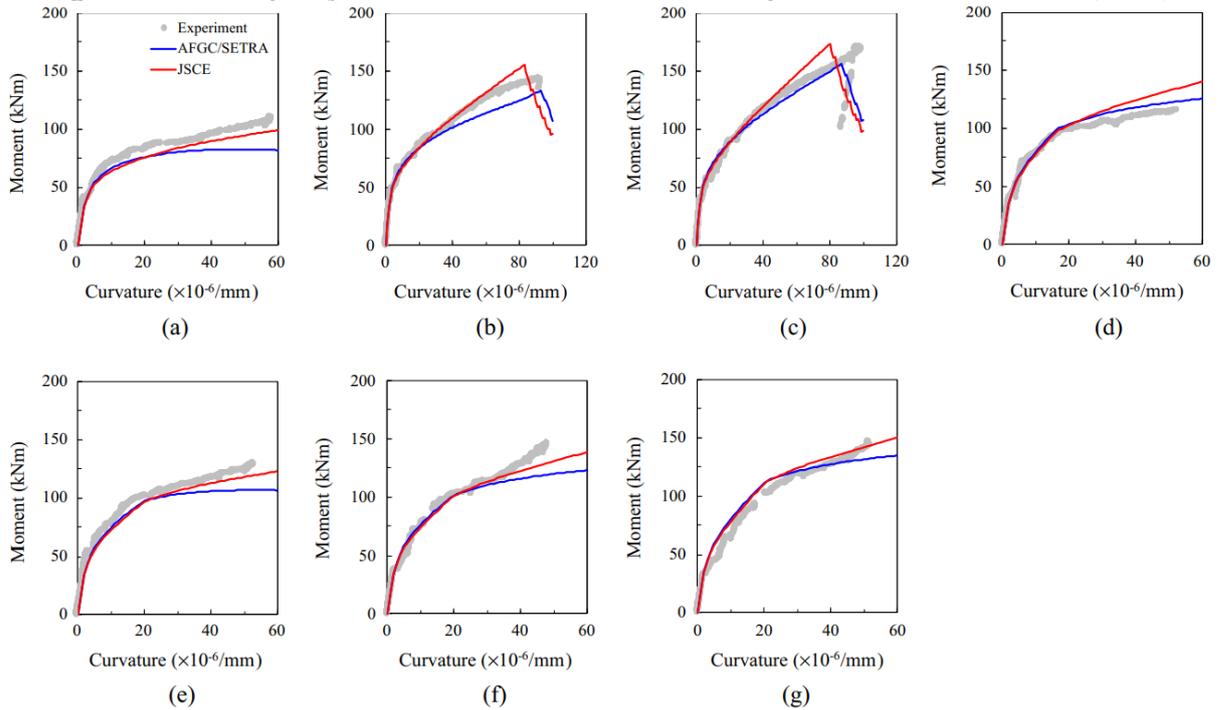


Fonte: YOO *et al.*, 2016.

No desenvolvimento do modelo analítico, segundo Yoo *et al.* (2016), foi tomado como base as recomendações da Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC), pelas Equações 2.5 – 2.9, e as diretrizes da Sociedade Japonesa de Engenharia Civil (JSCE).

Na Figura 24 é apresentado a comparação entre os modelos analítico, segundo as recomendações da AFGC/SETRA e da JSCE, com o modelo experimental. Percebe-se uma semelhança dos resultados experimentais com as recomendações da JSCE, com erros mínimos, enquanto com os modelos da AFGC/SETRA houve um erro em torno de 10%, o que é considerável e valida o modelo bem como o experimento realizado por Yoo *et al.* (2016).

**Figura 24** – Comparação entre o Modelo Analítico e Experimental de Yoo *et al.* (2016)



Fonte: YOO *et al.*, 2016.

O uso de vigas em UHPFRC com barras de fibras de vidro (GFRP) indica um aumento na rigidez da peça estrutural e redução da fissuração. Contudo, a aplicação de reforço híbrido, isto é, inserção de barras de fibras de vidro e barras de aço em vigas de UHPFRC, aumenta a corrosão interna promovendo uma concentração de tensões internas na seção. Dessa forma, recomenda-se a utilização apenas a adição de barras de fibras de vidro em vigas de UHPFRC.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado os procedimentos realizados para analisar vigas em escala reduzida reforçadas com UHPFRC submetidas ao esforço de flexão, sendo divididos em duas etapas. Na parte dos materiais são apresentados os materiais utilizados no programa experimental, bem como suas propriedades. A metodologia é apresentada em duas partes: Parte I, correspondente aos ensaios de caracterização das amostras em concreto e UHPFRC, e a Parte II correspondente a análise das vigas reforçadas com UHPFRC.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Portland do tipo CP V-ARI, de alta resistência inicial, da marca Liz Cimentos. A Tabela 4 apresenta as propriedades físicas e mecânicas deste aglomerante, conforme boletim técnico fornecido pelo fabricante.

**Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento**

Característica		Referência	Resultado
Finura	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	NBR 16372 (ABNT, 2015)	530,00
	# 325 (%)	NBR 11579 (ABNT, 2012)	0,70
Tempo de Pega	Início de Pega (min)	NBR 16607 (ABNT, 2018a)	137,00
	Fim de Pega (min)		169,00
Resistência à compressão	01 dia (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 2019)	25,90
	03 dias (MPa)		42,20
	07 dias (MPa)		49,60
	28 dias (MPa)		59,10

Fonte: LIZ CIMENTOS, 2022.

##### 3.1.2 Agregado miúdo

Na produção do concreto convencional e do concreto de alta resistência foi utilizado como agregado miúdo a areia quartzosa proveniente do Rio Paraná, denominada “Areia I”. A Tabela 5 fornece a massa específica da Areia I segundo o ensaio realizado por Santos (2021), o qual utilizou a mesma areia em questão.

**Tabela 5 – Propriedades físicas da Areia I**

<b>Característica</b>	<b>Referência</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica	SANTOS (2021)	2,649 g/cm <sup>3</sup>

**Fonte:** SANTOS, 2021.

Para a produção do UHPFRC a areia, a qual será chamada de “Areia II”, é proveniente da empresa Mineração Jundu Ltda. na unidade industrial de Analândia, estado de São Paulo. Com o nome de Areia Quartzosa Industrial AG – 50/60 SE 40, é classificada como muito fina, com dimensão média de 0,28 mm e dimensão máxima característica de 0,425 mm. É possível observar a propriedades químicas na Tabela 6, bem como a análise granulométrica fornecida pelo fabricante na Tabela 7.

**Tabela 6 – Propriedades químicas da Areia II**

<b>% SiO<sub>2</sub></b>	<b>pH</b>	<b>% Perda ao fogo</b>	<b>% Teor de umidade</b>
99,500	6,500	0,060	0,020

**Fonte:** MINERAÇÃO JUNDU, 2021b.

**Tabela 7 – Análise granulométrica da Areia II**

<b>Peneiras ASTM</b>	<b>Peneiras (mm)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida acumulada</b>
20	0,850	0,00	0,00
30	0,600	0,20	0,20
40	0,425	2,10	2,30
50	0,300	19,90	22,20
70	0,212	43,60	65,80
100	0,150	26,20	92,00
140	0,106	7,50	99,50
200	0,075	0,50	100,00
270	0,053	0,00	100,00
Fundo	Fundo	0,00	100,00

Dimensão máxima característica

Módulo de finura AFS = 57,10

Concentração = 89,70 %

Finos = 0,60 %

**Fonte:** MINERAÇÃO JUNDU, 2021b.

### 3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na fabricação do concreto convencional e de alta resistência foi a pedra britada de origem basáltica com dimensão máxima característica de 19 mm, extraída na região de Maringá, estado do Paraná, fornecida pela empresa Mineração Mandaguari Ltda. As propriedades físicas da pedra britada constam na Tabela 8 segundo o ensaio realizado por Santos (2021), o qual utilizou a mesma brita em questão.

**Tabela 8 – Propriedades físicas da Pedra Britada**

<b>Característica</b>	<b>Referência</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica	SANTOS (2021)	2,883 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: SANTOS, 2021.

### 3.1.4 Pó de Quartzo

O pó de quartzo utilizado na produção do UHPFRC foi fornecido pela Mineração Jundu Ltda. com o nome Sílica Moída # 325 – E 35, com diâmetro menor ou igual a 0,045 mm, produzida na unidade industrial de Analândia, estado de São Paulo. A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam as propriedades químicas e a análise granulométrica, respectivamente, fornecida pela empresa.

**Tabela 9 – Propriedades químicas do pó de quartzo**

<b>% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>% TiO<sub>2</sub></b>	<b>% SiO<sub>2</sub></b>	<b>% Perda ao fogo</b>	<b>% Teor de umidade</b>
0,045	0,230	0,028	99,680	0,110	0,100

Fonte: MINERAÇÃO JUNDU, 2021a.

**Tabela 10 – Análise granulométrica do pó de quartzo**

<b>Peneiras ASTM</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida acumulada</b>
325	0,045	7,60	7,60
< 325	< 0,045	92,40	100,00

Fonte: MINERAÇÃO JUNDU, 2021a.

### 3.1.5 Sílica Ativa

A sílica ativa usada na produção do UHPFRC foi da empresa Elkem Materials South America Ltda, modelo Elkem Microsílica 920U, do tipo não densificada, com produção realizada na região de Diadema, estado de São Paulo. Na Tabela 11, Tabela 12 e Figura 25 são apresentadas as propriedades físicas, químicas e curva granulométrica, respectivamente, fornecidos pelo fabricante.

**Tabela 11** – Propriedades físicas da sílica ativa

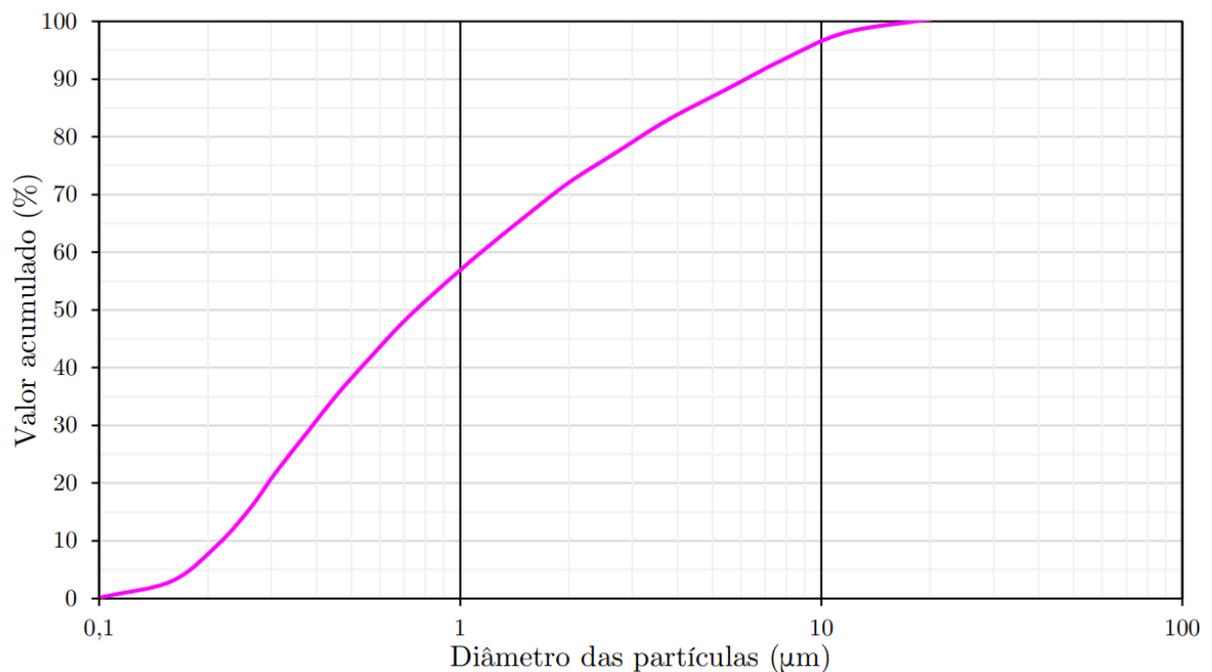
Característica	Resultado
Massa específica	2250,00 kg/m <sup>3</sup>
Superfície específica	24700,00 m <sup>2</sup> /kg
Partículas com diâmetro $\geq 450 \mu\text{m}$	< 10,00 %
Índice de atividade pozolânica	> 105,00 %

Fonte: ELKEM MATERIALS SOUTH AMERICA, 2020.

**Tabela 12** – Propriedades químicas da sílica ativa

% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% K <sub>2</sub> O	% Na <sub>2</sub> O	% SrO	% CaO	% SiO <sub>2</sub>	% Perda ao fogo	% Teor de umidade
< 0,500	< 0,200	1,660	0,610	< 0,200	< 0,200	94,100	3,600	< 3,000

Fonte: ELKEM MATERIALS SOUTH AMERICA, 2020.

**Figura 25** – Curva granulométrica da sílica ativa

Fonte: ELKEM MATERIALS SOUTH AMERICA, 2020.

### 3.1.6 Água

Na produção do concreto convencional e do UHPFRC foi utilizada água potável, originada do abastecimento da região de Maringá, estado do Paraná.

### 3.1.7 Aditivos

O aditivo químico utilizado foi o superplastificante ADVA 458 do fabricante GCP Brasil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda., produzido na região de Sorocaba, estado de São Paulo. Composto por policarboxilatos e isento de cloretos, com dosagem recomendada entre 0,40% e 1,00% sobre a massa do cimento, este aditivo foi utilizado na fabricação do concreto C85 e do UHPFRC. Suas propriedades podem ser observadas na Tabela 13.

Para o concreto C40 e C70, foi utilizado o aditivo superplastificante ADVA 548, indicados para concretos de uso geral, do fabricante GCP Brasil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda., com dosagem recomendada entre 0,40% e 1,20% sobre a massa do cimento. Suas propriedades são fornecidas na Tabela 14.

**Tabela 13** – Propriedades do aditivo superplastificante ADVA 458

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Cor	Âmbar a marrom
pH	4,00 – 6,00
Massa específica	1,075 – 1,115 g/cm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	45,13 – 49,88 %

**Fonte:** GCP APPLIED TECHNOLOGIES, 2022.

**Tabela 14** – Propriedades do aditivo superplastificante ADVA 548

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Cor	Alaranjado
pH	4,00 – 6,00
Massa específica	1,055 – 1,095 g/cm <sup>3</sup>

**Fonte:** GCP APPLIED TECHNOLOGIES, 2022.

### 3.1.8 Fibra de Aço

A fibra de aço utilizada na confecção do UHPFRC foi da fabricante Ganzhou Daye Metallic Fibers Co. Ltda, importada da China. Esta fibra possui 13 mm de comprimento, logo trata-se de uma microfibras, diâmetro de 0,2 mm e resistência à tração de 2850 MPa.

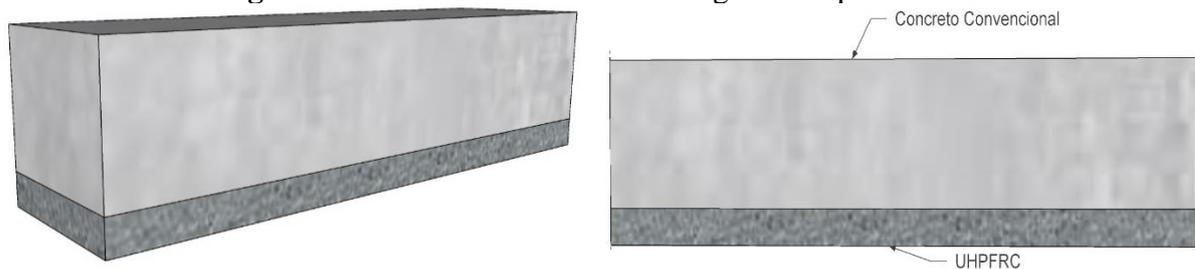
## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Programa Experimental

O modelo de estudo proposto no programa experimental é apresentado na Figura 26. Trata-se de um modelo prismático em concreto convencional, com seção de 10 x 10 cm, e 38 cm de comprimento.

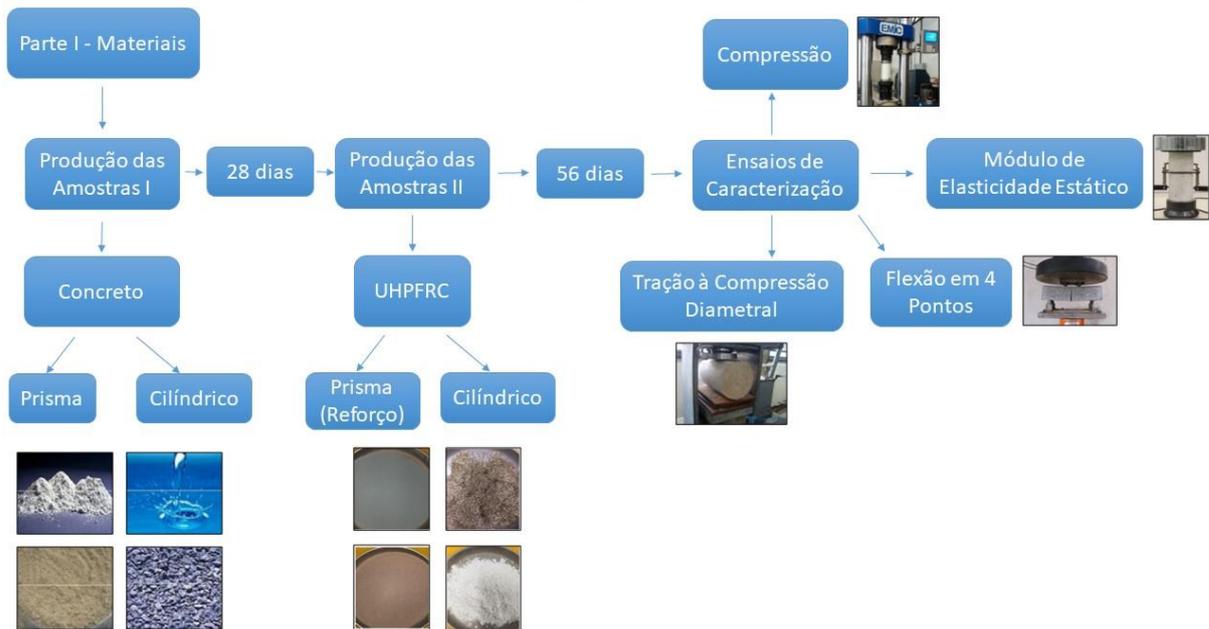
No presente estudo foi usado três tipos de substratos em concreto para avaliar a influência do reforço em UHPFRC, sendo dois substratos em concreto de alta resistência (classe C70 e C85) e um substrato em concreto convencional (classe C40), tendo em vista que o objetivo do trabalho é analisar principalmente o efeito do reforço em substratos de alta resistência, optou-se por dois substratos nesta condição. Para cada conjunto de substrato, foi analisado três grupos distintos: um grupo sem o reforço com UHPFRC, outro grupo com aplicação de uma camada de 20 mm de espessura de UHPFRC, e um último grupo com aplicação de uma camada de 30 mm de espessura de UHPFRC.

**Figura 26** – Modelo de Estudo do Programa Experimental



Fonte: O AUTOR.

Para a produção dos prismas foi necessário a divisão do estudo experimental em duas partes, onde a primeira consistiu na produção dos concretos convencional e de alta resistência, bem como do concreto de ultra alto desempenho com fibras, além da realização dos ensaios de caracterização para definir as propriedades de resistência à compressão axial, resistência à tração por meio do ensaio de compressão diametral e módulo de elasticidade longitudinal. A parte I do programa experimental é resumido no fluxograma da Figura 27.

**Figura 27** – Fluxograma Parte I: Materiais

Fonte: O AUTOR.

Os ensaios de caracterização foram realizados conforme a descrição dos mesmos no item 2.5.1 do presente trabalho. Já a produção do concreto convencional, dos concretos de alta resistência e do UHPFRC consistiu na utilização dos materiais descritos no item 3.1, onde o UHPFRC foi produzido através do misturador mecânico (Figura 28), enquanto o concreto convencional e os concretos de alta resistência foi fabricado utilizando uma betoneira (Figura 28).

**Figura 28** – Equipamentos usados para mistura do Concreto e UHPFRC

Fonte: O AUTOR.

Os traços utilizados na fabricação do concreto convencional (C40) e os concretos de alta resistência (C70 e C85) baseiam-se dos ábacos para produção de concreto com materiais da

região Noroeste do Paraná, de Assunção (2002). Os traços utilizados, em massa, constam na Tabela 15.

**Tabela 15** – Traço do Concreto Convencional e de Alta resistência (consumo em kg/m<sup>3</sup>)

Classe	Cimento	Areia	Brita 01	Água	Aditivo
C40	290,13	830,59	1076,78	185,68	0,87
	Traço em massa: 1 : 2,861 : 3,710 : 0,680 : 0,003				
C70	418,06	764,22	1135,88	179,77	2,09
	Traço em massa: 1 : 1,828 : 2,717 : 0,430 : 0,005				
C85	470,14	696,23	1076,68	164,546	2,82
	Traço em massa: 1 : 1,480 : 2,290 : 0,350 : 0,006				

Fonte: ASSUNÇÃO, 2002.

Na produção do concreto convencional e dos concretos de alta resistência a mistura na betoneira foi realizada obedecendo a seguinte ordem:

1. Adicionar o agregado graúdo;
2. Colocar parte da água de amassamento e misturar por aproximadamente 1 minuto;
3. Adicionar o cimento Portland CP-V Ari e misturar por aproximadamente 3 minutos;
4. Adicionar a areia;
5. Adicionar mais uma parte da água;
6. Diluir o aditivo no restante da água e adicionar em pequenas doses na mistura homogeneizada e misturar por aproximadamente 3 minutos.

Após a mistura, verificou-se o abatimento de cada classe de concreto produzido através do ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump test*), como é possível visualizar na Figura 29.

**Figura 29** – *Slump Test* realizado no concreto convencional



**Fonte:** O AUTOR.

Os materiais utilizados no preparo do UHPFRC também constam no item 3.1. O processo de fabricação do UHPFRC seguiu os procedimentos de Santos (2021) e Poncetti (2021), ambos adaptados de Vanderlei (2004), para obtenção de uma mistura com maior eficiência:

1. Efetuar a mistura de todo o material seco utilizando um misturador eficiente até que fique disperso e aparentando estar homogêneo. O tempo de mistura varia de acordo com a eficiência do misturador. Na falta de um misturador eficiente, utilizar um saco plástico para homogeneizar a mistura manualmente antes de adicioná-la ao misturador.
2. Diluir o superplastificante em água e adicionar em pequenas doses na mistura homogeneizada, na sequência, manter o misturador em velocidade máxima por 2 minutos. Devido à eficiência do misturador usado neste trabalho, o tempo de mistura rápida foi de 4 minutos.
3. Após 4 minutos de mistura em velocidade alta com água e superplastificante, deve-se manter o misturador em velocidade baixa até atingir a consistência esperada. Essa etapa deve durar aproximadamente 5 minutos.

Foram utilizados 4 traços diferentes de UHPC para definir o traço final, e, a partir deste inserir as fibras metálicas. Os traços utilizados foram retirados dos trabalhos de Poncetti (2021)

e Santos (2021). Na Tabela 16 é apresentado os valores da resistência à compressão correspondente a cada traço utilizado, sendo os traços 1 e 2 baseados em Santos (2021) e os traços 3 e 4 baseados em Poncetti (2021). Definiu-se pelo traço 1:1,100:0,078:0,246:0,24:0,03, ou seja o traço 4, por ter apresentado maior trabalhabilidade.

**Tabela 16 – Resistência à Compressão dos Traços de UHPC Testados**

<b>Materiais</b>	<b>Traço 1</b>	<b>Traço 2</b>	<b>Traço 3</b>	<b>Traço 4</b>
Cimento	1	1	1	1
Areia	1,100	1,100	1,100	1,100
Pó de Quartzo	0,500	0,500	0,118	0,078
Sílica Ativa	0,249	0,249	0,246	0,246
Superplastificante	0,030	0,040	0,030	0,030
Água	0,24	0,24	0,24	0,24
Resistência à Compressão (MPa)	124,86	110,61	122,18	126,17

Fonte: O AUTOR.

Partindo do traço 4 para produzir o UHPFRC, optou-se por, inicialmente, diminuir a fator água/cimento de 0,24 para 0,22 e observou-se ainda uma certa trabalhabilidade, definindo-se assim o traço definitivo do UHPFRC conforme a Tabela 17.

**Tabela 17 – Traço final usado na produção do UHPFRC**

<b>Material</b>	<b>Traço (em massa)</b>	<b>Consumo (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cimento	1	850,76
Areia	1,100	935,84
Pó de Quartzo	0,078	66,64
Sílica Ativa	0,246	209,29
Superplastificante	0,030	25,52
Fibra de Aço	0,183	156,00
Água	0,22	195,68

Fonte: O AUTOR

É válido destacar que a produção dos materiais ocorreu em períodos distintos. Inicialmente foram produzidos o concreto convencional e os concretos de alta resistência, que são os substratos onde foi aplicado o reforço. Nesta preparação foram confeccionados corpos

de prova (CP) cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para os ensaios de caracterização, realizando o adensamento das amostras com 3 camadas de 12 golpes cada, utilizando uma haste metálica, conforme exigido pela norma ABNT NBR 5738:2015. Também foi produzido os prismas para análise do reforço, realizando o adensamento das amostras com 1 camada de 75 golpes, utilizando uma haste metálica, conforme exigido pela norma ABNT NBR 5738:2015 para seções com até 100 mm de altura. As amostras cilíndricas e prismáticas nas fôrmas podem ser vistas na Figura 30. Após 24 horas, fora feito a desforma das amostras, e as mesmas passaram por cura em câmara úmida por 28 dias, como mostra a Figura 31.

Após os 28 dias de cura dos concretos, foi fabricado o concreto de ultra alto desempenho com fibras para aplicação nos prismas como reforço, onde está aplicação foi realizada na parte inferior dos prismas, em todo o seu comprimento, com o intuito de criar um “efeito de ancoragem” e, com isso, diminuir as chances de as amostras prismáticas romperem por cisalhamento durante o ensaio de flexão à 4 pontos.

Também foi extraído corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, realizando o adensamento das amostras com 3 camadas de 12 golpes cada, utilizando uma haste metálica, conforme exigido pela norma ABNT NBR 5738:2015, para realização dos mesmos ensaios de caracterização que foram realizados no concreto convencional e nos concretos de alta resistência.

As amostras de UHPFRC também foram desenformadas com 24 horas e passaram por cura em câmara úmida por 28 dias. Assim, somente para o concreto convencional e os concretos de alta resistência que algumas amostras permaneceram em câmara úmida por 56 dias, considerando mais 28 dias da cura que foi realizada do UHPFRC, para realização de um novo ensaio de compressão axial com o intuito de avaliar a evolução da resistência dos substratos.

Dessa forma, utilizando 3 amostras para cada ensaio de caracterização conforme é exigido pelas normas dos respectivos ensaios, e, considerando a realização do ensaio de compressão axial em dois períodos (28 e 56 dias), o quantitativo de amostras é exposto na Tabela 18.

**Tabela 18** – Ensaio de Caracterização do Concreto e do UHPFRC

Ensaio	Referência	Quantidade CP Cilíndrico			Idade (dias)		
		Concreto (Ø100x200mm)			UHPFRC (Ø50x100mm)	UHPFRC	Concreto
		40	70	85			
Tração à Compressão Diametral	ABNT NBR 7222:2011	3	3	3	3	28	28
Compressão Axial	ABNT NBR 5739:2019	6	6	6	3	28	28 e 56
Módulo de Elasticidade Longitudinal	ABNT NBR 8522:2017	3	3	3	3	28	28

Fonte: O AUTOR.

**Figura 30** – Amostras Cilíndricas e Prismáticas na Fôrma

Fonte: O AUTOR.

**Figura 31** – Amostras Cilíndricas e Prismáticas na Câmara Úmida

Fonte: O AUTOR.

Na segunda parte do programa experimental foram elaboradas os conjuntos de prismas de cada substrato de concreto para realização do ensaio de flexão em 4 pontos, analisando os parâmetros apresentados no fluxograma da Figura 32.

**Figura 32** – Fluxograma Parte II: Métodos

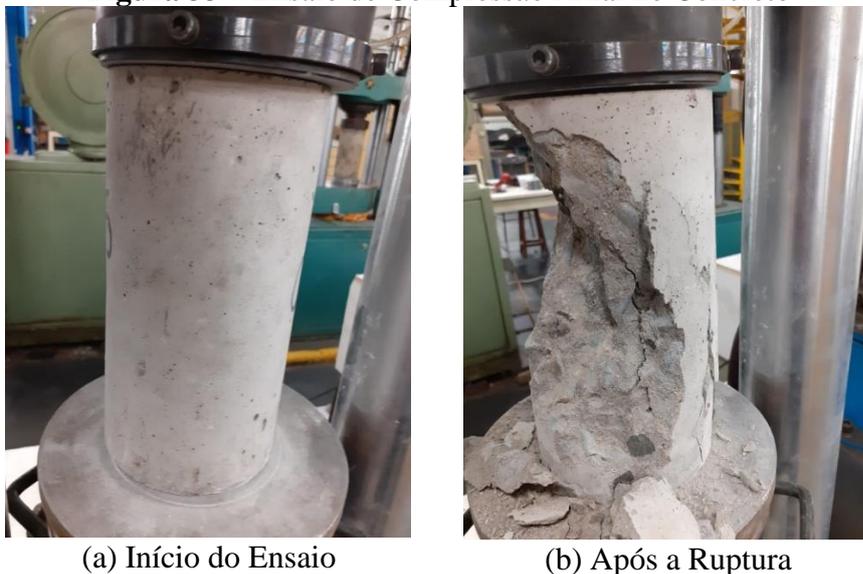


Fonte: O AUTOR.

### 3.2.2 Ensaios de caracterização do Concreto e do UHPFRC

Passado o período em câmara úmida, foram realizados os ensaios de caracterização nos concretos convencional e de alta resistência, sendo o ensaio de compressão axial (Figura 33), o ensaio de tração por de compressão diametral (Figura 34) e o ensaio do módulo de elasticidade longitudinal, como é visto na Figura 35.

**Figura 33** – Ensaio de Compressão Axial no Concreto



(a) Início do Ensaio

(b) Após a Ruptura

Fonte: O AUTOR.

**Figura 34** – Ensaio de Tração por Compressão Diametral no Concreto



Fonte: O AUTOR.

**Figura 35** – Ensaio de Módulo de Elasticidade Longitudinal no Concreto



Fonte: O AUTOR.

Após os 28 dias em câmara úmida, foi realizado os ensaios de caracterização na amostra de UHPFRC, sendo o ensaio de compressão axial (Figura 36), ensaio de tração por compressão diametral (Figura 37) e o ensaio de módulo de elasticidade longitudinal como mostra a Figura 38.

**Figura 36 – Ensaio de Compressão Axial no UHPFRC**

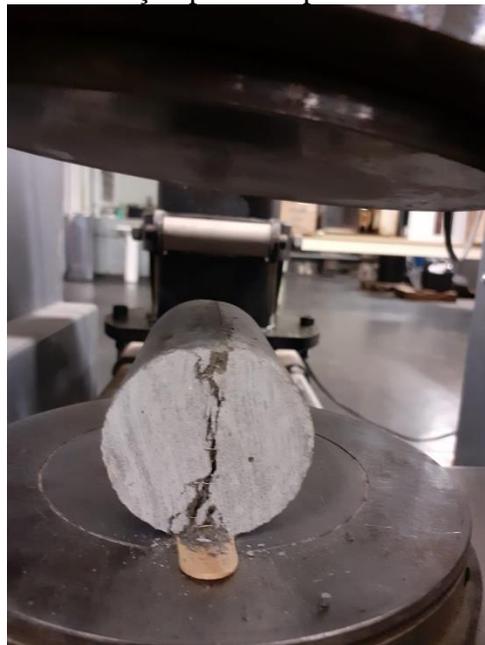


(a) Início do Ensaio

(b) Após a Ruptura

Fonte: O AUTOR

**Figura 37 – Ensaio de Tração por Compressão Diametral no UHPFRC**



Fonte: O AUTOR

**Figura 38** – Ensaio de Módulo de Elasticidade Longitudinal no UHPFRC

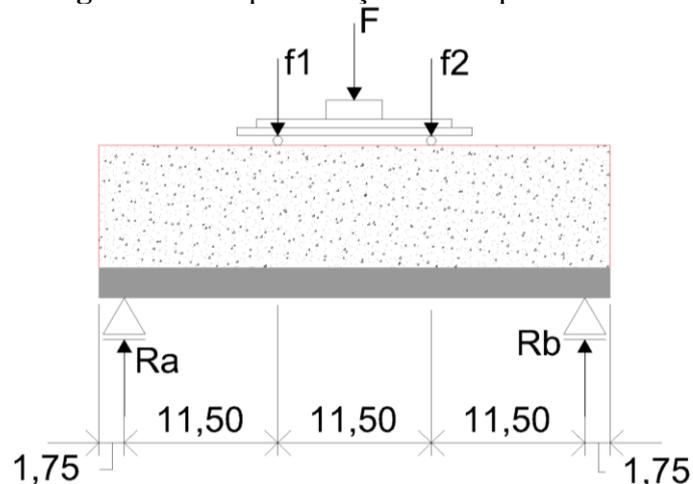


Fonte: O AUTOR

### 3.2.3 Análise dos Prismas Reforçados com UHPFRC

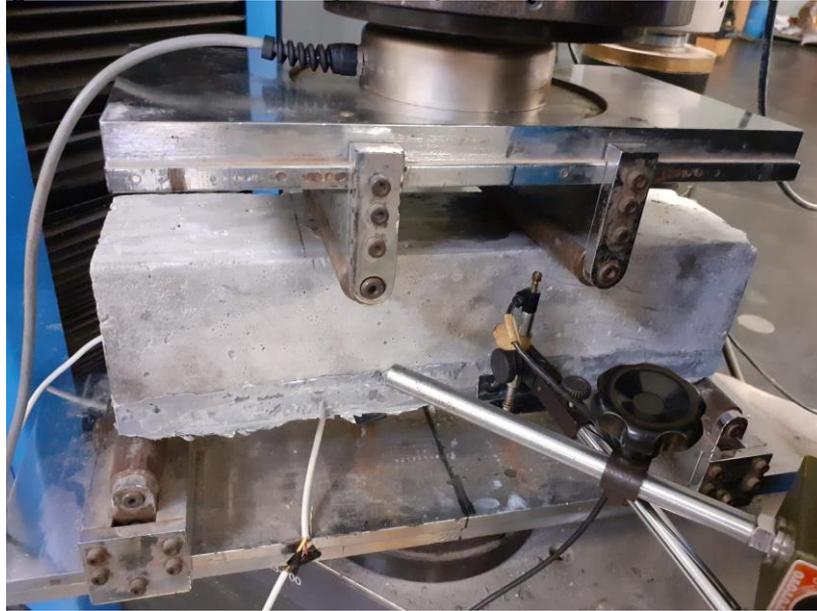
A partir dos prismas fabricados na parte I em concreto convencional e de alta resistência, tanto nos grupos sem o reforço como nos grupos reforçados com UHPFRC, estes foram ensaiados à tração por flexão em 4 pontos, atendendo a norma ABNT NBR 12142:2010 e descrito no item 2.5.1.2. Vale destacar que a força aplicada no prisma ( $F$ ) foi dividida igualmente em duas forças ( $f1$  e  $f2$ ) como mostra a o sistema de forças e reações da Figura 39, cujas medidas estão simbolizadas em centímetros, e na Figura 40 é apresentado a configuração do prisma na prensa durante a realização do ensaio de flexão à 4 pontos.

**Figura 39** – Representação do Grupo Amostral



Fonte: O AUTOR.

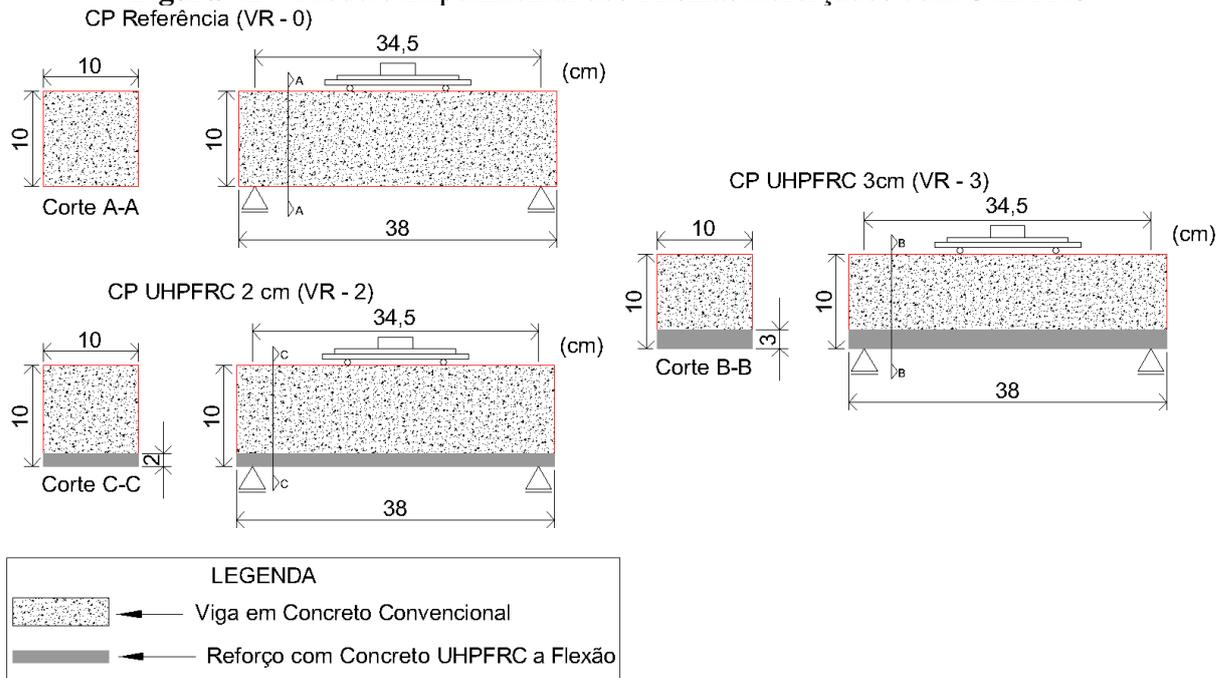
**Figura 40** – Amostra reforçada na prensa para o ensaio de 4 pontos



Fonte: O AUTOR.

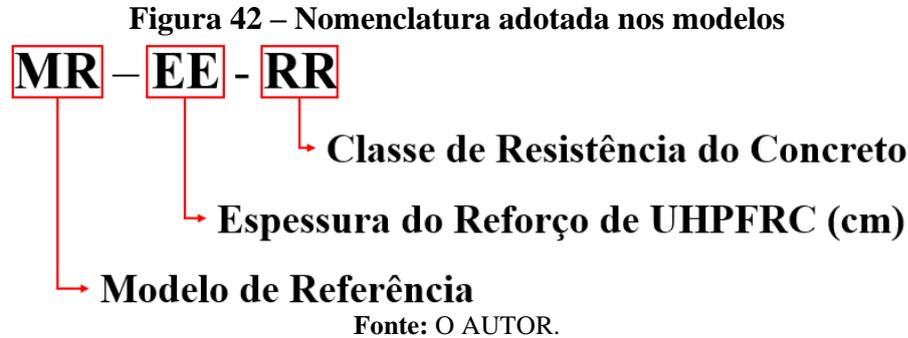
Seguindo as exigências da norma ABNT NBR 12142:2010, foram extraídos três prismas para cada conjunto de substratos em concreto convencional e concreto de alta resistência, logo, três prismas para cada grupo do conjunto (Figura 41), isto é, sem o reforço de UHPFRC, reforço com 20 mm de espessura de UHPFRC e reforço com 30 mm de espessura de UHPFRC, como mostra a Tabela 19.

**Figura 41** – Modelo Experimental dos Prismas Reforçados com UHPFRC



Fonte: O AUTOR.

Como variou o tipo do substrato em concreto, sendo convencional e de alta resistência, no programa experimental, adotou-se a nomenclatura apresentada na Figura 42.



**Tabela 19 – Amostras do Ensaio de Flexão em 4 Pontos**

Grupo	e <sub>e</sub> (cm)	Qtd CP Prismático		
		40 MPa	70 MPa	85 MPa
VR0	0	3	3	3
VR2	2	3	3	3
VR3	3	3	3	3

Fonte: O AUTOR.

A união do reforço com substrato em concreto convencional foi realizada conforme o método aplicado por Granato (2020), utilizando resina epóxi. Foi usado o mesmo material, sendo o *Compound Adesivo de Alta Fluidéz*, nome comercial alterado do período da pesquisa de Granato (2020), que citou como *Compound Adesivo Tipo Gel*. Antes da aplicação do adesivo, foi realizado um lixamento no substrato com o objetivo de eliminar a nata de concreto, bem como tornar a superfície rugosa, garantindo assim melhores condições de aderência entre os materiais. Este lixamento foi executado utilizando uma esmerilhadeira de alta rotação com disco diamantado, como mostra a Figura 43. A Figura 44 mostra o substrato em concreto após o preparo, onde é possível observar a rugosidade gerada na face, resultante do lixamento.

**Figura 43** – Ferramentas usadas para o preparo do substrato em concreto



Fonte: O AUTOR.

**Figura 44** – Superfície do substrato em concreto após o lixamento



Fonte: O AUTOR.

Após o preparo do substrato em concreto convencional, foi aplicado a resina epóxi na proporção definida pelo fabricante, como mostra na Figura 45, e na sequência a aplicação do UHPFRC como reforço em todo o comprimento do prisma com o intuito de criar um efeito de ancoragem e diminuir as chances de o prisma romper por cisalhamento durante a realização do ensaio de flexão à 4 pontos. O prisma reforçado foi retirado da forma após 24 horas e levado na câmara úmida por 28 dias.

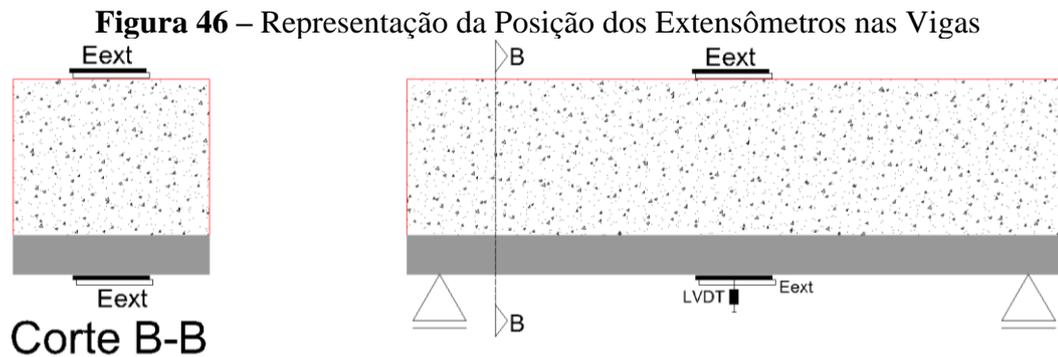
**Figura 45** – Superfície do substrato em concreto após a aplicação da resina epóxi



Fonte: O AUTOR.

Na etapa de instrumentação das amostras durante o ensaio de tração na flexão, foram utilizados extensômetros elétricos, do tipo do *strain gage*, com o intuito de determinar as deformações em pontos específicos do prisma como no concreto, no reforço em UHPFRC e na interface substrato, em concreto convencional, e reforço, em concreto de ultra alto desempenho com fibras de aço.

O extensômetro utilizado foi da marca Kyowa, modelo KC-70-120-A1-11, para uso em regiões de concreto, unidirecional, tipo fio com grade de 70 mm e resistência de 120 Ohms. Também foi utilizado um transdutor elétrico vertical do tipo LVDT, com curso de 10 mm, para obtenção das deflexões no centro do vão. O posicionamento do LVDT, bem como dos *strain gages*, é apresentado na Figura 46.



Fonte: O AUTOR

A aquisição dos dados foi feita com o sistema Spider 8 da HBM, com as unidades de calibração e amplificação SR 55 – 4,8 kHz/DC e SR 30 – 600Hz/DC. O gerenciamento do sistema foi feito com o software CatmanEasy, o qual gerava uma planilha em formato Excel com as leituras de carga, deflexão, deformação de tração no UHPFRC e deformação do concreto comprimido. O sistema de aquisição de dados utilizado é apresentado na Figura 47.

**Figura 47 – Sistema de Aquisição de Dados**



**Fonte: O AUTOR**

A célula de carga utilizada foi de compressão com capacidade de 100,0 KN, marca Geo Instrumentos, com campo de leitura de duas casas significativas. Sua visualização é possível na Figura 40.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS E UHPFRC

#### 4.1.1 Concretos

##### 4.1.1.1 Abatimento (*Slump Test*)

Após a mistura dos materiais na betoneira, durante a produção do concreto convencional e de alta resistência, foi medido o abatimento do concreto através do ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*), executando-se 3 camadas de concreto, aplicando 25 golpes em cada camada. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 20, onde percebe-se um alto abatimento resultante em virtude de ter sido utilizado aditivo superplastificante na mistura. No UHPFRC não foi realizado esta caracterização.

**Tabela 20** – Abatimentos obtidos no *Slump Test*

<b>Classe do Concreto</b>	<b>Abatimento Médio (cm)</b>
C40	$9 \pm 2$
C70	$20 \pm 2$
C85	$17 \pm 2$

Fonte: O AUTOR

##### 4.1.1.2 Resistência à Compressão Axial

Os resultados obtidos no ensaio de compressão axial, aos 28 e 56 dias, no concreto convencional e nos concretos de alta resistência são apresentados na Tabela 21. As resistências foram atingidas de acordo com o planejado para os concretos de resistência normal e alta resistência, considerando a idade aos 28 dias.

**Tabela 21** – Resultados do ensaio de compressão axial nos concretos

Classe de Resistência	Idade 28 dias		sd (MPa)	Idade 56 dias		sd (MPa)
	Amostras (MPa)	Média (MPa)		Amostras (MPa)	Média (MPa)	
C40	38,72	38,51	0,97	32,13	40,79	4,08
	39,59			40,98		
	37,23			40,60		
C70	67,85	68,14	1,02	71,12	73,18	2,42
	69,50			76,58		
	67,06			71,84		
C85	89,29	85,00	3,84	89,04	92,06	3,00
	79,97			96,16		
	85,73			90,99		

Fonte: O AUTOR

Para garantir que que não há semelhança entre as classes de resistência e que foi realizado o estudo em 3 classes distintas, realizou-se uma Análise de Variância (Teste Anova). Trata-se de um teste usado para comparar as variâncias entre as médias de grupos diferentes. O resultado do teste Anova realizado com as classes de resistência aos 28 e 56 dias é apresentado na Tabela 22.

**Tabela 22** – Teste ANOVA dos Concretos aos 28 dias e 56 dias

Idade (dias)	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
28	3322,39	2	1661,20	198,65	3,29E-06	5,14
56	4533,92	2	2266,96	143,61	8,57E-06	5,14

Fonte: O AUTOR

Segundo Oliveira (2019), uma das formas de interpretar os resultados do teste Anova é por meio da Estatística F, aonde caso o valor “F calculado” seja maior que o “F crítico”, pode-se concluir que os grupos são independentes. Logo, como mostra a tabela acima, percebe-se que as classes de resistência analisados são independentes entre si.

#### 4.1.1.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Na Tabela 23 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de tração por compressão diametral nos concretos de alta resistência e no concreto convencional, aos 28 dias.

**Tabela 23** – Resultados do ensaio de tração, por compressão diametral, nos concretos

Classe de Resistência	Idade 28 dias		sd (MPa)
	Amostras (MPa)	Média (MPa)	
C40	2,56	2,84	0,20
	3,01		
	2,95		
C70	4,27	4,53	0,61
	3,33		
	4,80		
C85	5,98	5,60	1,11
	5,22		
	3,34		

Fonte: O AUTOR

#### 4.1.1.3 Módulo de Elasticidade Longitudinal

Na Tabela 24 são apresentados os resultados médios obtidos no ensaio de módulo de elasticidade longitudinal nos concretos convencional e de alta resistência, aos 28 dias.

**Tabela 24** – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade nos concretos

Classe de Resistência	$E_{cm}$ (GPa)	sd (GPa)
C40	31,59	1,12
C70	37,21	1,28
C85	39,29	1,32

Fonte: O AUTOR

#### 4.1.2 UHPFRC

##### 4.1.2.1 Resistência à Compressão Axial

Os resultados obtidos no ensaio de compressão axial, aos 28 dias, no concreto de ultra alto desempenho com fibras são apresentados na Tabela 25.

**Tabela 25** – Resultados do ensaio de compressão axial no UHPFRC

Idade (dias)	UHPFRC		sd (MPa)
	Amostras (MPa)	Média (MPa)	
28	155,08		2,28
	153,19	154,13	
	149,58		

Fonte: O AUTOR

Nota-se que a resistência à compressão resultante no UHPFRC satisfaz a condição para ser considerado este tipo de compósito, segundo a Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC), que diz que para o material ser considerado como UHPFRC deve apresentar resistência à compressão acima de 150 MPa.

##### 4.1.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados obtidos no ensaio de tração, por compressão diametral, aos 28 dias, no UHPFRC são apresentados na Tabela 26.

**Tabela 26** – Resultados do ensaio de tração, por compressão diametral, no UHPFRC

Idade (dias)	UHPFRC		sd (MPa)
	Amostras (MPa)	Média (MPa)	
28	21,27		1,99
	20,24	19,38	
	16,64		

Fonte: O AUTOR

#### 4.1.2.3 Módulo de Elasticidade Longitudinal

Na Tabela 27 são apresentados os resultados médios obtidos no ensaio de módulo de elasticidade longitudinal no UHPFRC, aos 28 dias.

**Tabela 27** – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade no UHPFRC

<b>Idade (dias)</b>	<b><math>E_{cm}</math> (GPa)</b>	<b>sd (GPa)</b>
28	43,75	2,25

Fonte: O AUTOR

## 4.2 ENSAIO DE FLEXÃO EM 4 PONTOS

### 4.2.1 Concretos

A Figura 48 ilustra uma das amostras C40, antes da realização do ensaio e ao ter atingido a ruptura no ensaio de flexão a 4 pontos. É possível observar que a fissura gerada se encontra na região entre os pontos de aplicação da força, indicando uma ruptura por flexão pura. Percebe-se que as amostras atingiram as forças de ruptura bem semelhantes, com uma média de 9,36 kN, correspondente a uma resistência à tração na flexão de 3,23 MPa segundo a ABNT NBR 12142:2010.

**Figura 48** – Amostra Concreto C40 após o Ensaio de Flexão 4 pontos



Fonte: O AUTOR

A Figura 49 ilustra a realização do ensaio em uma das amostras C70, onde as amostras atingiram uma força de ruptura média na ordem de 13,8 kN, correspondente a uma resistência à tração na flexão de 4,76 MPa, aproximadamente 47% acima que o grupo do concreto

convencional C40. É possível observar que também neste grupo amostral, a fissura gerada se encontra aproximadamente no meio da amostra, entre os pontos de aplicação da força, indicando uma possível ruptura por flexão pura.

**Figura 49** – Amostra Concreto C70 após o Ensaio de Flexão 4 pontos



Fonte: O AUTOR

Assim como os demais grupos, o concreto C85 resultou em uma ruptura com a formação de uma fissura localizada aproximadamente no meio da amostra, entre os pontos de aplicação da força, indicando uma possível ruptura por flexão pura, como mostra a Figura 50. As amostras alcançaram uma força de ruptura média em torno de 17,42 kN, correspondente a uma resistência à tração na flexão de 6,01 MPa, 26% acima que o grupo C70 e 86% acima que o grupo C40.

**Figura 50** – Amostra Concreto C85 após o Ensaio de Flexão 4 pontos



Fonte: O AUTOR

A Tabela 28 ilustra de uma forma resumida os resultados obtidos para os grupos sem o reforço em UHPFRC, considerando a força máxima de ruptura, o deslocamento máximo alcançado e a resistência à tração na flexão de cada amostra.

**Tabela 28** – Resultados do ensaio de 4 pontos: Amostras sem o reforço

Conjunto	Grupo	Força Máxima (kN)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Deslocamento Máximo do LVDT (mm)
C40	M1-00-40	9,25	3,19	0,524
	M2-00-40	10,28	3,55	0,734
	M3-00-40	10,28	3,55	0,450
C70	M1-00-70	14,50	5,00	1,412
	M2-00-70	14,22	4,91	0,696
	M3-00-70	15,36	5,30	1,338
C85	M1-00-85	17,98	6,20	0,714
	M2-00-85	19,50	6,73	0,878
	M3-00-85	14,22	4,91	0,342

Fonte: O AUTOR

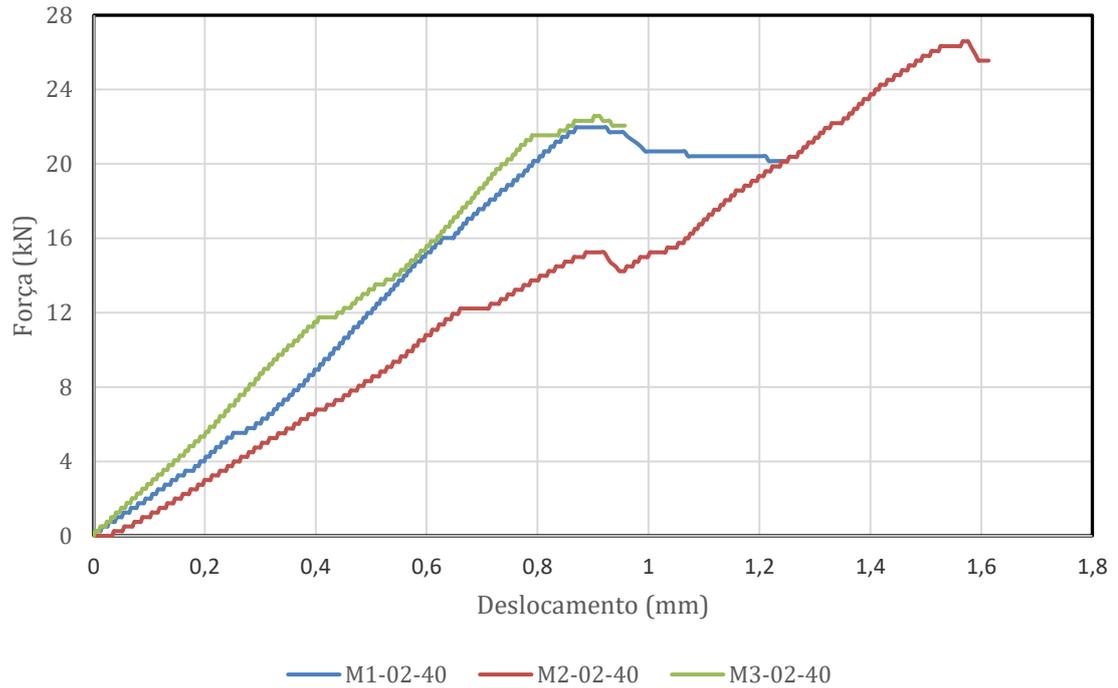
#### 4.2.2 Reforço em UHPFRC

Como já foi exposto na presente pesquisa, foi realizado reforços nos prismas com UHPFRC em duas espessuras diferentes, sendo 20 mm e 30 mm. Inicialmente pelo reforço de 20 mm de UHPFRC executado no concreto C40, obteve-se os seguintes resultados de força e deslocamento presentes no gráfico da Figura 51. Percebe-se a contribuição positiva do material como reforço pois nota-se primeiramente um aumento considerável da capacidade resistente do prisma, com uma média de força de ruptura na casa de 28 kN, correspondente a uma resistência à tração na flexão de 9,52 Mpa segundo a norma ABN NBR 12142:2010, um aumento de aproximadamente 64,5% considerando o mesmo grupo amostral sem o reforço.

Outro ponto a se mencionar é o papel das fibras no efeito pós fissuração, possibilitando que o conjunto consiga se deformar mais até o ponto de ruptura final, veja, por exemplo, a amostra “M2-02-40”, onde conseguiu atingir um deslocamento do LVDT de 1,6 mm, enquanto a mesma amostra, sem o reforço, obteve um deslocamento do LVDT de apenas 0,73 mm, 46% menor que a amostra reforçada.

É possível observar no gráfico que, também na amostra “M2-02-40”, o momento em que o prisma começa a fissurar conforme a aplicação da carga foi no acontece quando ele atinge a força de aproximadamente 12 kN, com um deslocamento correspondente de 0,70 mm. Considerando a força de ruptura na ordem de 26,6 kN, veja que a contribuição do reforço na fase de pós-fissuração do prisma 14,6 kN, 55% da força total que o prisma reforçado conseguiu suportar.

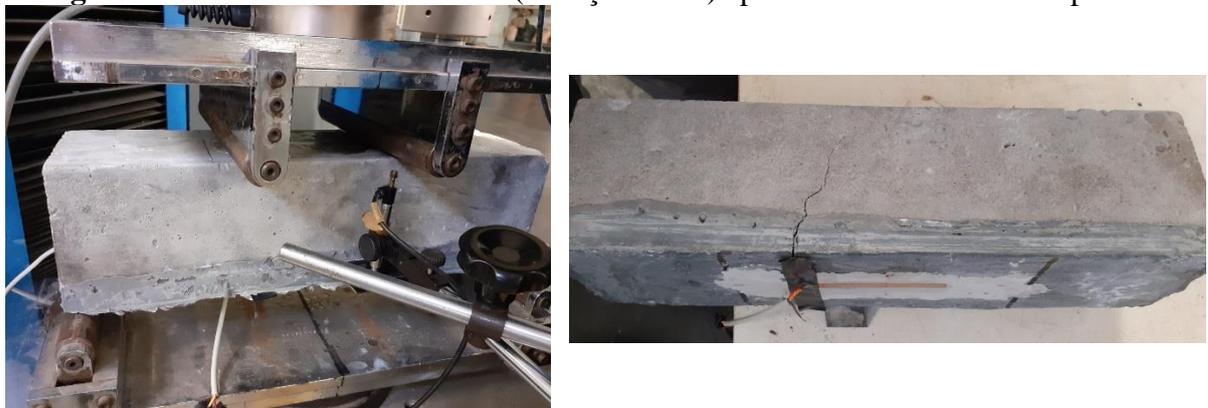
**Figura 51** – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C40 (reforço 20mm)



Fonte: O AUTOR

A amostra reforçada com 20 mm de espessura após atingir a ruptura no ensaio de flexão a 4 pontos é ilustrada na Figura 52, onde observa-se a formação de fissura mais ao centro da amostra, entre a zona de aplicação das forças, indicando uma possível ruptura por flexão pura. Outro ponto a ressaltar é a fissura passar pela transição reforço-substrato, indicando que a ruptura não ocorreu na interface e o conjunto concreto e reforço funcionou conforme o planejado.

**Figura 52** – Amostra Concreto C40 (reforço 20mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos

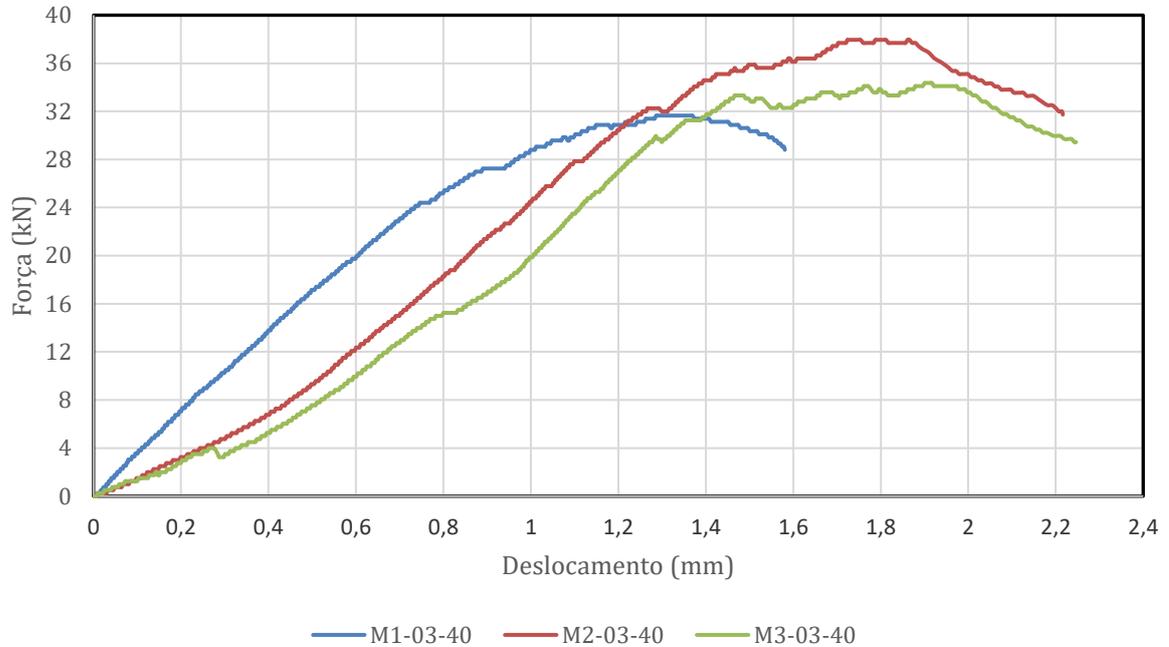


Fonte: O AUTOR

O grupo com reforço de 30 mm de espessura do conjunto do substrato C40 também apresentou um comportamento semelhante ao grupo de 20 mm de espessura, como é visto no

gráfico da Figura 53. Neste grupo obteve-se uma força média de ruptura de 34,65 kN, correspondente a uma resistência à tração na flexão de 11,78 Mpa, 71,3 % acima da amostra sem o reforço e 23,8 % acima que o grupo com reforço de 20 mm de espessura.

**Figura 53** – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C40 (reforço 30mm)



**Fonte:** O AUTOR

É possível observar no gráfico acima que, por exemplo na amostra “M2-03-40”, o momento em que o prisma começa a fissurar conforme a aplicação da carga foi no acontece quando ele atinge a força de aproximadamente 18,79 kN, com um deslocamento correspondente de 0,82 mm. Considerando a força de ruptura na ordem de 37,95 kN, veja que a contribuição do reforço na fase de pós-fissuração do prisma 19,16 kN, 50% da força total que o prisma reforçado conseguiu suportar.

A amostra reforçada com 30 mm de espessura após atingir a ruptura no ensaio de flexão a 4 pontos é ilustrada na Figura 54, onde observa-se a formação de fissura mais ao centro da amostra, entre a zona de aplicação das forças, indicando uma possível ruptura por flexão pura, assim como na espécie com 20 mm de reforço, além da indicação do conjunto concreto e reforço ter funcionado conforme o planejado em virtude da fissura ter se propagado do reforço até o substrato.

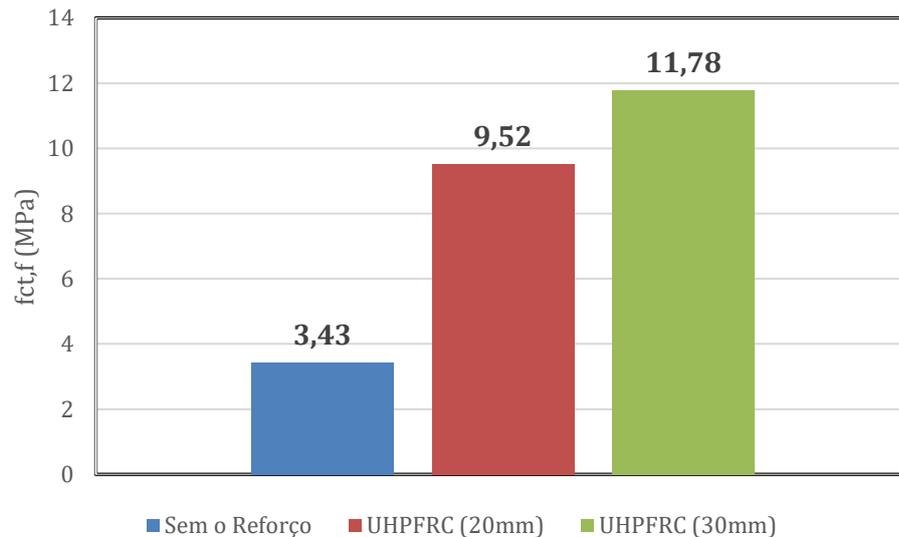
**Figura 54** – Amostra Concreto C40 (reforço 30mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos



Fonte: O AUTOR

É possível concluir pela Figura 55 que o aumento da espessura de reforço em UHPFRC provoca um ganho de força, e conseqüentemente, na capacidade resistente para o substrato em concreto C40.

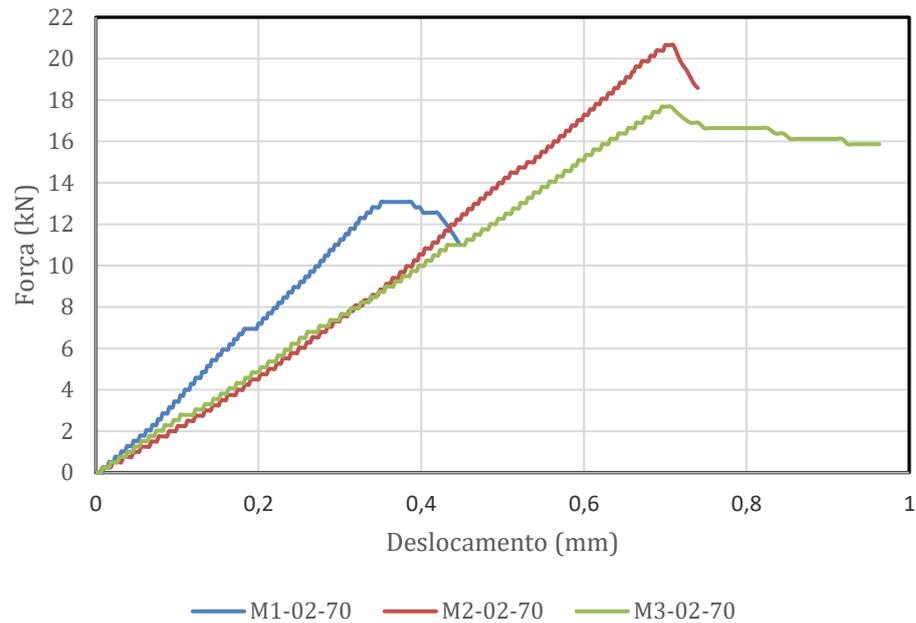
**Figura 55** – Comparativo Amostras com e sem Reforço UHPFRC: Concreto C40



Fonte: O AUTOR

Analisando a aplicação do reforço no concreto C70, considerando a execução de 20 mm de espessura de reforço em UHPFRC houve uma força de ruptura média de 17,14 kN, correspondente a uma resistência à tração na flexão de 5,83 MPa, 14,3% a mais que a mesma amostra sem o reforço, como mostra o gráfico da Figura 56. Percebe-se o efeito positivo do UHPFRC neste substrato de alta resistência, porém comparando com os resultados do concreto C40, houve uma queda de 41% na capacidade resistente, provavelmente por conta deste substrato ser de maior resistência, a contribuição do UHPFRC como reforço acaba sendo menor na sua eficiência.

**Figura 56** – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C70 (reforço 20mm)



Fonte: O AUTOR

No gráfico acima, por exemplo na amostra “M3-02-70”, o momento em que o prisma começa a fissurar conforme a aplicação da carga foi no acontece quando ele atinge a força de aproximadamente 11 kN, com um deslocamento correspondente de 0,45 mm. Considerando a força de ruptura na ordem de 17,68 kN, veja que a contribuição do reforço na fase de pós-fissuração do prisma 6,68 kN, 37,8% da força total que o prisma reforçado conseguiu suportar.

O grupo de reforço de 20 mm de espessura aplicado no concreto de classe C70, apresentou o funcionamento conforme o planejado, como mostra a Figura 57, onde é possível perceber que a fissura se propagou além da interface entre os materiais, indicando também a boa aderência que houve entre concreto de alta resistência e UHPFRC, conforme o planejado.

**Figura 57** – Amostra Concreto C70 (reforço 20mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos

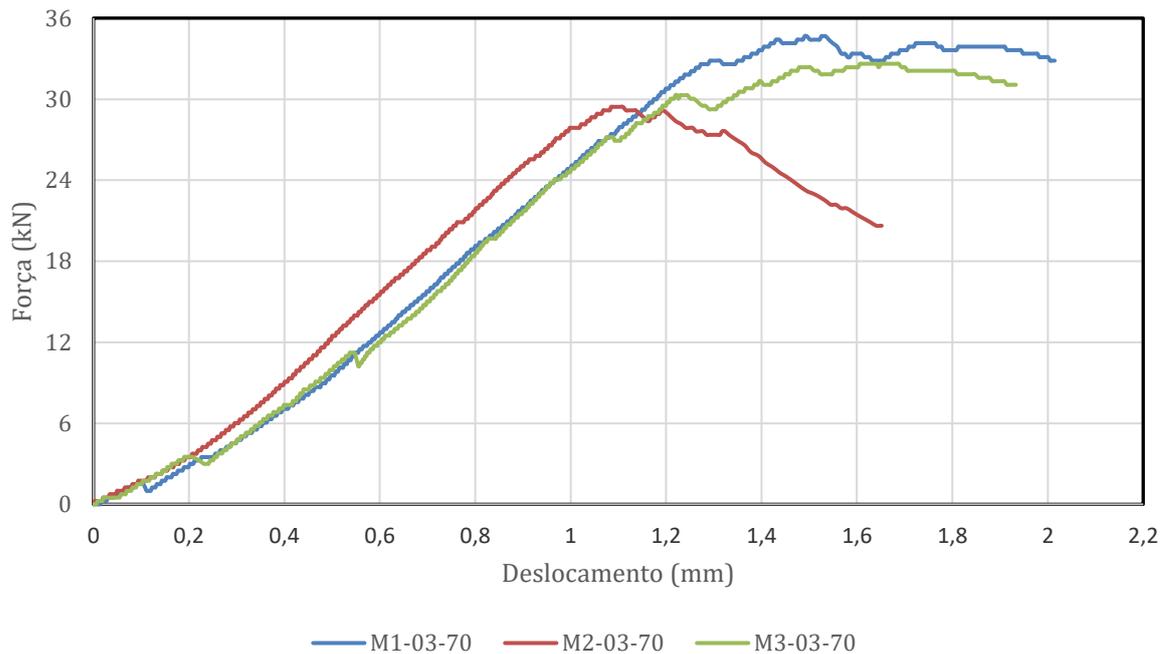


Fonte: O AUTOR

O reforço de espessura 30 mm de UHPFRC aplicado no substrato de concreto C70 obteve uma melhor eficiência quando comparado com o reforço de 20 mm de espessura, como é apresentado na Figura 58. Além de uma força de ruptura, com uma média de 32,24 kN, correspondente a uma resistência à tração na flexão de 10,96 MPa, 54% maior que amostra sem reforço e 47% maior que a camada de 20 mm de reforço de UHPFRC, como mostra a Figura 59.

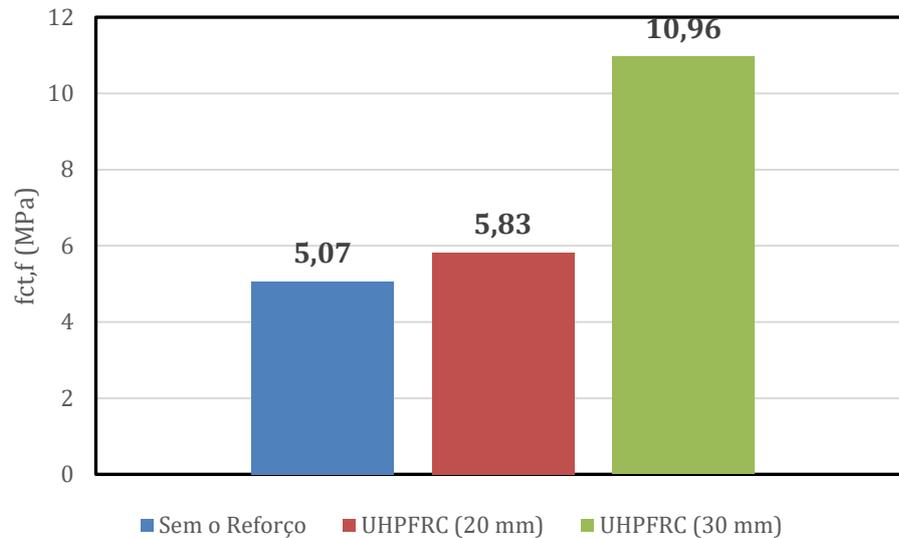
É possível observar também no gráfico da Figura 58, por exemplo na amostra “M3-03-70”, o momento em que o prisma começa a fissurar conforme a aplicação da carga foi no acontece quando ele atinge a força de aproximadamente 19,68 kN, com um deslocamento correspondente de 0,84 mm. Considerando a força de ruptura na ordem de 32,62 kN, veja que a contribuição do reforço na fase de pós-fissuração do prisma 12,94 kN, 39,7% da força total que o prisma reforçado conseguiu suportar.

**Figura 58** – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C70 (reforço 30mm)



Fonte: O AUTOR

**Figura 59** – Comparativo Amostras com e sem Reforço UHPFRC: Concreto C70



Fonte: O AUTOR

Também no grupo amostral com camada de reforço de 30 mm de UHPFRC houve um funcionamento reforço e substrato de acordo com o planejado como é visto na Figura 60.

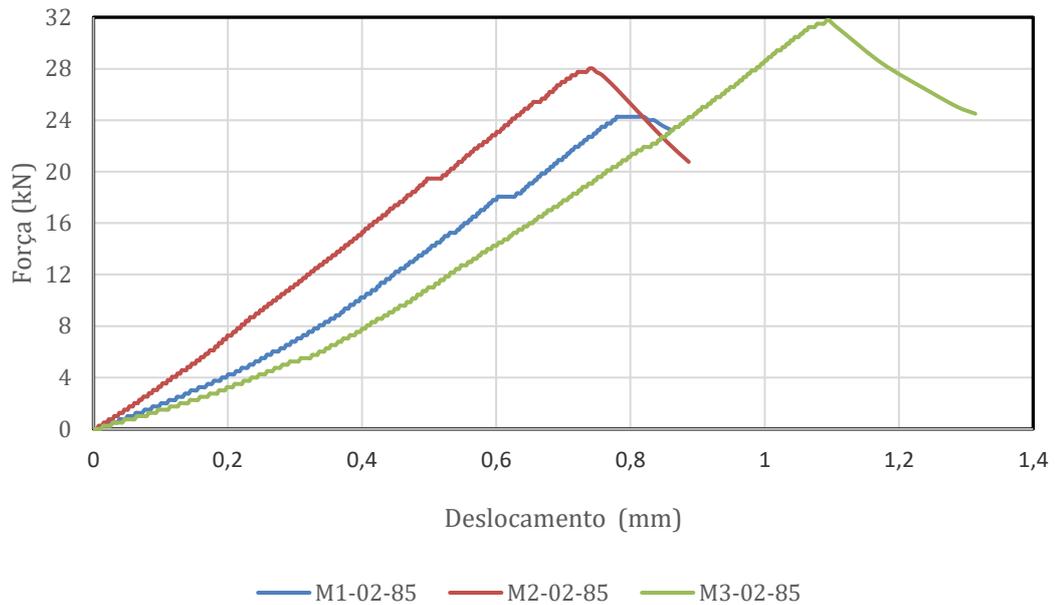
**Figura 60** – Amostra Concreto C70 (reforço 30mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos



Fonte: O AUTOR

Para o conjunto de substrato em concreto de alta resistência C85, considerando o grupo de reforço em UHPFRC com camada de 20 mm de espessura, é possível observar pelo gráfico da Figura 61 um aumento na sua capacidade resistente em comparação ao grupo sem o reforço do mesmo conjunto, com uma força média de ruptura em 27,92 kN, correspondente a uma resistência à tração na flexão de 9,49 MPa, 38,2% acima que a mesma força sem o reforço.

**Figura 61** – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C85 (reforço 20mm)



Fonte: O AUTOR

É possível observar também no gráfico da Figura 61, por exemplo na amostra “M1-02-85”, o momento em que o prisma começa a fissurar conforme a aplicação da carga foi no acontece quando ele atinge a força de aproximadamente 15,25 kN, com um deslocamento correspondente de 0,54 mm. Considerando a força de ruptura na ordem de 24 kN, veja que a contribuição do reforço na fase de pós-fissuração do prisma 8,75 kN, 36% da força total que o prisma reforçado conseguiu suportar.

Neste grupo de 20 mm de espessura de reforço em UHPFRC o arranjo reforço e substrato funcionou conforme o planejado, assim como nos demais grupos abordados, como é visto na Figura 62.

**Figura 62** – Amostra Concreto C85 (reforço 20mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos



Fonte: O AUTOR

No grupo de reforço em UHPFRC com 30 mm de espessura, considerando o conjunto do substrato em concreto de alta resistência C85, já não houve a mesma eficiência, tendo em vista que das três amostras ensaiadas, em duas amostras houve uma ruptura na interface entre o reforço e o substrato, como mostra a Figura 64, não funcionando assim a aderência entre os materiais conforme o planejado. Apenas a amostra da Figura 63 que funcionou conforme o planejado o conjunto substrato e reforço.

**Figura 63** – Amostra Concreto C85 (reforço 30mm) após o Ensaio de Flexão 4 pontos



Fonte: O AUTOR

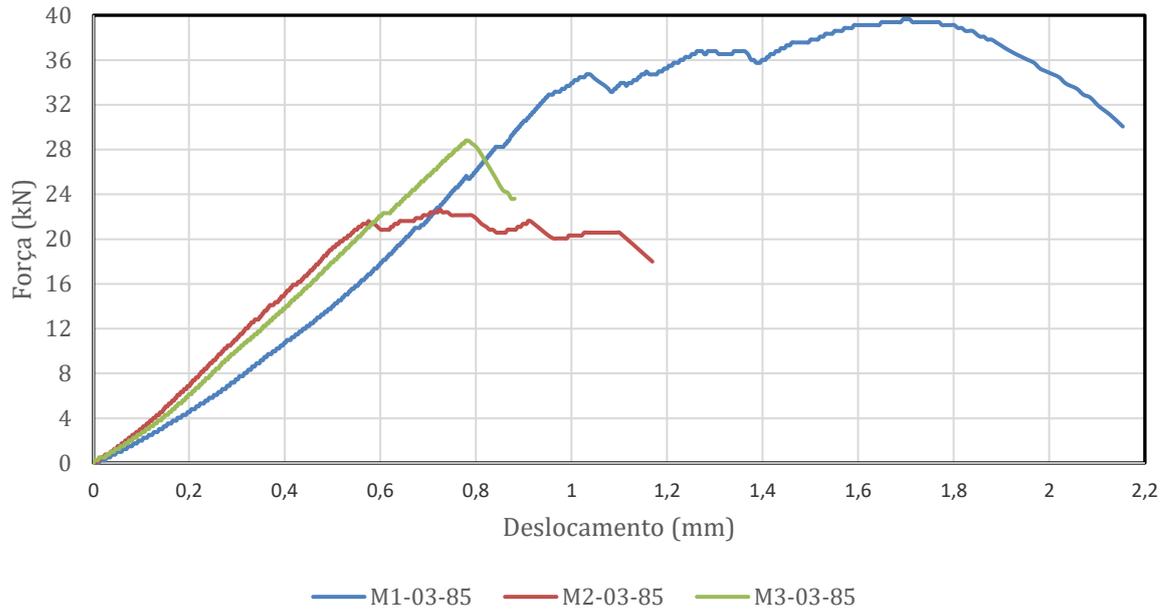
Uma provável causa da ruptura na interface entre substrato e o reforço pode ter sido o acúmulo de tensões que ocorreu no apoio do prisma gerando o desprendimento entre o substrato em concreto e o reforço em UHPFRC, como é possível observar na Figura 64.

Mesmo nesse caso ainda houve um aumento na capacidade resistente do prisma reforçado, quando comparado ao grupo sem reforço do mesmo conjunto de substrato, como é visto no gráfico na Figura 65.

**Figura 64** – Amostra Concreto C85 (ref. 30mm) rompida na Interface Reforço x Substrato



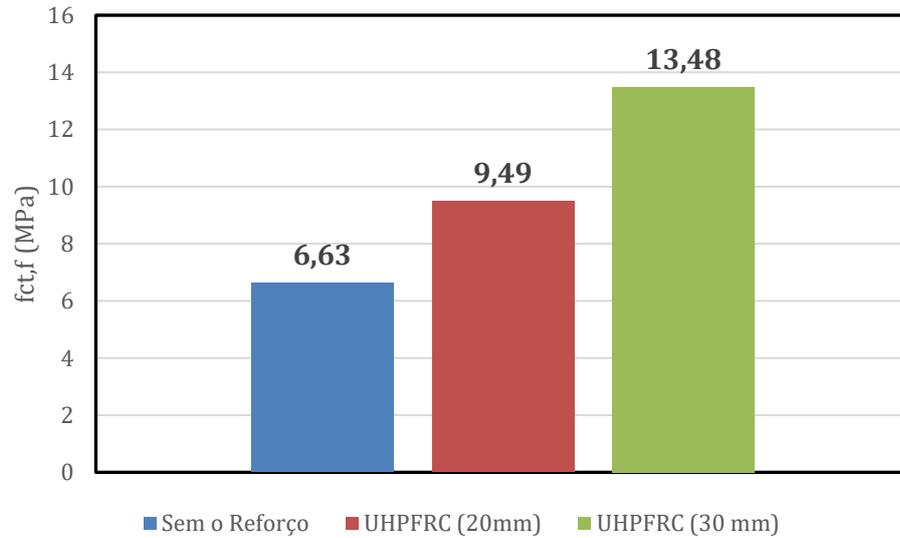
Fonte: O AUTOR

**Figura 65** – Gráfico Força x Deslocamento LVDT Concreto C85 (reforço 30mm)

**Fonte:** O AUTOR

Neste sentido que para este grupo amostral, foi levado em consideração apenas a amostra “M1-03-85”, cujo conjunto substrato e reforço funcionaram corretamente e conforme o planejado, obtendo uma eficiência satisfatória com uma força de ruptura de 39,64 kN, correspondente a uma resistência à tração na flexão de 13,48 MPa, 50,8% acima que a amostra sem o reforço, do mesmo substrato em concreto C85, e 29,6% acima que o reforço realizado com camada de 20 mm, onde é apresentado na Figura 66.

É possível observar também no gráfico da Figura 65, por exemplo na amostra “M1-03-85”, o momento em que o prisma começa a fissurar conforme a aplicação da carga foi no acontece quando ele atinge a força de aproximadamente 21,62 kN, com um deslocamento correspondente de 0,67 mm. Considerando a força de ruptura na ordem de 39,64 kN, veja que a contribuição do reforço na fase de pós-fissuração do prisma 18,02 kN, 45% da força total que o prisma reforçado conseguiu suportar.

**Figura 66** – Comparativo Amostras com e sem Reforço UHPFRC: Concreto C85

Fonte: O AUTOR

Percebe-se que para substratos em concreto de alta resistência, o reforço apresenta uma eficiência por promover um aumento na capacidade resistente à tração na flexão, porém este rendimento é menor quando comparado com o substrato em concreto convencional.

De forma resumida, a Tabela 29 destaca os resultados obtidos nas amostra reforçadas em UHPFRC considerando a força máxima de ruptura, o deslocamento máximo alcançado e a resistência à tração na flexão de cada amostra.

**Tabela 29** – Resultados do ensaio de 4 pontos: Amostras com o reforço em UHPFRC

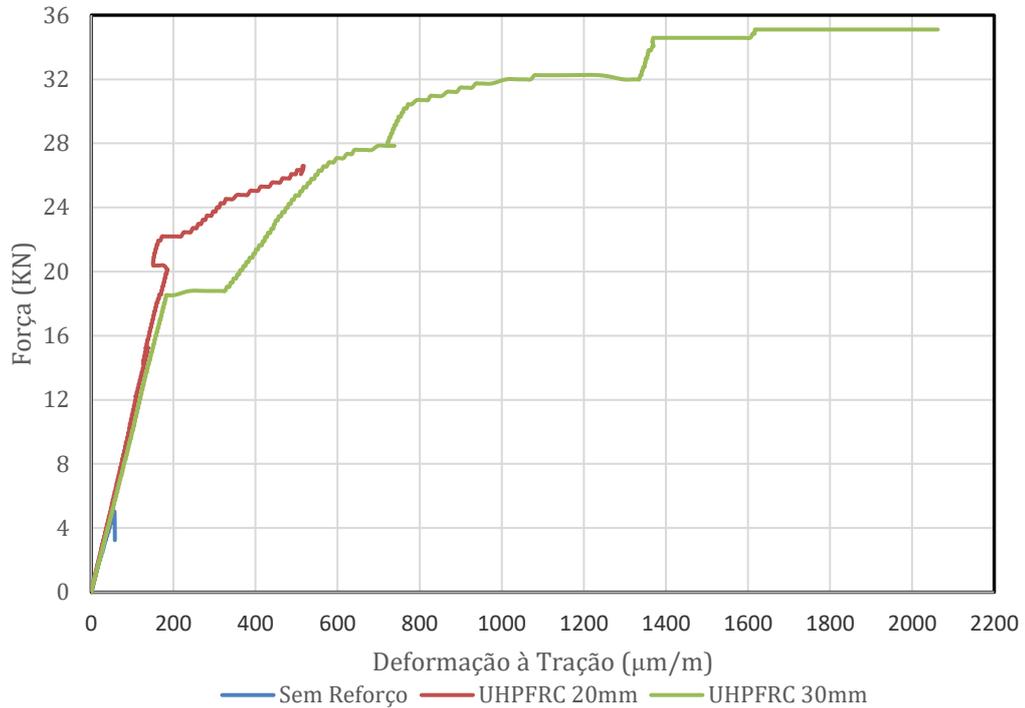
Conjunto	Grupo	Força Máxima (kN)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Deslocamento Máximo do LVDT (mm)
C40	M1-02-40	22,06	7,50	0,935
	M2-02-40	26,59	9,04	1,581
	M3-02-40	22,32	7,59	0,918
	M1-03-40	31,99	10,88	1,300
	M2-03-40	37,69	12,81	1,800
	M3-03-40	34,21	11,63	1,921
C70	M1-02-70	13,07	4,44	0,383
	M2-02-70	20,65	7,02	0,706
	M3-02-70	17,68	6,01	0,707
	M1-03-70	34,41	11,70	1,541
	M2-03-70	29,43	10,00	1,103
	M3-03-70	32,62	11,09	1,659
C85	M1-02-85	24,38	8,29	0,800
	M2-02-85	27,75	9,44	0,749
	M3-02-85	31,95	10,86	1,101
	M1-03-85	39,63	13,47	1,703
	M2-03-85	22,40	7,62	0,730
	M3-03-85	28,53	9,70	0,792

Fonte: O AUTOR

#### 4.2.3 Deformação Específica à Tração

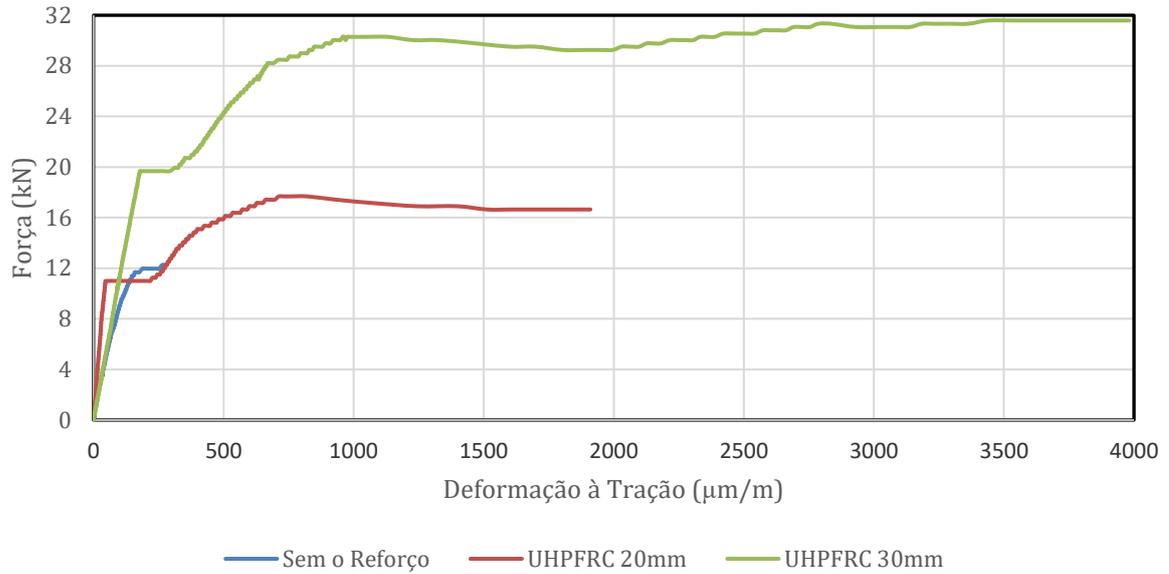
É possível visualizar nos gráficos abaixo a influência que o reforço em UHPFRC promove em gerar uma maior deformação específica à tração nos prismas reforçados, em virtude de ser um material mais ductil que o concreto por conta das fibras de aço presentes na sua composição. Observa-se inicialmente pelo conjunto do substrato em concreto convencional C40 apresentado no gráfico da Figura 67, que ilustra o comportamento médio das amostras conforme a variação da força e a deformação específica à tração, fornecida pelo *strain gage*.

**Figura 67** – Gráfico Força x Deformação Específica à Tração Concreto C40



**Fonte:** O AUTOR

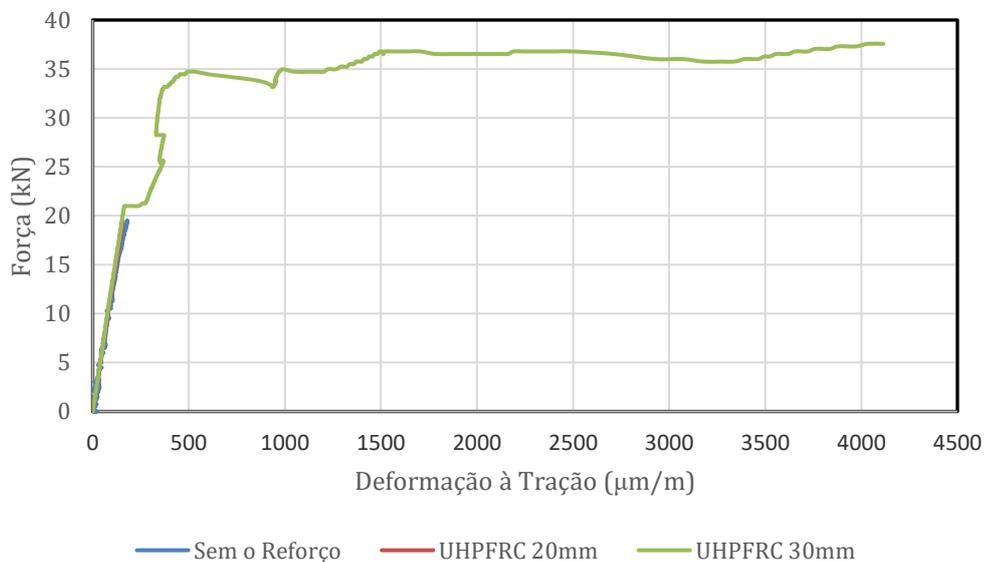
Analisando o gráfico acima consegue-se identificar que as amostras reforçadas conseguiram atingir uma deformação média de 97% acima que a amostra sem o reforço, considerando uma média das deformações à tração das camadas de 20 mm e 30 mm. Já considerando a influência de aumento de espessura do reforço em UHPFRC, o reforço com camada de 30 mm obteve uma deformação à tração de 2062,56 µm/m, 75% mais que a deformação obtida pela amostra reforçada com camada de 20 mm de reforço de UHPFRC. Aumento este provocado por conta das fibras de aço presentes no UHPFRC. O mesmo efeito é observado no conjunto do substrato em concreto de alta resistência C70, como mostra o gráfico da Figura 68.

**Figura 68** – Gráfico Força x Deformação Específica à Tração Concreto C70

Fonte: O AUTOR

Analisando o gráfico acima consegue-se identificar que as amostras reforçadas conseguiram atingir uma deformação média de 85% acima que a amostra sem o reforço, considerando uma média das deformações à tração das camadas de 20 mm e 30 mm. Já considerando a influência de aumento de espessura do reforço em UHPFRC, o reforço com camada de 30 mm obteve uma deformação à tração de 3981,84 µm/m, 55% mais que a deformação obtida pela amostra reforçada com camada de 20 mm de reforço de UHPFRC.

Por fim, no conjunto do substrato em concreto de alta resistência C85, o comportamento médio das amostras na deformação específica à tração é apresentada no gráfico da Figura 69.

**Figura 69** – Gráfico Força x Deformação Específica à Tração Concreto C85

Fonte: O AUTOR

Observando o gráfico acima consegue-se identificar que as amostras reforçadas conseguiram atingir uma deformação média de 93% acima que a amostra sem o reforço, considerando uma média das deformações à tração das camadas de 20 mm e 30 mm. Já considerando a influência de aumento de espessura do reforço em UHPFRC, o reforço com camada de 30 mm obteve uma deformação à tração de 4114,81  $\mu\text{m/m}$ , 96% mais que a deformação obtida pela amostra reforçada com camada de 20 mm de reforço de UHPFRC.

#### 4.2.4 Análise da tenacidade nos prismas reforçados

Segundo a Japanese Society of Civil Engineers – Steel Fiber 4 (JSCE-SF4), a tenacidade pode ser medida como sendo a área abaixo da curva força x deslocamento do ensaio de tração na flexão em amostras prismáticas com limite de deflexão de vão/150. A partir dessa curva podem ser calculados o fator tenacidade (FT) e a resistência à tração na flexão, já apresentado na Tabela 29. O FT pode ser expresso a partir da Equação 4.1.

$$FT = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad (4.1)$$

Onde:

FT: Fator de tenacidade à flexão quando o deslocamento do corpo de prova for  $\delta_{tb}$  (equivalente a L/150mm) (MPa).

$T_b$ : Tenacidade à flexão (área abaixo da curva força x deslocamento), até o limite de deslocamento  $\delta_{tb}$  (kN.mm).

$\delta_{tb}$ : Deslocamento equivalente a L/150 (mm)

L: Vão de ensaio (mm).

h: Altura do corpo de prova (mm).

b: Largura do corpo de prova (mm).

Ainda segundo a norma japonesa, quando a amostra romper antes de atingir a deflexão especificada em vão/150, deverá obter a área imediatamente antes da ruptura. Como o vão utilizado no ensaio de flexão foi de 340 mm, a deflexão especificada seria em 2,27 mm, valor não alcançado em nenhuma das amostras. Sendo assim, foi calculado a área abaixo da curva força x deslocamento até a força máxima de ruptura e seu respectivo deslocamento.

O cálculo da área foi realizado a partir do desenvolvimento da curva de tendência até o

polinômio de grau 6. Na sequência, obtida a equação da curva, integrou-se a mesma e cálculo o valor da integral no ponto do descolamento correspondente a força de ruptura da respectiva amostra.

A Tabela 30 apresenta os valores correspondentes a tenacidade à flexão e fator de tenacidade à flexão dos corpos de prova prismáticos reforçados com UHPFRC. Percebe-se uma maior tenacidade no grupo de reforço com espessura de 30 mm nos substratos em concreto de alta resistência. Já no substrato em concreto convencional, a tenacidade apresentou valores altos em ambos os grupos de espessura de reforços, mostrando a influência maior que o UHPFRC teve no aumento de capacidade resistente.

**Tabela 30** – Análise da Tenacidade com as amostras com o reforço em UHPFRC

Conjunto	Grupo	Força de Ruptura (kN)	$\delta_{tb}$ (mm)	$T_b$ (kN.mm)	FT (MPa)
C40	M1-02-40	22,06	0,935	70,60	25,70
	M2-02-40	26,59	1,581	20,57	4,42
	M3-02-40	22,32	0,918	11,25	4,17
	M1-03-40	31,99	1,300	25,29	6,61
	M2-03-40	37,69	1,800	37,04	7,00
	M3-03-40	34,21	1,921	36,55	6,50
C70	M1-02-70	13,07	0,383	2,66	2,36
	M2-02-70	20,65	0,706	6,73	3,24
	M3-02-70	17,68	0,707	6,23	3,00
	M1-03-70	34,41	1,541	27,50	6,07
	M2-03-70	29,43	1,103	15,67	4,83
	M3-03-70	32,62	1,659	30,44	6,24
C85	M1-02-85	24,38	0,800	8,79	3,74
	M2-02-85	27,75	0,749	10,58	4,80
	M3-02-85	31,95	1,101	15,08	4,66
	M1-03-85	39,63	1,703	40,95	8,18
	M2-03-85	22,40	0,730	9,46	4,41
	M3-03-85	28,53	0,792	11,02	4,73

Fonte: O AUTOR

## 5 CONCLUSÃO

As estruturas em concreto armado necessitam, com o passar da sua idade, de manutenções preventivas. Como essas revisões não acontecem na maioria das construções existentes no Brasil, isto faz com que ocorra uma deterioração na estrutura, provocando uma série de danos como perda na sua capacidade de resistência, ou ainda pode ocorrer a formação de novas cargas de solicitações na estrutura, que não foram previstas em projeto, o que também pode vir a gerar um dano no elemento estrutural.

Neste sentido que se utilizam de reforços estruturais, com o objetivo de promover uma maior capacidade de carga ao elemento estrutural original. Pode-se perceber que o UHPFRC pode ser uma alternativa eficiente para utilização como reforço em estruturas de concreto, desde que realizado adequadamente o preparo do substrato original, para, na sequência, realizar a sua aplicação.

No conjunto do substrato em concreto C40 o reforço promoveu um aumento de 55% na capacidade de carga do prisma em relação a mesma amostra não reforçada. Já nos concretos de alta resistência C70 e C85, houve um aumento de 45% e 42% na força de ruptura, respectivamente. Logo, percebeu-se uma maior contribuição do reforço quanto menor for a resistência do substrato original, no caso, o reforço apresenta uma eficiência melhor em substratos de concreto convencional.

Analisando sob a perspectiva da influência da espessura de reforço em UHPFRC, a camada de 30 mm obteve um aumento de resistência médio na ordem de 25% maior que a camada de 20 mm, o que mostra uma vantagem a utilização de camadas maiores de reforço em UHPFRC. Porém, deve-se estudar cada caso especificamente já que como a variação não é considerável, comparando com uma amostra não reforçada, uma espessura menor de reforço pode ser suficiente, dependendo da situação, gerando assim uma economia no reforço estrutural.

Outro destaque importante que pode ser observado foi a influência do reforço de UHPFRC em resultar uma maior deformação específica à tração nos prismas reforçados, em virtude dele ser um material mais dúctil que o concreto, tanto convencional como de alta resistência, por conta das fibras de aço presentes na sua composição. Além do aumento de resistência à força de flexão estar diretamente ligado ao aumento da camada de reforço, este também provoca uma maior capacidade da estrutura se deformar, após a fissuração, devido ao efeito ponte que ela proporciona no compósito, garantindo com que haja uma transferência de tensões na fase pós-fissuração. Este efeito pode ser visto tanto pelos deslocamentos gerados

pelo transdutor LVDT, bem como as deformações específicas à tração provindas dos *strain gages*.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como proposta de sequência desta pesquisa os seguintes temas:

1. Realização de análise numérica e comparação com os dados obtidos nesta pesquisa experimental;
2. Aprimorar esta pesquisa experimental, complementando com mais ensaios de caracterização dos materiais, como o ensaio de tração à flexão apenas do UHPFRC.
3. Modificar os locais de aplicação do reforço em UHPFRC, aplicando o reforço nas faces laterais, nas três faces da viga, e analisar experimentalmente os efeitos provocados pelo reforço.

## REFERÊNCIAS

- AFGC, SETRA. **Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Interim Recommendations**. Afgc Publications, Bagnex, France, 2002.
- AL-OSTA, M. A.; ISA, M. N.; BALUCH, M. H.; RAHMAN, M. K. **Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 134, p. 279–296, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094>>.
- ANDREASEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. **Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)**. *Kolloid-Zeitschrift*, v. 50, n. 3, p. 217–228, 1930.
- ASHOUR S. A.; WAFI F. F.; KAMAL M. I. **Effect of the concrete compressive strength and tensile reinforcement ratio on the flexural behavior of fibrous concrete**. *Eng Struct* 2000;22(9):1145–58.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Dimensionamento de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142: Concreto: Determinação de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889: Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522: Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de Dosagem para Concretos Convencionais e Aditivados Confeccionados com Materiais da Região Noroeste do Paraná**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil.
- BRÜHWILER, Eugen; DENARIÉ, Emmanuel. **Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete**. *Structural Engineering Internacional*, S. L., v. 23, n. 4, p. 450-457, nov. 2013.
- BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A.; BITTENCOURT, T. N. **Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPRC): a review of material properties and design procedures**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 4, p. 957-971, aug. 2017. Disponível em: <<https://buttignol.files.wordpress.com/2017/11/riem-uhprc.pdf>>.

CORVEZ, D.; BERNARDI, S. **Ductal ® Ultra High Performance Concrete ABCIC networking II**. São Paulo, 2018.

DINIZ, J. Z. F.; FERNANDES, J. F.; KUPERMAN, S. C. **Retração e Fluência**. In: ISAÍÁ, G. (org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2011. P. 672-703.

EIDE, M. B.; HISDAL, J.-M. **Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) - State of the art**. 2012.

ELKEM MATERIALS SOUTH AMERICA. **Boletim Técnico: Elkem Microsílica 920U**. Diadema: [s.n.], 2020.

ENAMI, Mazia Rodrigo. **Reforço de pilares curtos de concreto armado por encamisamento com concreto de ultra-alto desempenho**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. Boletim Técnico.

FRENCH STANDARD. **NF P 18-710: Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete – Specifications, Performance, Production and Conformity**. AFNOR, v. 33, n. April, 2016.

FUNK, James E.; DINGER, Dennis R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing**. Springer Science & Business Media, 1994.

GCP APPLIED TECHNOLOGIES. **Especificação Técnica: ADVA 458**. Sorocaba: [s.n.], 2020.

GRANATO, Eduardo Costa. **Reforço de vigas de concreto armado utilizando concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

GRAYBEAL, Benjamin A. **Compressive Behaviour of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete**. ACI Materials Journal, v. 104, n. 2, p. 146-152, mar. 2007.

HABEL, Katrin. **Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete**. 2004. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.

HABEL, Katrin; DENARIÉ, Emmanuel; BRÜHWILER, Eugen. **Experimental Investigation of Composite Concrete and Conventional Concrete Members**. ACI Structural Journal, n. 104, p. 93–101, 2007.

HASSAN, A. M. T.; JONES, S. W.; MAHMUD, G. H. **Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)**. Construction and Building Materials, v. 37, p. 874-882, dez. 2012.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. IBRACON - Concreto: Ciência e Tecnologia. 2011.

HUA, C. *et al.* **Analyses and models of the autogenous shrinkage os hardening cement paste.** *Cemente and Concrete Research*, [s. l.], v. 25, n. 7, p. 1457-1468, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00140-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00140-8). Acesso em 22 mar. 2023.

INTERCEMENT BRASIL. **Boletim Técnico Apiaí: Cimento Cauê Estrutura CPV ARI 40 Kg.** São Paulo [s.n.], 2020.

JÚLIO, E. S.; BRANCO, F.; SILVA, V. D. **Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing.** *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 5, n. 1, p. 29–37, 2003. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/pse.140>>.

LIZ CIMENTOS. **Características Cimento V-ARI Premium.** Disponível em: <<https://www.cimentosliz.com.br/cimento/ensaioCimento>>. Acesso em 10 nov. 2022.

MARTINOLA, Giovanni *et al.* **Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 9, p. 731–739, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.001>>.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2ª Edição. 2008.

MINERAÇÃO JUNDU. **Boletim Técnico: Areia Quartzosa – Sílica Moída #325 – E.** Analândia: [s.n.], 2021a.

MINERAÇÃO JUNDU. **Boletim Técnico: Areia Quartzosa Industrial AG – 50/60 SE.** Analândia: [s.n.], 2021b.

NAAMAN, A.; WILLE, K. **The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five Decades of Progress, in Proceedings of Hipermat.** 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials. Kassel University Press: Kassel, Germany, 2012.

OH, B. H. **Flexural analysis of reinforced concrete beams containing steel fibers.** *Journal Structural Engineering*, 1994.

OLIVEIRA, Bruno. **Como interpretar uma Análise de Variância (ANOVA).** Disponível em: <https://statplace.com.br/blog/como-interpretar-analise-de-variancia-anova/>. Acesso em junho de 2023.

ONGHERO, L. **Modelo para Previsão da Retração Autógena em Concretos de Ultra Alto Desempenho Reforçados com Fibra.** Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2022.

PONCETTI, Bernardo Lopes. **Confinamento de pilares por encamisamento com concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras de aço.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes.** *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.

SANT, G.; LURA, P.; WEISS, J. **Measurement of Volume Change in Cementitious Materials at Early Ages: Review of Testing Protocols and Interpretation of Results.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, [s.l.], v. 1979, p. 21-29, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1979-05>. Acesso em 19 mar. 2023.

SANTOS, Vinicius Brother dos. **Análise experimental da ligação entre o concreto de ultra alto desempenho e concretos de resistência normal e de alta resistência.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

TAYEH, B. A. *et al.* **Utilizations of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation a review.** Procedia Engineering, v. 54, p. 525-538, jan. 2013.

TAYEH, B. A.; ABU BAKAR, B. H.; MEGAT JOHARI, M. A. **Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra high performance fiber concrete repair composite.** Materials and Structures, v. 46, n. 5, p. 743-753, 5 out. 2012.

TENG, J. G. *et al.* **Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs.** v. 17, n. 03, p. 447-462, 2003.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete.** Concrete library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. 1984. n. 3, p. 58-61.

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

VEDACIT. **Compound Adesivo Epóxi AF: Descrição do produto.** Disponível em: <[https://vedacit.my.salesforce.com/sfc/p/#1U000000rUS7/a/4Q000000pcCn/QbGVpOW2Fh4UYIf9XMTiVzq3m\\_ubsBN8Ky1HVTdPUwo](https://vedacit.my.salesforce.com/sfc/p/#1U000000rUS7/a/4Q000000pcCn/QbGVpOW2Fh4UYIf9XMTiVzq3m_ubsBN8Ky1HVTdPUwo)>. Acesso em 15 abr. 2023.

VOORT, T. L. V. **Design and field testing of tapered H-shaped Ultra High Performance Concrete piles.** Iowa State University, 2008.

YOO, D. Y.; BANTHIA, N.; YOON, Y. S. **Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars.** Engineering Structures, v. 111, p. 246–262, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.003>>.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. **Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC).** Cement and Concrete Research, v. 56, p. 29–39, 2014.

## **APÊNDICE A – Procedimentos Envolvidos na Instrumentação das Amostras**

O procedimento para instrumentação no concreto, tanto o núcleo como o reforço, iniciam-se com a regularização da superfície com massa plástica, devendo-se aguardar a cura da mesma. Logo após, é realizado um lixamento na superfície criada com a massa plástica, com movimentos circulares e utilizando lixas metálicas de numeração 80, 120 e 150, de modo a obter uma superfície plana e lisa. Atingido este ponto, é feita uma limpeza na superfície com acetona PA 99,5%, faz-se um destaque na região com caneta, e aplica uma faixa de fita isolante para fixação do terminal.

Na colagem dos extensômetros, coloca-se o sensor em uma superfície de vidro, devidamente limpa com acetona PA 99,5%. Na sequência, o extensômetro é preso em uma fita durex, posiciona na superfície já preparada, conforme foi mencionado anteriormente, e estando tudo de acordo, procede-se com a colagem por meio de adesivo de ciano acrilato e manter o mesmo pressionado por um minuto. Passado 2 minutos, retira-se a fita durex e impermeabiliza o extensômetro com verniz do tipo CDA.