

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO

GUILHERME GREGIO GRINGS

REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO COM A
UTILIZAÇÃO DE CHAPAS PRÉ-FABRICADAS EM UHPC

São Leopoldo

2025

GUILHERME GREGIO GRINGS

**REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO COM A
UTILIZAÇÃO DE CHAPAS PRÉ-FABRICADAS EM UHPC**

Projeto de Dissertação apresentado(a) como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador(a): Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

São Leopoldo

2025

G867r Grings, Guilherme Gregio.
Reforço à flexão de vigas em concreto armado
com a utilização de chapas pré-fabricadas em UHPC
/ Guilherme Gregio Grings. – 2025.
124 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do
Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, 2025.

“Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian”

1. Concreto armado. 2. Desempenho. 3. Fixação
química. 4. Flexão. 5. Ligação mecânica. 6. Reforço.
7. UHPC. 8. Vigas. I. Título.

CDU 624

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88887.843924/2023-00.

Dedico este trabalho à minha avó Lygia, minha
saúde diária, que me ensinou desde cedo a
ler e a dar valor às coisas simples da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa, Paula Hernandez Schnorr Grings, por ser minha parceira, confidente e tudo o mais o que eu poderia querer. É meu amor e porto-seguro, uma pessoa de coração puro, e de uma tranquilidade e confiança invejáveis. Nos momentos de nervosismo (que não foram poucos), durante a elaboração deste trabalho, era ela que estava lá para me acalmar.

Aos meus pais, meu eterno agradecimento por terem me dado tudo o que sempre precisei e por terem plantado em mim a semente da educação e da busca por conhecimento. São meus exemplos e merecem minha total gratidão.

Ao meu irmão, Eduardo e meus melhores amigos (alguns deles que conheci no mestrado), obrigado por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu orientador, Bernardo Fonseca Tutikian e meu coorientador, Roberto Christ, agradeço do fundo do coração por todo o auxílio durante o período do mestrado. Não é à toa que são referências nacionais em suas áreas de atuação e professores tão competentes. Me guiaram e iluminaram o caminho em momentos nos quais havia dúvidas e inseguranças.

Agradeço também a todos os professores do mestrado, pelos ensinamentos passados ao longo destes 2 anos de curso. A Unisinos é referência e, para mim, quase que uma segunda casa. Isso se dá não apenas pela excelente estrutura que fornece, mas principalmente por aqueles que nos ensinam.

À extremamente competente equipe do itt Performance, agradeço por todos os dias em que passamos juntos durante a realização dos ensaios. Todos ali têm um futuro brilhante pela frente.

Por fim, um agradecimento especial à Pipoca e à Amora, que me ensinam, acalmam e apaixonam só com seus olhares e expressões. Sou imensamente mais feliz desde que entraram na minha vida.

À minha avó paterna, Ethel Grings, que nos deixou durante a revisão final deste trabalho, meu agradecimento por ter sido uma grande avó e uma pessoa batalhadora, íntegra e querida por todos. Seguirei teu exemplo.

RESUMO

O presente estudo investiga o uso de chapas pré-fabricadas em *Ultra-High Performance Concrete* (UHPC) como solução para reforço à flexão de vigas de concreto armado. O UHPC é um material cimentício avançado que apresenta alta resistência à compressão, elevada tenacidade e durabilidade superior em ambientes agressivos, o que o torna uma alternativa viável para o reparo e reforço estrutural. A pesquisa foi desenvolvida com uma abordagem experimental, iniciando-se por uma revisão bibliográfica aprofundada sobre os métodos convencionais de reforço estrutural, como encamisamento em concreto armado, aplicação de chapas metálicas e reforço com fibras de carbono, permitindo uma comparação direta entre essas soluções e o potencial do UHPC. A etapa experimental envolveu a fabricação de vigas de concreto armado e chapas de UHPC, com variação na presença de armadura interna nessas chapas. Para a fixação dos reforços às vigas, foram empregados métodos químicos e mecânicos, visando garantir a aderência entre os materiais e avaliar a influência da colagem na eficiência do reforço. Os ensaios estruturais foram realizados por meio de testes de flexão em quatro pontos, permitindo analisar a capacidade resistente dos elementos reforçados, suas deformações e os padrões de fissuração apresentados ao longo do carregamento. Os resultados obtidos demonstraram que as vigas reforçadas com chapas de UHPC com armadura apresentaram desempenho 224% superior em comparação às vigas de referência sem reforço, destacando-se a menor abertura de fissuras e a maior resistência à flexão no ELS. Com base na análise dos resultados, foi possível concluir que o uso de chapas pré-fabricadas em UHPC como reforço estrutural representa uma solução promissora, unindo elevado desempenho mecânico, menor impacto arquitetônico e maior durabilidade quando comparado aos sistemas tradicionais. Além disso, a pesquisa evidencia que o método proposto permite a aplicação prática do UHPC em obras de reabilitação estrutural, otimizando custos e facilitando a execução no canteiro de obras. Assim, este estudo contribui para o avanço das técnicas de reforço estrutural e abre espaço para novas aplicações do UHPC no setor da engenharia civil.

Palavras-chave: Reforço; UHPC; Vigas; Concreto Armado; Desempenho; Flexão; Fixação Química; Ligação Mecânica.

ABSTRACT

This study investigates the use of prefabricated Ultra-High Performance Concrete (UHPC) panels as a solution for flexural strengthening of reinforced concrete beams. UHPC is an advanced cementitious material that exhibits high compressive strength, elevated toughness, and superior durability in aggressive environments, making it a viable alternative for structural repair and strengthening. The research was developed through experimental approaches, beginning with an in-depth literature review on conventional strengthening techniques, such as reinforced concrete jacketing, application of steel plates, and carbon fiber reinforcement. This review enabled a direct comparison between these traditional methods and the potential of UHPC. The experimental phase involved the fabrication of reinforced concrete beams and UHPC panels, with variations in the presence of internal reinforcement within the panels. Chemical and mechanical anchoring methods were employed to bond the strengthening elements to the beams, aiming to ensure material adhesion and evaluate the influence of bonding on the efficiency of the reinforcement. Structural testing was conducted using four-point bending tests, allowing for the assessment of the load-bearing capacity of the strengthened elements, their deformations, and the crack patterns observed throughout loading. The results demonstrated that beams strengthened with reinforced UHPC panels exhibited a performance increase of 224% compared to unstrengthened reference beams, particularly showing reduced crack widths and higher flexural resistance under serviceability limit states (SLS). Based on the analysis of the results, it was concluded that the use of prefabricated UHPC panels as structural reinforcement represents a promising solution, combining high mechanical performance, minimal architectural impact, and enhanced durability when compared to traditional systems. Furthermore, the study highlights that the proposed method enables the practical application of UHPC in structural rehabilitation projects, optimizing costs and facilitating on-site execution. Thus, this research contributes to the advancement of structural strengthening techniques and paves the way for new UHPC applications in the civil engineering field.

Keywords: Strengthening; UHPC; Beams; Reinforced Concrete; Performance; Flexure; Chemical Bonding; Mechanical Anchorage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento exponencial de pesquisas relacionadas a UHPC desde 2005	18
Figura 2 – Deformação estrutural com o tempo em fase de carregamento e descarregamento	29
Figura 3 – Desempenho da estrutura ao longo do tempo, com intervenções pontuais	35
Figura 4 – Encamisamentos em concreto armado de vigas reforçadas à flexão	36
Figura 5 – Reforços de vigas à flexão com chumbamento de perfis (à esquerda) e chapas (à direita) metálicas.....	37
Figura 6 – Reforços em manta de fibra de carbono	38
Figura 7 – Reforços com a utilização de cabos de protensão	39
Figura 8 – O UHPC como resultante de propriedades de CRF, CAD E CAA.....	40
Figura 9 – Comparação entre as composições de UHPC: (a) Li et al. (2018); (b) Liu et al. (2020); (c) Zhu et al. (2020).....	43
Figura 10 – O papel das fibras na distribuição de tensões e combate à fissuração ..	44
Figura 11 – Curvas tensão-deformação na tração (a) e compressão (b) do UHPC ..	45
Figura 12 – Variação da resistência do concreto com diferentes teores de adição de fibras metálicas em diferentes idades	46
Figura 13 – Número de pontes projetadas em UHPC nos EUA e no Canadá	47
Figura 14 – Seções de vigas de UHPC, aço, concreto protendido e concreto armado com mesma capacidade de carga e grande diferença de peso por elemento	47
Figura 15 – Resistência à compressão vs. consumo de aglomerantes.....	49
Figura 16 – Intensidade de aglomerantes (b_{ics}) vs. resistência à compressão aos 28d	50
Figura 17 – Emissão estimada de CO_2 vs. resistência à compressão aos 28d.....	50
Figura 18 – Relação tensão-deformação de vigas de concreto reforçadas com UHPC	53
Figura 19 – Falha na fixação entre viga de concreto armado e camada de reforço ..	54
Figura 20 – Detalhamento da forma das vigas.....	57
Figura 21 – Detalhamento da forma das chapas de UHPC	58
Figura 22 – Dimensões da viga de concreto armado e posição do reforço em UHPC	58

Figura 23 – Dimensões do reforço em UHPC	58
Figura 24 – Concretagem das vigas.....	60
Figura 25 – Vigas concretadas e cobertas com manta geotêxtil	61
Figura 26 – Dosagens e testes realizados para a escolha do traço a ser utilizado ...	61
Figura 27 – Chapas de UHPC concretadas	62
Figura 28 – Chapas concretadas e desformadas, indo para cura térmica	63
Figura 29 – Reforços colocados sobre as vigas identificadas, antes da fixação	63
Figura 30 – Detalhe da fixação mecânica dos reforços, com barra rosca e arruelas	64
Figura 31 – Detalhamento da fixação dos chumbadores mecânicos	65
Figura 32 – Esquema do ensaio de flexão de 4 pontos nas vigas reforçadas	66
Figura 33 – Esquema do ensaio de flexão de 4 pontos nos reforços	66
Figura 34 – LVDT's posicionados no centro das amostras, medindo deslocamentos	67
Figura 35 – Fissuração inicial, localizada na parte inferior central	69
Figura 36 – Rompimento da viga à flexão, abaixo de ponto de transferência de carga	69
Figura 37 – Trincas verticais na base, com maiores aberturas na parte central	72
Figura 38 – Deformação da viga	72
Figura 39 – Trincas verticais na base, com maiores abertura na parte central	74
Figura 40 – Deformação da viga	75
Figura 41 – Rachadura a 45° fora da área reforçada, indicando cisalhamento.....	79
Figura 42 – Fissura (à esquerda) e fenda (à direita) fora da região do reforço	81
Figura 43 – Fissura vertical na parte inferior central da amostra e do reforço	85
Figura 44 – Fissura vertical na parte inferior central da amostra e do reforço	86
Figura 45 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações.....	86
Figura 46 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações.....	87
Figura 47 – Elevadas aberturas verticais e horizontais (acompanhando a armadura positiva), com grande deformação	87
Figura 48 – Fissura vertical na parte inferior central da amostra e do reforço	89
Figura 49 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações.....	90
Figura 50 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações, e esmagamento de concreto na parte superior, em virtude de compressão	90
Figura 51 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações.....	93

Figura 52 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações.....	93
Figura 53 – Rachadura na parte inferior central do reforço, com ramificações	94
Figura 54 – Rachadura na parte inferior central do reforço, com ramificações	94
Figura 55 – Deformação inicial da chapa, já com fissuração central.....	98
Figura 56 – Deformação inicial da chapa, já com fissuração central.....	98
Figura 57 – Deformação inicial da amostra, já com fissuração central	100
Figura 58 – Fissuração inferior e esmagamento superior da amostra	101
Figura 59 – Grande deformação da amostra, ainda sob elevação de carregamento	101
Figura 60 – Falhas visíveis na colagem da chapa de reforço na amostra 03, que demonstrou maior fissuração em cargas iniciais dentro do grupo das reforçadas ..	105
Figura 61 – Colagem bem realizada na amostra 01, que apresentou melhor desempenho no estado limite de serviço do que a da figura anterior	106
Figura 62 – Trinca vertical em viga, acima de trecho com má colagem da chapa ..	106
Figura 63 – Reações e gráficos de momento fletor e esforço cortante para cálculo das vigas de referência, considerando aplicação de carga igual a 37 kN.....	118
Figura 64 – Granulometria dos materiais utilizados no concreto das vigas.....	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Força x Deslocamento da Amostra 01	68
Gráfico 2 – Força x Deslocamento da Amostra 02	71
Gráfico 3 – Força x Deslocamento da Amostra 03	73
Gráfico 4 – Força x Deslocamento de todas as amostras	76
Gráfico 5 – Força x Deslocamento da Amostra 01	77
Gráfico 6 – Força x Deslocamento da Amostra 02	80
Gráfico 7 – Força x Deslocamento das duas amostras	82
Gráfico 8 – Força x Deslocamento da Amostra 01	84
Gráfico 9 – Força x Deslocamento da Amostra 2	88
Gráfico 10 – Força x Deslocamento da Amostra 03	91
Gráfico 11 – Força x Deslocamento de todas as amostras	95
Gráfico 12 – Força x Deslocamento da amostra não-armada	96
Gráfico 13 – Força x Deslocamento da amostra armada	99
Gráfico 14 – Comparativo de comportamento entre as vigas de referência e as com reforço sem aço, em fase inicial de carregamento	102
Gráfico 15 – Força x Deslocamento de todas as vigas ensaiadas	103
Gráfico 16 – Pontos de fissuração inicial na amostra 03, em virtude de má colagem	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de resistência do UHPC.....	18
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos principais modelos de reforço estrutural	20
Tabela 3 – Divisão e caracterização das ações permanentes	27
Tabela 4 – Divisão e caracterização das ações permanentes	28
Tabela 5 – Limites para deslocamentos.....	31
Tabela 6 – Exigências mínimas de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental	32
Tabela 7 – Causas das manifestações patológicas em estruturas de concreto	33
Tabela 8 – Relação entre energia gerada, emissão de CO ₂ e resistência à compressão de CC e UHPC	51
Tabela 9 – Etapas e processos desenvolvidos previamente aos ensaios.....	56
Tabela 10 – Características das vigas executadas para o estudo	56
Tabela 11 – Materiais utilizados nas vigas de concreto armado	59
Tabela 12 – Materiais utilizados nas chapas de UHPC.....	62
Tabela 13 – Principais resultados da amostra 01 (vigas de referência)	69
Tabela 14 – Principais resultados da amostra 02 (vigas de referência)	70
Tabela 15 – Principais resultados da amostra 03 (vigas de referência)	73
Tabela 16 – Principais resultados da amostra 01 (vigas com chapas armadas).....	77
Tabela 17 – Principais resultados da amostra 02 (vigas com chapas armadas).....	80
Tabela 18 – Principais resultados da amostra 01 (vigas reforçadas com chapas de UHPC não-armadas).....	84
Tabela 19 – Principais resultados da amostra 02 (vigas com chapas não-armadas).....	88
Tabela 20 – Principais resultados da amostra 03 (vigas com chapas não-armadas).....	91
Tabela 21 – Principais resultados da amostra de UHPC não-armada	97
Tabela 22 – Principais resultados da amostra de UHPC armada	100
Tabela 23 – Resumo dos resultados principais obtidos em cada amostra ensaiada	104
Tabela 24 – Resumo dos resultados principais obtidos em cada amostra ensaiada	104
Tabela 25 – Granulometria dos materiais utilizados nas chapas de UHPC	116
Tabela 26 – Cálculos e resultados dos esforços de flexão	118

Tabela 27 – Cálculos e resultados dos esforços de cisalhamento	119
Tabela 28 – Cálculos e resultados dos esforços de torção	120
Tabela 29 – Resumo dos resultados	121
Tabela 30 – Cálculos e resultados dos esforços de flexão	122
Tabela 31 – Cálculos e resultados dos esforços de cisalhamento	123
Tabela 32 – Cálculos e resultados dos esforços de torção	123
Tabela 33 – Resumo dos resultados	124

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Concreto Autoadensável
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CC	Concreto Convencional
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
CP	Concreto Protendido
CPR	Concreto de Pós-Reativos
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CUAD	Concreto de Ultra-Alto Desempenho
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
NBR	Norma Brasileira
RB	Relaxação Baixa
RN	Relaxação Normal
UHPC	<i>Ultra-High Performance Concrete</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo geral	19
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
1.2 JUSTIFICATIVA	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO.....	24
2.1.1 Estados Limites	25
2.1.2 Ações.....	26
2.1.2.1 Ações permanentes.....	27
2.1.2.2 Ações variáveis	27
2.1.3 Fluência.....	29
2.1.4 Deformações.....	30
2.1.5 Durabilidade.....	32
2.2 REFORÇO	34
2.2.1 Aumento da Seção Transversal	36
2.2.2 Fixação de Chapas e Perfis Metálicos	37
2.2.3 Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras	38
2.2.4 Adição de Cordoalhas Externas e Tractionamento	39
2.3 <i>ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE</i> (UHPC)	40
2.3.1 Principais Características do UHPC	41
2.3.2 Composição do UHPC	42
2.3.2.1 Fibras	44
2.3.3 Aplicação do UHPC	46
2.3.4 Sustentabilidade.....	48
2.3.5 UHPC como reforço	52
3 METODOLOGIA	56
4 RESULTADOS.....	68
4.1 VIGAS DE REFERÊNCIA	68
4.1.1 Amostra 01	68
4.1.2 Amostra 02.....	70
4.1.3 Amostra 03.....	73

4.1.4 Dados	75
4.2 VIGAS REFORÇADAS COM UHPC ARMADO	76
4.2.1 Amostra 01	77
4.2.2 Amostra 02	79
4.2.3 Dados	82
4.3 VIGAS REFORÇADAS COM CHAPAS DE UHPC NÃO-ARMADO	83
4.3.1 Amostra 01	83
4.3.2 Amostra 02	88
4.3.3 Amostra 03	91
4.3.4 Dados	95
4.4 CHAPAS DE UHPC	96
4.4.1 Não-armada	96
4.4.2 Armada	99
4.5 DESEMPENHO	102
4.6 COLAGEM DAS CHAPAS	105
5 CONCLUSÕES	107
REFERÊNCIAS	110
APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DO UHPC	116
APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS VIGAS REFERÊNCIA	118
APÊNDICE C – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS VIGAS REFORÇADAS	122
ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DAS VIGAS	125

1 INTRODUÇÃO

A engenharia de estruturas tem sido gradativamente desafiada por projetos arquitetônicos que prezam por elementos esbeltos, carregamentos e balanços elevados, bem como grandes vãos livres, o que consequentemente acarreta em maiores deformações e exposições destes elementos ao ataque de agentes externos, em ambientes cada vez mais agressivos.

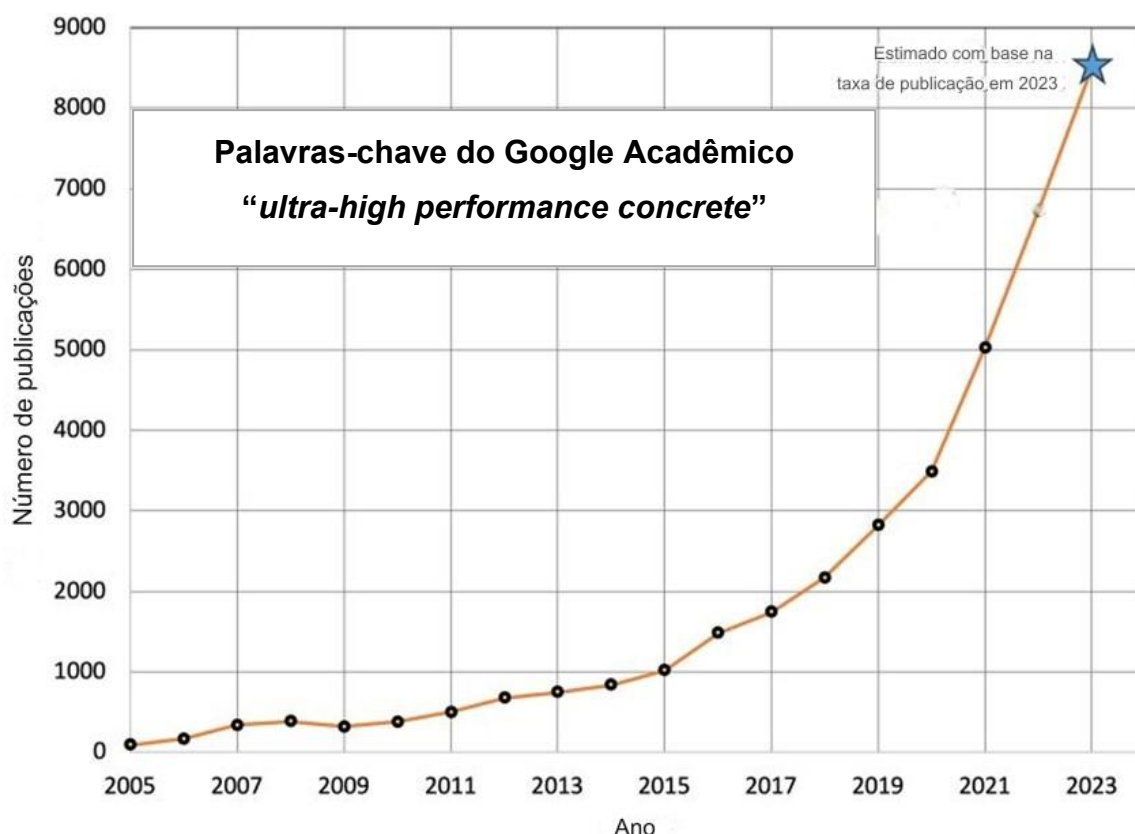
Ao mesmo tempo, a tendência é a de que cada vez mais se constate o fim da vida útil de projeto de sistemas estruturais em edificações projetadas antes da década de 80, demandando dos profissionais do setor não apenas conhecimento técnico acerca do tema, mas também uma gama suficiente de soluções disponibilizada pelo mercado da construção civil relacionadas a reforços.

É comum a utilização de elementos em concreto armado, metálicos ou polímeros reforçados com fibras para o aumento da capacidade de carga e da durabilidade de estruturas, porém sabe-se que estas soluções possuem limitações, demandando o desenvolvimento de novas alternativas para esta área.

Em virtude desta crescente demanda por desempenho e durabilidade, a indústria construtiva desenvolveu, ao longo do tempo, materiais e sistemas que possibilitam soluções para diversos tipos de solicitações. Entre elas é possível citar o *Ultra-High Performance Concrete* (UHPC).

O primeiro registro da utilização do UHPC, segundo Warnock (2005), foi na construção de uma passarela na cidade de Sherbrook, no Canadá, em 1997. Trata-se de um concreto definido pelo CT 303 (2022), como tendo elevada resistência à compressão (acima de 130 MPa) e à tração pós-fissuração, com comportamento dúctil, possibilitando a produção de elementos incluindo ou não armaduras, além de elevada durabilidade em ambientes agressivos e otimizado empacotamento. Estes fatores têm instigado pesquisadores, acarretando, como mostra a Figura 1, em um crescimento exponencial de buscas acerca do tema, principalmente desde o ano de 2005.

Figura 1 – Crescimento exponencial de pesquisas relacionadas a UHPC desde 2005



Fonte: El-Tawil et al. (2023).

O *Ultra-High Performance Concrete*, pode ser usado nos mais diversos tipos de estruturas, sendo uma grande alternativa em diversos projetos na indústria da construção civil, devido, principalmente, à sua elevada resistência à compressão, resistência à tração (como apresentado da Tabela 1), ductilidade, dureza, durabilidade e rigidez, sendo estas as propriedades mais notáveis do material. (TORREGROSA, 2013).

Tabela 1 – Classes de resistência do UHPC

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Resistência característica à tração no limite de elasticidade (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Classe de comportamento pós-fissuração à tração
UHPC 130	≥ 130	≥ 6	≥ 45	T1, T2 ou T3
UHPC 150	≥ 150			
UHPC 180	≥ 180			
UHPC 200	≥ 200			
UHPC 250	≥ 250			

Fonte: Adaptado de CT 303 (2022).

A elevada resistência à tração do UHPC e o aumento da tenacidade são decorrentes, principalmente, da incorporação de fibras na matriz, que é fundamental para que o desempenho do material seja alcançado. As fibras empregadas no UHPC possuem elevado módulo de elasticidade e alta resistência mecânica, possuindo dimensões reduzidas pelo fato da matriz não possuir agregados graúdos. (CHRIST, 2019).

Segundo estudo realizado por Said et al. (2022), em virtude das características já citadas e outras que serão apresentadas ao longo deste trabalho, o UHPC se torna uma excelente alternativa para reforço de estruturas, superior até mesmo aos já consolidados sistemas metálicos e polímeros reforçados com fibras.

A partir desta introdução ao tema da pesquisa são definidos os objetivos deste trabalho, apresentados a seguir.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento mecânico à flexão de vigas executadas em concreto armado reforçadas com chapas pré-fabricadas de UHPC.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar o desempenho entre os elementos reforçados e as vigas de referência no estado-limite de serviço, em termos de deslocamento e fissuração;
- Avaliar se as barras de reforço inseridas nas chapas desempenham uma função importante de acréscimo de resistência e diminuição de fissuração;
- Verificar se o procedimento de fixação proposto (químico e mecânico) é eficaz na ligação entre elementos distintos de concreto;
- Examinar a influência de falhas no método de colagem das chapas no desempenho do reforço.

1.2 JUSTIFICATIVA

A área de reforço estrutural é fundamental na garantia do elevado desempenho de uma edificação e da segurança de seus usuários ao longo de sua vida útil, quando da necessidade de aumento de capacidade de carga de elementos (que pode acontecer por diversos fatores) fazendo com que o tema seja sempre de grande relevância, incentivando a proposição de novas soluções.

Algumas alternativas existentes sugerem, para aumento da capacidade resistente de vigas (elemento analisado nesta pesquisa), a utilização de reforços em concreto armado, polímeros reforçados com fibras ou chapas/perfis metálicos. Porém, como mostra a Tabela 2, estes sistemas possuem desvantagens importantes que devem ser consideradas na escolha.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos principais modelos de reforço estrutural

Tipo de Reforço	Vantagens	Desvantagens
Concreto armado	Custo e durabilidade em ambientes agressivos	Execução complexa, peso elevado, impacto arquitetônico e difícil fixação à estrutura existente
Estrutura metálica	Execução mais fácil em relação ao concreto armado e elevada resistência mecânica	Baixa resistência ao fogo e rápida deterioração em ambientes agressivos
Tecidos/fitas/mantas/lâminas reforçados com fibras	Leveza e impacto arquitetônico	Rompimento ao corte (em situações de vandalismo, por exemplo), possibilidade de desprendimento devido ao acréscimo de tensões e alto custo

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir da adaptação do que dizem Souza e Ripper (1998), Cordeiro (2019) e Timerman (2022).

Em diversas ocasiões, a aplicação de certos tipos de reforços se torna inviável devido às características específicas do problema ou da situação. Por exemplo, o reforço por aumento de seção não é adequado em ambientes onde a redução do espaço interno não é possível. Da mesma forma, o uso de polímeros reforçados com fibras não é aconselhável em situações em que a deformação elevada do elemento reforçado não pode ser tolerada, devido à possibilidade de desprendimento pelo

acréscimo de tensões, enquanto o reforço com chapas de aço requer mão de obra especializada e cuidados para evitar a corrosão do material. (ENAMI, 2017).

Segundo Mirdan e Saleh (2022), o UHPC representa uma classe recente de material cimentício com notáveis resistências à compressão e tração, baixa permeabilidade e excelente durabilidade, caracterizando-o como um material ideal para aplicações em fortalecimento e reabilitação estrutural.

O uso do UHPC como material de reforço foi investigado em vários trabalhos, como os de Wei et al. (2021), Nagib et al. (2021) e Khan et al. (2018). Diversos pesquisadores estudaram experimentalmente o comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com este material. Constatou-se que o uso de chapas de UHPC para melhorar o comportamento e a capacidade de carga de vigas de concreto armado pode ser uma opção eficaz para o reforço de estruturas degradadas. Chegou-se à conclusão de que o UHPC pode melhorar a rigidez das vigas reforçadas e retardar a formação de fissuras localizadas, aumentando a resistência e durabilidade. (SAID et al., 2022).

Wei et al. (2021) investigaram experimentalmente a eficácia do uso de UHPC na melhoria da resistência ao impacto de vigas de concreto armado. Concluiu-se que vigas reforçadas com UHPC apresentaram maior resistência ao impacto do que vigas não reforçadas. Nagib et al. (2021) realizaram trabalhos experimentais para investigar o comportamento de paredes de concreto armado reforçadas com UHPC sob carga cíclica. Concluiu-se que a utilização do material configura uma técnica eficaz para melhorar as capacidades de carga lateral, dissipação de energia e ductilidade. Khan et al. (2018) relataram que a técnica de reforço com UHPC é altamente eficiente na melhoria da capacidade de cisalhamento, deformação e dissipação de energia das junções viga-pilar sob carga sísmica. Murthy et al. (2018) estudaram experimentalmente o comportamento estrutural de vigas de concreto armado danificadas reforçadas com a utilização de UHPC e concluíram se tratar de um método eficaz.

Diversas pesquisas, como as de Elsayed et al. (2022) e Mansour et al. (2022) abordaram a utilização de placas pré-fabricadas de UHPC para fortalecer o concreto armado por meio do emprego de adesivo epóxi. A inclusão de uma barra de reforço de aço na camada de UHPC revelou-se substancial para aprimorar a capacidade de carga final.

Trabalhos como o de Cordeiro (2019) e Pimentel, Sine e Nunes (2022) foram realizados com a utilização da chamada *superskin*, ou seja, executando-se uma “pele” em UHPC, com elevada resistência, no entorno do elemento, de forma a não apenas reforçá-lo estruturalmente, mas também aumentar consideravelmente sua durabilidade. Entretanto, estas pesquisas não representam fielmente a complexidade da realização destes processos *in loco*, no caso de reforços em vigas de edificações em situação crítica principalmente por dois motivos:

1. A principal desvantagem do método de reforço em concreto armado é a execução, tendo em vista a complexidade da construção de formas e do preenchimento completo dos espaços internos, bem como a aderência do novo concreto ao substrato existente;
2. O UHPC é um material não recomendado de ser executado no canteiro de obras (moldado *in loco*), mas sim pré-fabricado, com elevado controle de produção, para garantir seu correto desempenho. Portanto, propor uma solução com reforços em UHPC moldados no local é válida, mas de difícil execução.

Assim sendo, considera-se necessária uma análise que reúna as vantagens de cada sistema de reforço. Sendo o UHPC um concreto de altíssima resistência, estudar a utilização deste material como reforço externo por meio de placas (já estabelecidas em reforços metálicos) pode resultar em uma solução que não impacte a arquitetura e não dificulte a execução (pontos negativos dos reforços em concreto armado convencional), e seja, ao mesmo tempo, resistente a elevadas temperaturas e à corrosão (pontos negativos dos reforços metálicos), bem como à fixação, ao corte e ao deslocamento elevado sob tensão (pontos negativos dos reforços com polímeros reforçados com fibras).

Este estudo tem diversos pontos a serem analisados e entre os principais está a fixação do elemento de reforço na viga de concreto armado. Este procedimento deve aliar a utilização de bons materiais com uma execução bem-feita, tendo em vista que a fixação química é um problema verificado em alguns tipos de reforços, até mesmo em estudos com UHPC, como os de Mirdan e Saleh (2022) e Zhou et al. (2023), e a fixação mecânica não é comumente utilizada em situações que requeiram a ligação entre elementos de concreto.

Por fim, a intenção deste trabalho é qualificar o leque de opções disponíveis no mercado para reforço de estruturas. Ainda, a proposta desta pesquisa não se aplica somente ao aumento da capacidade portante de elementos existentes, mas também de elementos novos, reduzindo seções sem afetar a arquitetura, até mesmo porque o UHPC já vem sendo largamente utilizado como material constituinte de peças decorativas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

O concreto é um material frágil, obtido por meio da mistura de cimento (aglomerante), agregados, água e aditivos, com grande capacidade resistente à compressão e baixa resistência à tração. Em virtude desta última característica, os elementos estruturais são compostos, também, por aço (principalmente nas regiões tracionadas), formando o concreto armado. (ABNT NBR 6118:2024; CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014; CHOLFE E BONILHA, 2018).

Segundo Neville e Brooks (2010), a propriedade primordial frequentemente atribuída ao concreto é sua resistência, embora em diversos contextos práticos, atributos como durabilidade, impermeabilidade e estabilidade de volume possam, de fato, ter maior relevância. Contudo, a resistência geralmente fornece uma avaliação global da qualidade do concreto, dado seu elo direto com a estrutura da pasta de cimento.

O estudo conduzido por Paul, Van Zijl e Šavija (2020) aborda a exposição de estruturas de concreto a diversas condições ambientais ao longo de sua vida útil. A durabilidade dessas estruturas é definida pela capacidade de resistir a essas condições de exposição sem necessidade de reparos ou reabilitação expressivos. Apesar da crença de longa data na durabilidade inerente do concreto, que supostamente permitiria sua vida útil por muitas décadas ou até séculos com manutenção mínima ou nula, as limitações, como a resistência à tração relativamente baixa e o comportamento frágil sob tensão, tornam essencial o emprego de reforços, usualmente sob a forma de barras de aço ou fibras, em grande parte das estruturas.

Segundo Mazer et al. (2021), diante da deterioração das estruturas de concreto ao longo de sua vida útil, torna-se imperativo realizar intervenções pontuais, seja por meio de reforço estrutural ou recuperação estrutural, conforme a natureza específica do caso, para garantir maior durabilidade ao sistema.

Devido a diversos fatores, como a já citada deterioração (natural ou em decorrência de falta de manutenção), mas também em virtude de sobrecarga e mudança de utilização da estrutura, elementos como vigas, lajes e pilares deverão ser reforçados para garantir segurança e conforto à edificação. É imperativo que os responsáveis técnicos tenham consciência do comportamento do sistema estrutural,

de forma a analisar seu comportamento, avaliar seu reforço e acompanhar sua eficácia. Para isso é fundamental conhecer os estados limites, as ações impostas e as principais características dos elementos estruturais em concreto armado.

2.1.1 Estados Limites

Os estados limites considerados no cálculo das estruturas de concreto armado são os estados limites últimos e os estados limites de serviço.

O estado limite último é aquele relacionado ao colapso ou qualquer outra forma de ruína da estrutura que determine a paralisação, no todo ou em parte, do uso da estrutura.

A segurança das estruturas de concreto pode exigir a verificação de alguns dos seguintes estados limites de serviço definidos no item 3.2 da ABNT NBR 6118:2024, ou de outros especiais não definidos na norma:

- a) Formação de fissuras (ELS-F): estado em que se inicia a formação de fissuras;
- b) Abertura das fissuras (ELS-W): estado em que as fissuras se apresentam com aberturas iguais aos valores máximos especificados no item 13.4.2 da norma;
- c) Deformação excessiva (LS-DEF): estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para utilização normal da estrutura;
- d) Vibrações excessivas (ELS-VE): estado em que as vibrações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção.

Os estados limites de serviço, de acordo com o item 4.1.2.2 da ABNT NBR 8681:2003, decorrem de ações que podem ser combinadas de três maneiras, de acordo com o tempo de permanência na estrutura:

- a) Combinações quase permanentes: combinações de ações que podem atuar sobre a estrutura durante mais da metade do seu período de vida;
- b) Combinações frequentes: combinações de ações que se repetem, durante o período de vida da estrutura, em torno de 10^5 vezes em 50 anos ou que

tenham duração total igual a uma parte não desprezível desse período da ordem de 5%; e

- c) Combinações raras: combinações de ações que podem atuar no máximo algumas horas durante o período de vida da estrutura.

Em termos de reforço, é fundamental conhecer os estados limites estruturais de forma a compreender as limitações relativas aos tipos de efeitos, deslocamentos máximos e exigências relativas à fissuração. Para se optar pela utilização e pelo melhor tipo de reforço deve-se inicialmente entender o comportamento dos elementos estruturais afetados bem como se seus estados limites foram ou serão atingidos. E em qual magnitude.

2.1.2 Ações

O termo "ação" refere-se a qualquer força ou combinação de forças que tem a capacidade de gerar tensões ou deformações em uma estrutura. (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Conforme estabelecido pela ABNT NBR 6118:2024 (item 11.2.1), *“Na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em exame, levando-se em conta os possíveis estados-limites últimos e os de serviço.”*

De acordo com a ABNT NBR 8681:2003 (item 3.4), as ações são definidas como as *“causas que provocam o aparecimento de esforços ou deformações nas estruturas. Do ponto de vista prático, as forças e as deformações impostas pelas ações são consideradas como se fossem as próprias ações. As deformações impostas são por vezes designadas por ações indiretas e as forças, por ações diretas.”*

Portanto, conforme explica Bastos (2019), no projeto de estruturas e elementos estruturais, é imperativo considerar todas as possíveis ações desde o início da construção até o final da vida útil. Isso abrange uma ampla gama de origens e causas, incluindo ações permanentes (como peso próprio, paredes, lajes, etc.) e variáveis de utilização, bem como aquelas provenientes de vento, possíveis tremores de terra, pressão do solo, água ou outros líquidos, forças de impacto e explosões, eventos durante a construção, deformações de retração e fluência no concreto, variações de temperatura, recalques de apoio, movimentações das fundações, incêndios,

carregamentos dinâmicos, e forças de protensão no caso de peças protendidas. O rigor na consideração dessas diversas ações é crucial para garantir a segurança e durabilidade das estruturas ao longo de sua vida útil.

2.1.2.1 Ações Permanentes

As ações permanentes, conforme definido pela ABNT NBR 6118:2024 (item 11.3.1), são caracterizadas por ocorrerem com valores praticamente constantes ao longo de toda a vida da construção. Estas ações são aquelas que exercem influência permanente ao longo do tempo, incluindo não apenas o peso próprio dos elementos, mas também o peso de elementos construtivos fixos, como paredes, e instalações permanentes.

Segundo Bastos (2019), a compreensão precisa e a consideração adequada das ações permanentes são cruciais na análise estrutural, pois elas representam uma carga constante que influencia de forma significativa o desempenho e a estabilidade da construção ao longo de sua vida útil. As ações permanentes, conforme apresenta a Tabela 3, são divididas em diretas e indiretas:

Tabela 3 – Divisão e caracterização das ações permanentes

Ações Permanentes	
Tipo	Configuração
Direta	Peso próprio
	Peso dos elementos construtivos fixos e de instalações permanentes
	Empuxos Permanentes
Indireta	Retração do concreto
	Fluência
	Protensão

Fonte: Adaptado de Bastos (2019).

2.1.2.2 Ações Variáveis

Conforme explicitado pela ABNT NBR 8681:2003 (item 3.6), as ações variáveis são definidas como aquelas que apresentam variações significativas em torno de sua média ao longo da vida da construção. Essas ações, como cargas aplicadas sobre as lajes dos pavimentos e forças do vento, destacam-se por suas flutuações notáveis em relação à média.

Assim como as ações permanentes, as ações variáveis também se subdividem em diretas e indiretas (Tabela 4), respeitando a classificação estabelecida. Esta distinção é crucial para uma análise estrutural precisa, visto que as ações variáveis desempenham um papel fundamental na avaliação do comportamento dinâmico e na segurança da construção ao longo de sua vida útil. (BASTOS, 2019).

Tabela 4 – Divisão e caracterização das ações permanentes

Ações Variáveis	
Tipo	Configuração
Direta	Cargas acidentais previstas para o uso da construção
	Ação do vento e da água
	Ações variáveis durante a construção
Indireta	Variações uniformes de temperatura
	Variações não uniformes de temperatura
	Ações dinâmicas

Fonte: Adaptado de Bastos (2019).

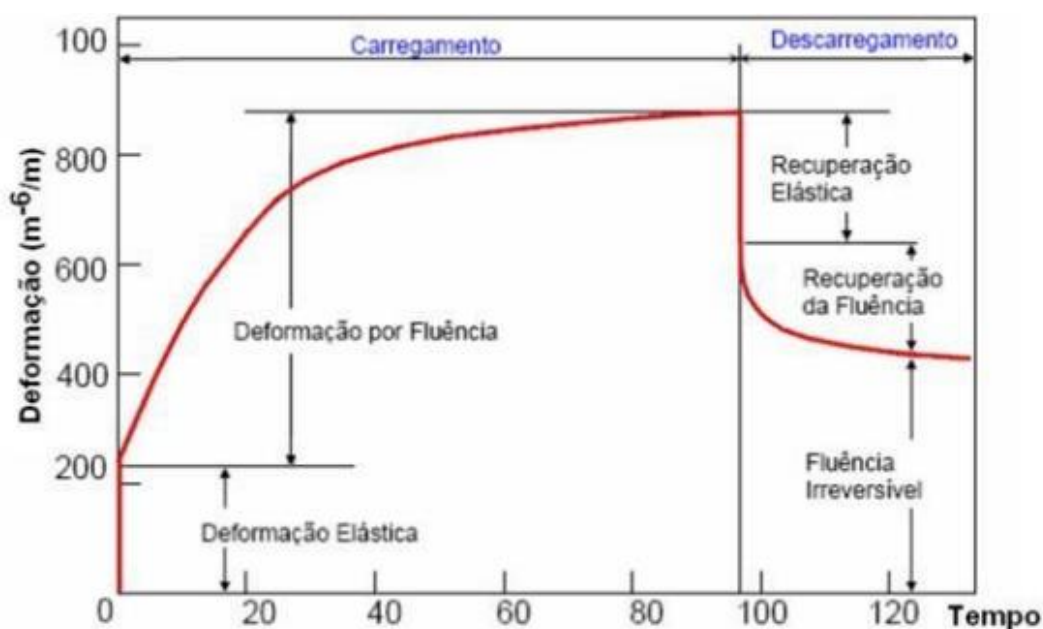
A partir da década de 60, observou-se um significativo avanço nos processos de cálculos e projetos estruturais. A introdução da técnica de probabilização das variáveis estruturais (ações e resistências) e a aplicação do método dos estados-limites proporcionaram aos engenheiros estruturais a capacidade de desenvolver formulações mais precisas para avaliar a segurança e o desempenho de edificações. A análise estrutural, impulsionada pelo uso de computadores e programas de alta capacidade, desempenhou um papel crucial ao ampliar as possibilidades de emprego de modelos sofisticados, equipados com processamentos rápidos e confiáveis. Essas simulações podem ser tanto lineares quanto não lineares, contemplando respostas estáticas ou dinâmicas (CHOLFE E BONILHA, 2018).

Em termos de reforços estruturais considera-se fundamental o conhecimento acerca das ações variáveis e permanentes, tendo em vista que em diversos momentos, a necessidade de acréscimo na capacidade resistente de elementos estruturais se dará em virtude da modificação do uso da edificação. Havendo esta alteração, serão reanalisados os esforços em virtudes de novas ações sobre a estrutura, acarretando cargas móveis diferentes e cargas permanentes com outros pesos específicos em relação aos originais.

2.1.3 Fluência

A fluência é identificada pelo aumento progressivo das deformações ao longo do tempo quando um material está sujeito a uma carga constante. Essa é uma propriedade diferida, semelhante à retração, e é causada pelo comportamento viscoelástico do concreto. O aumento da fluência ocorre imediatamente após a aplicação da carga, como pode ser verificado na Figura 2, tendendo a diminuir de intensidade à medida que o concreto envelhece. (COSTA, 2012).

Figura 2 – Deformação estrutural com o tempo em fase de carregamento e descarregamento



Fonte: Metha e Monteiro (2013).

De acordo com Bolina, Tutikian e Helene (2019), uma carga de longa duração é entendida como aquela mantida por 15 minutos ou mais e que quanto maior o carregamento constante, maior será o impacto da fluência sobre a estrutura, ocasionado pela relaxação (ou efeito Rüschi) que é a redução da capacidade resistente do elemento devido ao aumento da deformação plástica permanente.

Segundo a ABNT NBR 6118:2024 (item A.2.2.1), a deformação por fluência do concreto é composta de duas partes, uma rápida e outra lenta. A deformação rápida é irreversível e ocorre durante as primeiras 24 horas após a aplicação da carga que a originou. A deformação lenta é, por sua vez, composta por duas outras parcelas: a deformação lenta irreversível e a deformação lenta reversível.

De acordo com Haber et al. (2018), o UHPC apresenta menor deformação por fluência quando comparado ao concreto convencional. Essa característica é atribuída, principalmente, à elevada resistência mecânica e ao alto módulo de elasticidade desse material. Assim como ocorre com a retração, a fluência também pode ser substancialmente minimizada em função do método de cura empregado.

De acordo com Lima (2020), os principais fatores que interferem na fluência do concreto são: a qualidade dos materiais e dosagem; carregamento, seja estático ou cíclico; a resistência à compressão da pasta cimentícia; a geometria do elemento estrutural; a idade em que o elemento foi carregado; e as condições de cura.

A influência da adição de fibras na fluência de concretos foi investigada por Yi Xu et al. (2018), os quais constataram que a incorporação de 1% e 2% de fibras em UHPC promoveu, após 180 dias, uma redução do coeficiente de fluência em 25,4% e 13,4%, respectivamente, quando comparado ao UHPC isento de fibras. Esses resultados sugerem que a presença de fibras pode contribuir de forma significativa para a mitigação da fluência. Por outro lado, os mesmos autores ressaltam que teores elevados de fibras podem comprometer a autoadensabilidade do UHPC, favorecendo o enfraquecimento relativo da interface entre a fibra e a matriz cimentícia.

2.1.4 Deformações

Elementos estruturais em concreto armado sofrem deformações em virtude de diversos fatores, mas principalmente relacionados a ações, carregamentos e características do próprio material, como módulo de elasticidade e resistência.

Quando não há impedimento à livre deformação do concreto, e a ele é aplicada, no tempo t_0 , uma tensão constante no intervalo $t - t_0$, sua deformação total, no tempo t , vale:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t)$$

onde

$\varepsilon_c(t_0) = \sigma_c(t_0) / E_{ci}(t_0)$ é a deformação imediata;

$\varepsilon_{cc}(t_0) = [\sigma_c(t_0) / E_{ci28}] \varphi(t, t_0)$ é a deformação por fluência;

$\varepsilon_{cs}(t)$ é a deformação por retração.

A ABNT NBR 6118:2024 estabelece limites para deslocamentos e aberturas de fissuras em elementos, como mostram, respectivamente, as Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Limites para deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas variáveis de utilização	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350 + \text{contraflecha}$
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
	Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após o nivelamento do equipamento	De acordo com a recomendação do fabricante do equipamento
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500$ e 10 mm e $\theta = 0,0017\text{rad}$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente	$H/1.700$ e $H/850$ entre pavimentos
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$l/400$ e 15 mm
	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$l/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	$l/175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$l/400$
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação a hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118:2024.

Tabela 6 – Exigências mínimas de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Tipo de protensão	Classe de agressividade ambiental (CAA)	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	-	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	-	CAA I	ELS-W WK ≤ 0,4 mm	Combinação frequente
	-	CAA II e CAA III	ELS-W WK ≤ 0,3 mm	
	-	CAA IV	ELS-W WK ≤ 0,2 mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração	CAA I	ELS-W WK ≤ 0,2 mm	Combinação frequente
	Pós-tração	CAA I e CAA II		
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração	CAA I e CAA II	Verificar as duas condições abaixo	
			ELS-F	Combinação frequente
	Pós-tração	CAA I a CAA IV	ELS-D	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração	CAA I a CAA IV	Verificar as duas condições abaixo	
			ELS-F	Combinação rara
	Pós-tração	CAA I a CAA IV	ELS-D	Combinação frequente

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118:2024.

Com base nas tabelas apresentadas é possível constatar que os limites de deslocamento seguem um critério que abrange, principalmente, segurança e conforto dos usuários da edificação. Movimentações elevadas da estrutura tendem a gerar fissuração principalmente na parte tracionada do concreto (seja ele armado ou protendido), acarretando não apenas na exposição da armadura, mas também em problemas em outros sistemas construtivos (como o de revestimentos, por exemplo). Isso afeta diretamente a durabilidade da edificação.

2.1.5 Durabilidade

Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011), até meados da década de 1980, a concepção de durabilidade do concreto nas construções do século XX era predominantemente subjetiva, baseada no bom senso e na experiência dos profissionais, além de exigências prescritivas. Contudo, desde então, houve

significativos avanços nos estudos sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado e protendido. Isso se deve, em grande parte, ao aprofundamento do conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e gases agressivos em meios porosos, como o concreto. Esses avanços permitiram a associação temporal a modelos matemáticos que quantificam esses mecanismos de maneira mais precisa.

A Tabela 7, adaptada a partir da análise realizada por Souza e Ripper (1998), mostra as principais causas de anomalias detectadas por diversos autores em seus respectivos estudos realizados em seus países na segunda metade do século XX. Mesmo não se tratando de dados atuais, considera-se estes dados importantes para se analisar não apenas pontos falhos no processo construtivo de cada país, mas também a diferença entre eles.

Tabela 7 – Causas das manifestações patológicas em estruturas de concreto

Fonte de Pesquisa	Causas			
	Concepção e projeto	Materiais	Execução	Utilização e outras
Edward Grunau Paulo Helene (1992)	44	18	28	10
D. E. Allen (Canadá) (1979)	55	<= 49 =>		
C.S.T.C. (Bélgica) Verçosa (1991)	46	15	22	17
C.E.B. Boletim 157 (1982)	50	<= 40 =>		10
Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteado Verçosa (1991)	18	6	52	24
B.R.E.A.S. Reino Unido (1972)	58	12	35	11
Bureau Securitas (1972)	<= 88 =>			12
E.N.R. (USA) (1978)	9	6	75	10
S.I.A. (Suíça) (1979)	45		44	10
Dov Kaminetzky (1991)	51	<= 40 =>		16
Jean Blévoit (França) (1974)	35	-	65	-
I.E.M.I.T. (Venezuela) (1975)	19	5	57	19

Fonte: Adaptado de Souza e Ripper (1998).

Segundo Krentowski (2021), a integridade estrutural de edificações é preservada quando, ao longo do período de operação previsto, o componente satisfaz os critérios estabelecidos relativos à capacidade de serviço, resistência à carga e estabilidade, sem comprometer seu desempenho.

Dentre as propriedades que mais impactam a durabilidade do concreto, destaca-se a permeabilidade, a qual está diretamente associada à porosidade do material. (METHA E MONTEIRO, 2013).

Conforme Russell e Graybeal (2013), no caso do UHPC, espera-se uma baixa permeabilidade, em razão da elevada densificação da matriz e do empacotamento otimizado de suas partículas, o que favorece um desempenho superior em termos de durabilidade, sobretudo quando comparado a concretos convencionais.

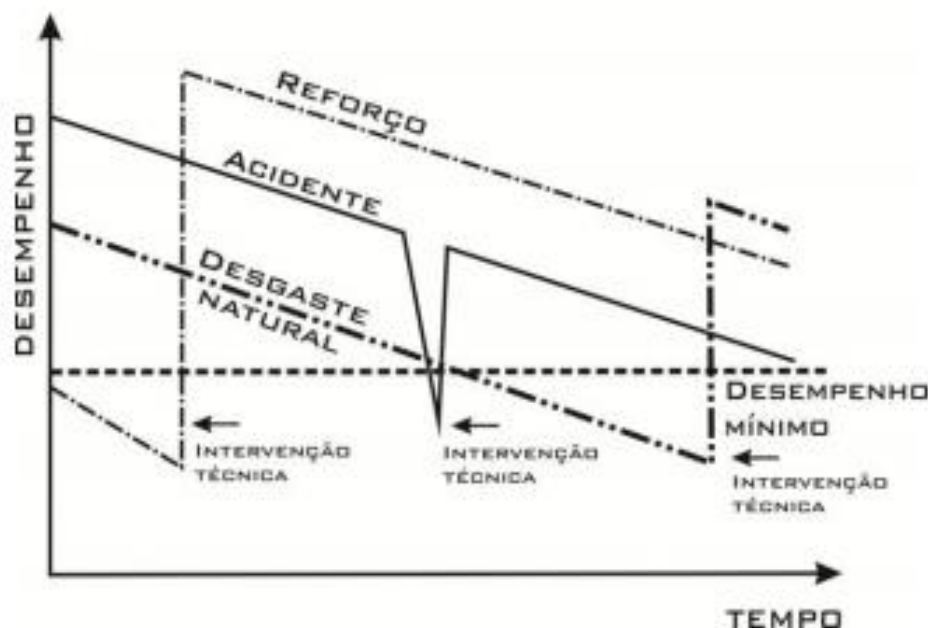
Estudos realizados por Fehling et al. (2004) indicam que o UHPC apresenta uma estrutura de poros capilares significativamente mais refinada em comparação aos concretos convencionais e a concretos de elevado desempenho com agregados graúdos. Essa microestrutura mais densa resulta em menor permeabilidade, fator diretamente relacionado à maior durabilidade do UHPC.

Os mesmos autores citam que, sob a ótica da porosidade, os poros do concreto podem ser classificados em poros capilares e poros de gel. Os poros de gel, por sua vez, possuem dimensões tão reduzidas que impedem a penetração de agentes agressivos, tornando sua influência sobre a durabilidade do material praticamente irrelevante.

2.2 REFORÇO

De acordo com Bolina, Tutikian e Helene (2019), configura-se como uma intervenção cujo propósito é ampliar a resistência e/ou estabilidade de sistemas, constituindo um acréscimo na capacidade de suporte da estrutura (Figura 3). Exemplos de medidas de reforço incluem: a modificação do uso da edificação para acomodar uma carga mais elevada; o acréscimo de pavimentos em uma construção; a introdução de cargas não inicialmente previstas no projeto, como a instalação de uma piscina ou um equipamento de grande porte, entre outras possibilidades.

Figura 3 – Desempenho da estrutura ao longo do tempo, com intervenções pontuais



Fonte: Souza e Ripper (1998).

As estruturas de concreto estão sujeitas à deterioração devido ao envelhecimento, exposição ambiental severa, eventos extremos como terremotos, impactos veiculares e exposição ao fogo, ou devido a alterações nos códigos de projeto ou no uso. A reabilitação de estruturas de concreto danificadas para atender aos requisitos de projeto é considerada uma opção mais prática e econômica do que a demolição e reconstrução. Vários métodos têm sido tradicionalmente utilizados para reparar e fortalecer estruturas de concreto armado, como revestimento com concreto armado, aderência de placas metálicas, com epóxi, protensão externa e aderência externa de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP). (MIRDAN E SALEH, 2022).

Segundo Pereira et al. (2023) e Timerman (2022), para o reforço de um elemento estrutural as técnicas mais difundidas na indústria construtiva são:

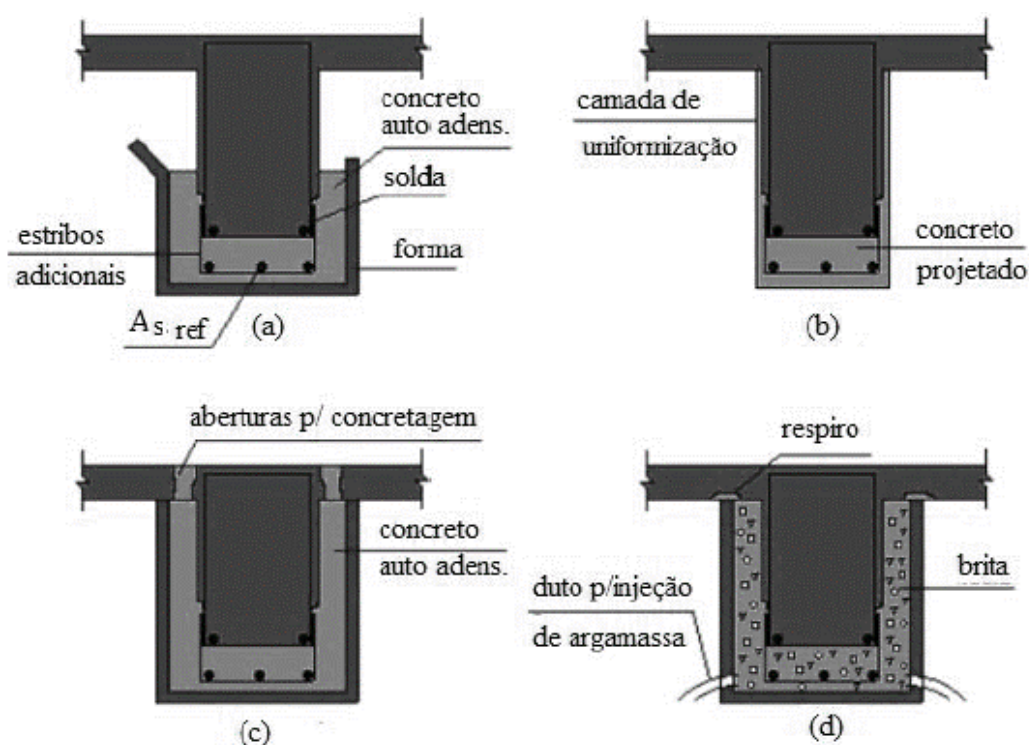
- Aumento da seção transversal com concreto e novas armaduras;
- Colagem de chapas de aço na superfície de concreto;
- Colagem de polímeros reforçados com fibras na superfície de concreto;
- Adição de cordoalhas externas e tracionamento;
- Adição de polímeros reforçados com fibras em entalhes executados na estrutura de concreto;

2.2.1 Aumento da Seção Transversal

A partir da Figura 4 é possível constatar 4 diferentes tipos de reforços com concreto armado, estando a letra “a” representando aquele executado com forma na técnica chamada “cachimbo”, estribos e barras longitudinais adicionais e concreto autoadensável. Já a letra “b” mostra uma camada de uniformização lateral e o preenchimento do vão de reforço com concreto projetado (também utilizando estribos e barras longitudinais adicionais). A letra “c”, por sua vez, utiliza formas até a laje, com abertura de vãos onde o concreto autoadensável será lançado, preenchendo os vãos internos compostos por armaduras adicionais. Por fim, a letra “d” indica um sistema menos usual, com a utilização de respiros superiores entre a forma e a laje, e uma mistura in loco da argamassa injetada com a brita já presente dentro da forma. (LIMA, 2020).

Este sistema, segundo Timerman (2022), é muito utilizado como reforço em elementos com deficiência de inércia ou como reparo daqueles que já possuem perda de seção das armaduras (em processos avançados de corrosão, por exemplo. Atenção especial deve ser dada a esta metodologia, segundo o autor, em virtude do considerável acréscimo de cargas imposto à estrutura.

Figura 4 – Encamisamentos em concreto armado de vigas reforçadas à flexão



Fonte: Lima (2020).

2.2.2 Fixação de Chapas e Perfis Metálicos

A utilização de chapas e perfis metálicos para reforço de elementos estruturais em concreto armado é, segundo Souza e Ripper (1998), uma prática comum e uma solução eficiente, que requer cuidados na concepção e execução. A Figura 5 apresenta dois tipos comuns de reforços metálicos.

Figura 5 – Reforços de vigas à flexão com chumbamento de perfis (à esquerda) e chapas (à direita) metálicas



Fonte: Souza e Ripper (1998).

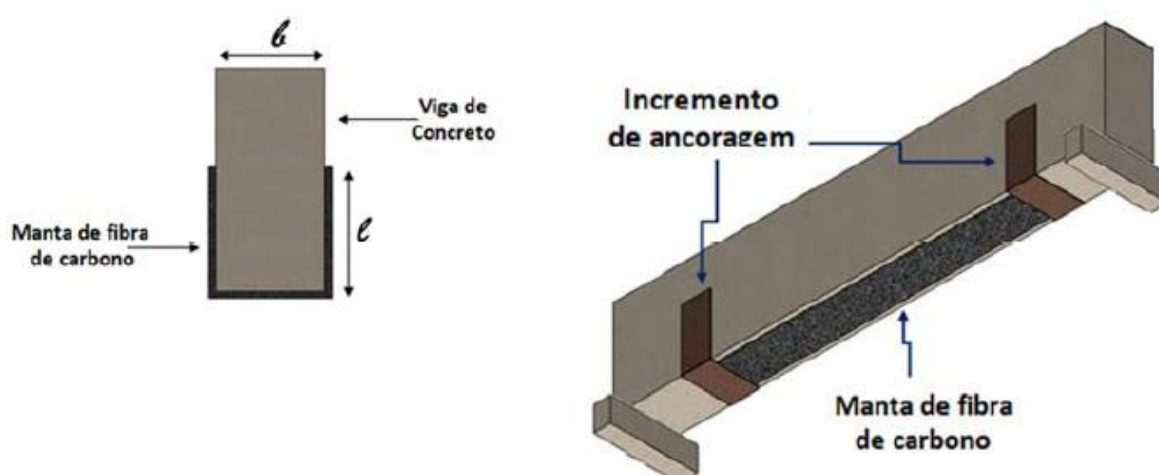
A imagem da esquerda mostra uma viga em concreto armado com reforço lateral em perfis metálicos. Para isso, foi necessária a preparação da superfície do elemento estrutural, bem como a utilização de chumbadores mecânicos e a utilização de resina epóxi. A imagem da direita mostra um processo semelhante, porém neste caso especificamente é utilizada uma chapa metálica na parte inferior do elemento estrutural. (LIMA, 2020; SOUZA E RIPPER, 1998; TIMERMAN, 2022).

Segundo Timerman (2022) os reforços metálicos facilitam a execução em elementos em concreto armado, algo que, até pouco tempo atrás, era um tema complexo e maior dificuldade de execução. Todavia, o autor pontua que o maior perigo deste sistema de reforço está exatamente na sua simplicidade, quando da realização única e exclusivamente com a união entre concreto armado e chapas metálicas utilizando-se resinas epóxi. Não é incomum verificar pequenos construtores ignorando fatores fundamentais que garantiriam a transmissão correta de esforços ao longo do tempo. Não se trata apenas de uma colagem. O autor ainda frisa que é importante o conhecimento em relação às formulações epóxi empregadas, tendo em vista que as de maior rigidez podem ser perigosas para os esforços cortantes nas extremidades das chapas, ao mesmo tempo em que um valor errado do módulo de rigidez transversal fará com que a chapa deixe de trabalhar logo após a sua colocação.

2.2.3 Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras

Reforçar elementos em concreto armado com materiais poliméricos reforçados com fibras tem sido uma atividade rápida e eficaz para garantir segurança estrutural. A Figura 6 mostra um detalhe típico do reforço de viga com a utilização de manta de fibra de carbono, neste caso uma viga biapoiada reforçada na região tracionada. A fixação deste tipo de manta é realizada com a utilização de resinas, porém, como mostra a imagem, em casos específicos deverão ser realizados incrementos de ancoragem. (LIMA, 2020).

Figura 6 – Reforços em manta de fibra de carbono



Fonte: Lima (2020).

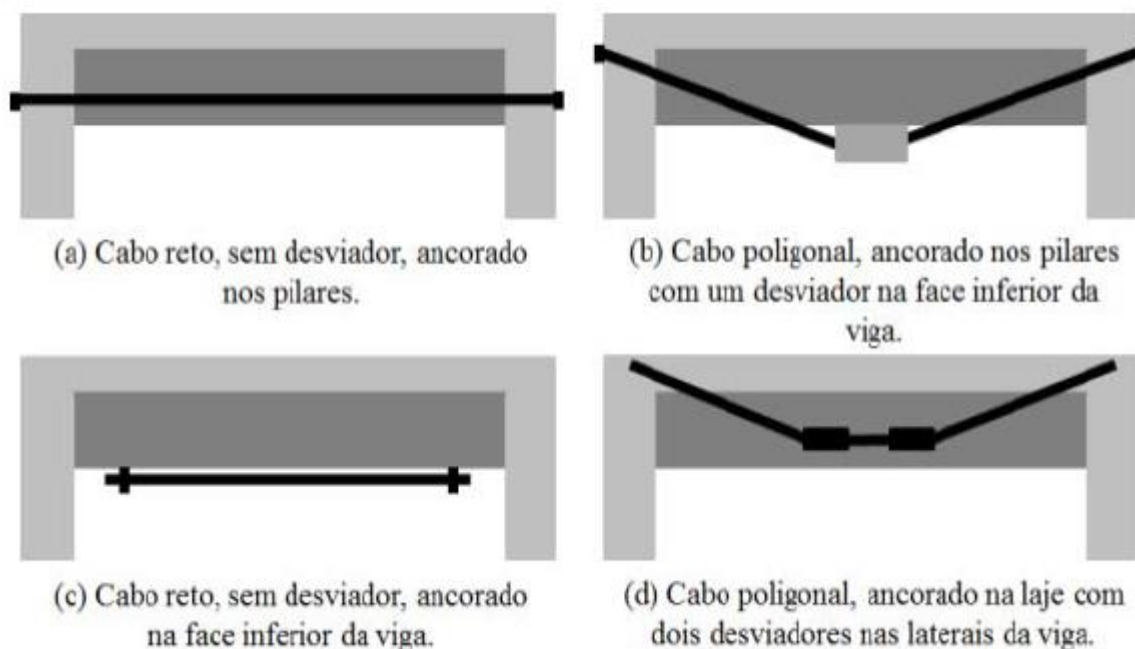
Timerman (2022) indica que o sistema de reforços com polímeros reforçados com fibras, seja na forma de manta, lâmina ou tecido, tem como principal foco de utilização elementos estruturais que precisam de acréscimo de resistência à tração, apresentando na leveza e velocidade de aplicação as maiores vantagens em relação aos elementos metálicos de reforço.

Entretanto, segundo o autor, por utilizar resinas geralmente de base epoxídica em sua aplicação, o sistema com PRF possui como pontos críticos a aderência dos compósitos à superfície de concreto, para a correta distribuição de tensões entre o elemento estrutural e o sistema de reforço, e a durabilidade das resinas em ambientes agressivos, como em locais expostos a raios ultravioletas ou agentes químicos bem como a ações acidentais, como incêndios.

2.2.4 Adição de Cordoalhas Externas e Tractionamento

Cada vez mais utilizada em estruturas novas para o aumento de vãos livres e a diminuição de seção de elementos estruturais, a protensão é uma solução eficaz também para reforço estrutural, com diferentes tipos de cabos e métodos de ancoragem, submetendo vigas, por exemplo, a uma compressão posterior que diminui seus deslocamentos em virtude de esforços de tração. A Figura 7 mostra quatro opções de reforços utilizando a técnica da protensão.

Figura 7 – Reforços com a utilização de cabos de protensão



Fonte: Lima (2020).

Em muitas ocasiões, como quando se chega a uma constatação de elevada deformação de elementos horizontais, como vigas, a técnica da protensão externa se mostra a mais eficaz entre as opções existentes. Outra vantagem proporcionada pelo uso de protensão no reforço de estruturas é a geração de forças que garantem o equilíbrio e a resistência da estrutura, sem que estas precisem se deformar sob a ação de solicitações externas. Esta é a principal diferença em relação a outras técnicas de reforço, nas quais o novo material adicionado para aumentar a resistência, embora possa garantir estabilidade, pode não ser eficaz a menos que ocorra novas

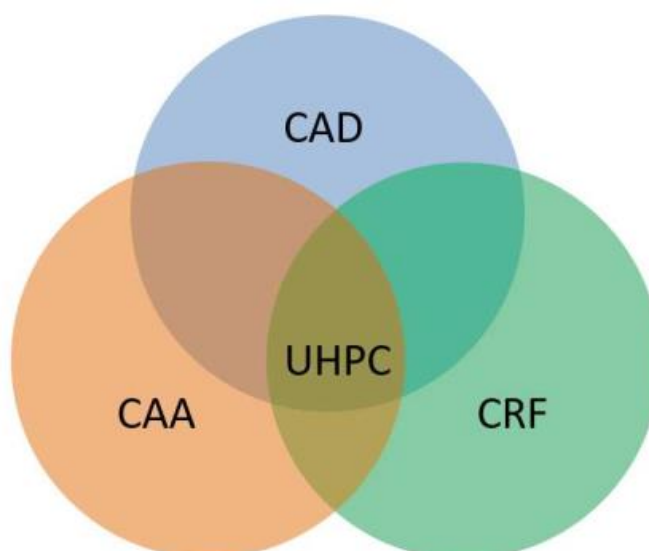
deformações no conjunto. Isso, em certas ocasiões, pode resultar na inutilização do elemento para fins funcionais. (TIMERMAN, 2022).

Segundo Timerman (2022) antes da proposição do sistema de reforço e de sua implementação, é fundamental analisar o tipo de problema que se manifesta nos elementos estruturais, entre outros motivos, com baixa taxa de armaduras, esmagamentos e falta de inércia da seção. Segundo o autor, é importante avaliar, também, o espaço disponível para execução do reforço, de forma a impactar o menos possível a arquitetura. Da mesma forma, questões como exposição e aumento de cargas devem ser considerados até mesmo no custo global, tendo em vista que alguns sistemas de reforços demandarão proteção e maior resistência dos elementos estruturais inferiores.

2.3 ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC)

O *Ultra-High Performance Concrete* (UHPC) é um material que alia as melhores propriedades de diferentes tipos de concreto, como o autoadensável (CAA), concreto reforçado com fibras (CRF) e o concreto de alto desempenho (CAD), conforme apresentado na Figura 8. (CHRIST; TUTIKIAN; HELENE, 2022).

Figura 8 – O UHPC como resultante de propriedades de CRF, CAD E CAA



Fonte: Torregrosa (2013, p. 31).

Segundo Aïtcin (2008), o conceito de UHPC se baseia em três princípios básicos:

- Aumento da homogeneidade do material pela eliminação das partículas grossas, limitação da quantidade de areia para prevenir que entrem em contato entre si na pasta endurecida, melhoria das propriedades mecânicas da pasta de cimento hidratada e eliminação da zona de transição nas interfaces pasta/agregados;
- Aumento da compacidade pela otimização das dimensões dos grãos dos pós da mistura e, quando possível, pela compressão exercida durante o endurecimento;
- Refinamento da microestrutura da pasta hidratada por tratamento de calor.

Sob a ótica de Pokorny et al. (2020), o melhor desempenho mecânico do UHPC em relação aos demais concretos se dá, principalmente, em virtude da diminuição da porosidade e do elevado grau de homogeneidade, podendo alcançar resistências superiores a 800 MPa.

O UHPC apresenta diversas vantagens. Além de reduzir o tempo necessário para a construção, ele consome menos materiais, proporciona maior flexibilidade no design interno, reforça a durabilidade e resistência da estrutura e contribui para a sustentabilidade, minimizando seu impacto ambiental. (PCI, 2023).

Tendo em vista que, segundo Pereira e Helene (2007) o conceito de vida útil está atrelado ao sistema estrutural de uma construção e que ao término da vida útil da estrutura está findada a vida útil da edificação, é fundamental que se utilize, conforme Neville (2013), elementos em concreto com baixa permeabilidade e elevada durabilidade, de forma a garantir um melhor desempenho às edificações por um maior período. Neste sentido, o UHPC se mostra a melhor opção em termos de concreto, devido às características que serão apresentadas a seguir.

2.3.1 Principais Características do UHPC

Segundo Christ (2019) o empacotamento dos constituintes do concreto é o fator fundamental para a resistência e durabilidade do compósito. Sendo assim, é indispensável a escolha correta dos materiais, de acordo com suas propriedades e granulometrias.

Segundo Silva (2022), os três fatores que mais limitam a utilização do UHPC são: seu elevado custo; falta de conhecimento técnico acerca do material; maior

necessidade de controle de qualidade na produção (por conta disso sendo mais indicado para elementos pré-moldados). Em relação ao valor do material, Fávero (2016), relatou, após realizar pesquisa de âmbito nacional, que o custo de obtenção do UHPC é até 8,5 vezes superior ao custo de obtenção do concreto Convencional, sendo 55% deste valor correspondente à adição de fibras metálicas (3% em volume).

Em relação ao método executivo, o UHPC é um material voltado para a produção em indústria, diferentemente do concreto convencional, produzido em canteiros de obra, tendo em vista a necessidade da dosagem adequada de cada material constituinte da mistura, da produção em betoneira específica e do custo elevado do material, não permitindo erros de traço ou perdas na produção. Assim sendo, o UHPC se configura como sendo um material não indicado para estruturas moldadas *in loco*, mas sim para elementos estruturais pré-fabricados (CHRIST; TUTIKIAN; PACHECO, 2011).

2.3.2 Composição do UHPC

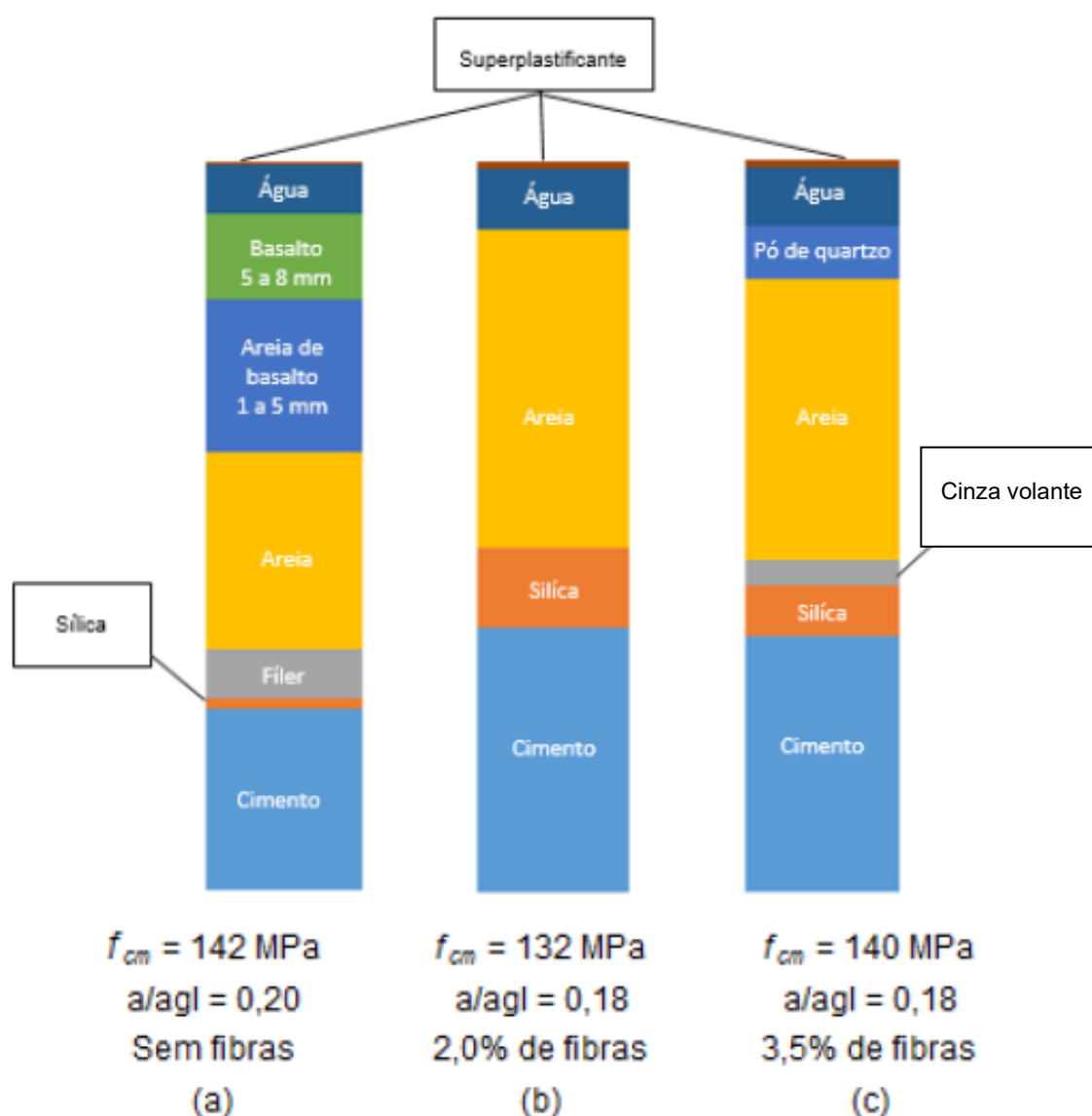
Segundo Silva (2022) os materiais granulares mais utilizados no *Ultra-High Performance Concrete* (Figura 9) são o cimento, a areia (único agregado, tendo em vista a não utilização de agregado graúdo devido ao seu formato irregular) e componentes pulverulentos (como sílica ativa, pó de quartzo e cinza volante, resultando em maior empacotamento da mistura). Ainda fazem parte da composição tipicamente utilizada do UHPC a água, as fibras e o aditivo superplastificante.

Segundo Graybeal (2005) apud. Tayeh et al. (2013), as propriedades do UHPC são derivadas da melhor homogeneidade da mistura em comparação com o concreto convencional, devido à ausência de agregados graúdos. Na mistura, a areia fina é o maior material granular, com tamanho variando de 150 μm a 600 μm . O cimento é a segunda maior partícula, com um diâmetro médio de 15 μm . A sílica ativa, que é aproximadamente cem vezes menor que uma partícula de cimento, também é utilizada no UHPC. Além disso, o pó de quartzo, com um diâmetro médio de 10 μm , constitui outra partícula fina. As fibras de aço representam os maiores componentes dimensionais na composição.

O consumo de cimento, cuja redução é tão almejada atualmente, principalmente em virtude de impactos ambientais em sua produção, pode ser reduzido com o uso de adições minerais, melhorando a durabilidade dos elementos

estruturais, sem afetar em desempenho mecânico. Para que isto ocorra, essas adições devem possuir alguma forma de sílica reativa, para que, na presença de água, reajam com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) livre da hidratação do cimento, para formar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que contribui com a resistência da pasta. Essas adições são conhecidas também como materiais pozolânicos. Dentre as vantagens de sua utilização, está a redução da permeabilidade do concreto, melhor empacotamento do compósito, aumento da resistência mecânica, inibição ou redução da reação álcali-agregado e diminuição do calor de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 9 – Comparação entre as composições de UHPC: (a) Li et al. (2018); (b) Liu et al. (2020); (c) Zhu et al. (2020)



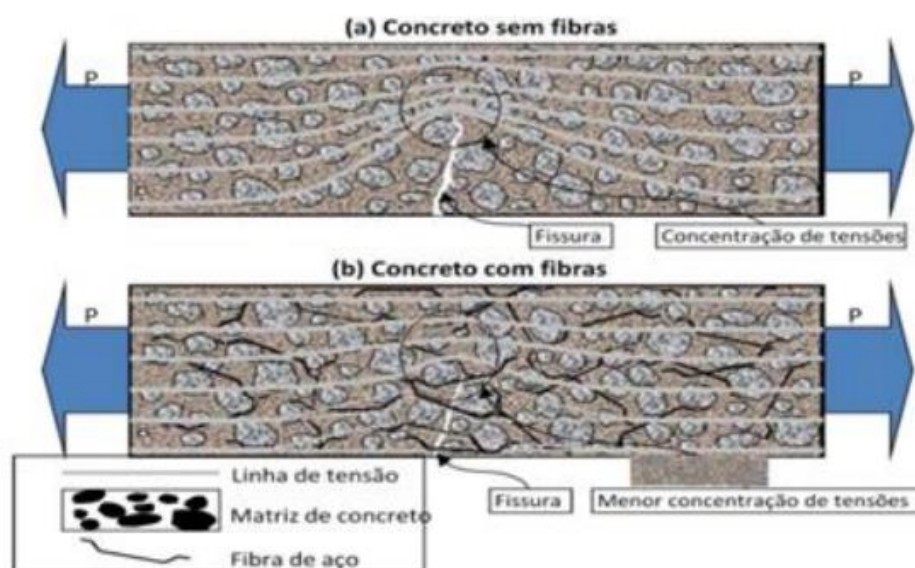
Fonte: MAIA (2021).

2.3.2.1 Fibras

Segundo Kodsy e Morcous (2022) as elevadas características mecânicas do UHPC possuem relação com a utilização de fibras na mistura, as quais auxiliam os elementos estruturais no empacotamento granular do compósito, bem como em sua durabilidade (a partir da não formação de vazios) e em sua resistência à compressão, tração e fissuração, devido ao seu ótimo módulo de elasticidade.

Ao incorporar fibras na composição do concreto, elas desempenham um papel crucial ao funcionar como um mecanismo de transferência para as tensões concentradas nas extremidades das fissuras (Figura 10). A distribuição mais eficiente dessas tensões resulta em uma propagação mais controlada das fissuras, conferindo ao concreto uma resistência à ruptura menos frágil. Isso se traduz em um aumento na capacidade de resistência do material, tanto em termos de tração quanto de flexão, além de proporcionar uma maior resistência a agentes agressivos, conforme destacado por Quinino (2015), Casagrande (2017), Kang e Kim (2012), e Oliveira (2019). Além da transferência de tensões, as fibras também retardam a propagação das fissuras e contribuem para a dissipação de energia de fratura através do descolamento entre as fibras e a matriz, como discutido por Bentur e Mindess (2007).

Figura 10 – O papel das fibras na distribuição de tensões e combate à fissuração

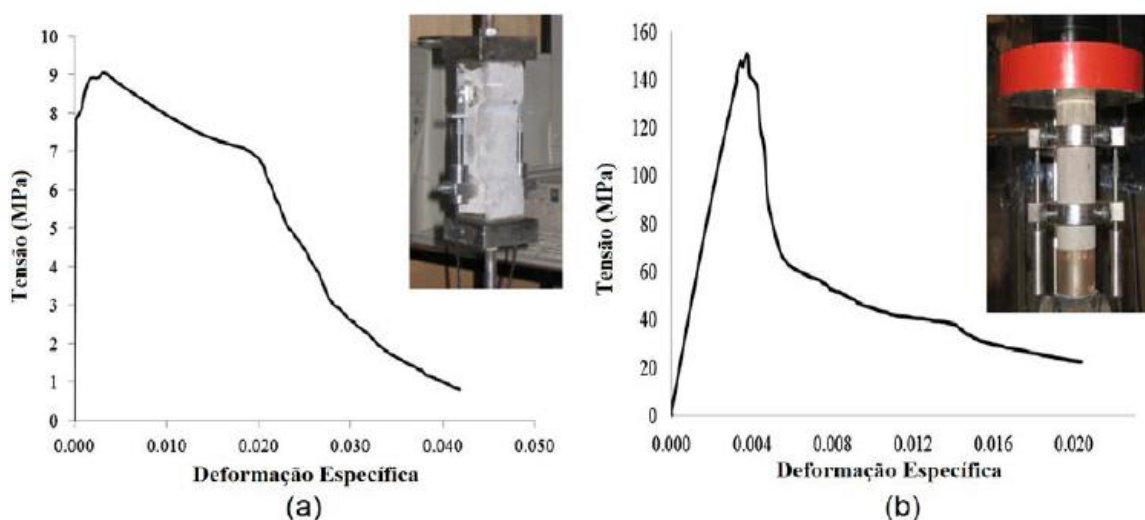


Fonte: Figueiredo (2000).

A presença de fibras no UHPC possui grande importância no seu comportamento, a tal ponto que a parte 1 da prática recomendada o denominasse “concreto de ultra-alta resistência com fibras”. O UHPC ainda possui nomenclatura relacionada ao tipo de fibra utilizado, sendo chamado de tipo M, quando da utilização de fibras metálicas e de tipo A, quando da não utilização de fibras de aço (predominando, neste caso, as orgânicas).

Segundo Casagrande (2017), as fibras geralmente utilizadas na produção do UHPC são metálicas, curtas e com revestimento de cobre, de diâmetro 0,2 mm e comprimento de 13 mm. Essas fibras possuem resistência à tração próxima a 2500 MPa e 200 GPa de módulo de elasticidade, garantindo boa efetividade nos mecanismos de transferências de tensões, acarretando curvas tensão-deformação na tração e compressão, como pode ser verificado na Figura 11.

Figura 11 – Curvas tensão-deformação na tração (a) e compressão (b) do UHPC

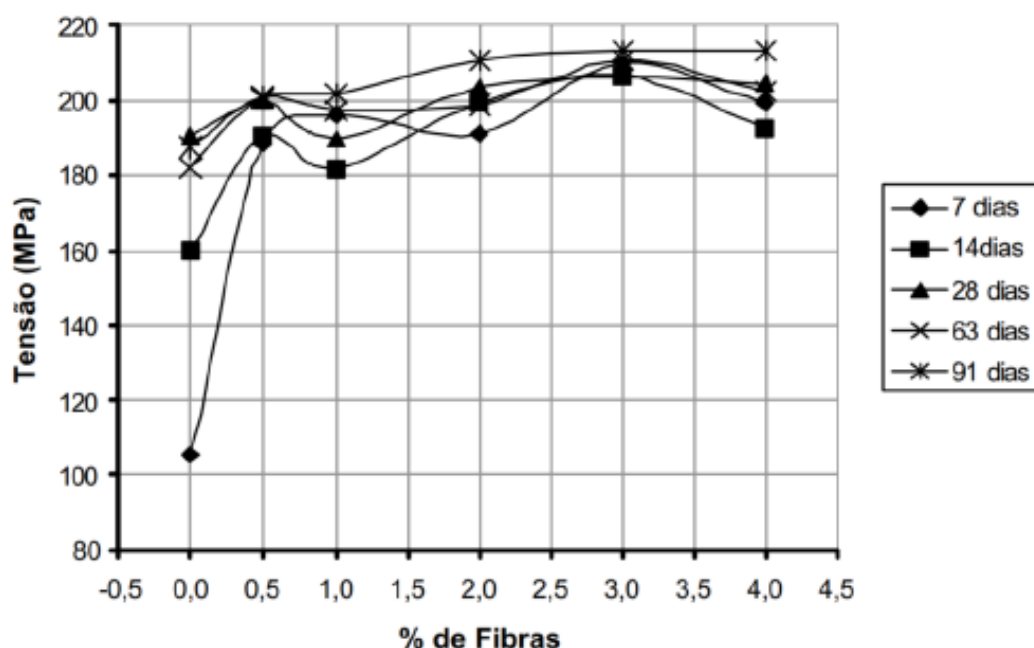


Fonte: Mahmud et al. (2013).

Quando as fibras são adicionadas em excesso, ocorre o agrupamento, resultando na perda de eficiência devido a uma maior interação entre elas. Em geral, a taxa de adição varia de 2% a 2,5%, proporcionando um bom comportamento tanto no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto (ALEXANDER; BENTUR; MINDESS, 2007; OLIVEIRA, 2019; YOO et al., 2014).

Vanderlei (2004) destaca que a adição de fibras no UHPC apresenta resultados positivos até a taxa de 3%, a partir da qual ocorre uma diminuição na eficiência (Figura 12). Este é o percentual utilizado no estudo de Said et al. (2022).

Figura 12 – Variação da resistência do concreto com diferentes teores de adição de fibras metálicas em diferentes idades



Fonte: Vanderlei (2004).

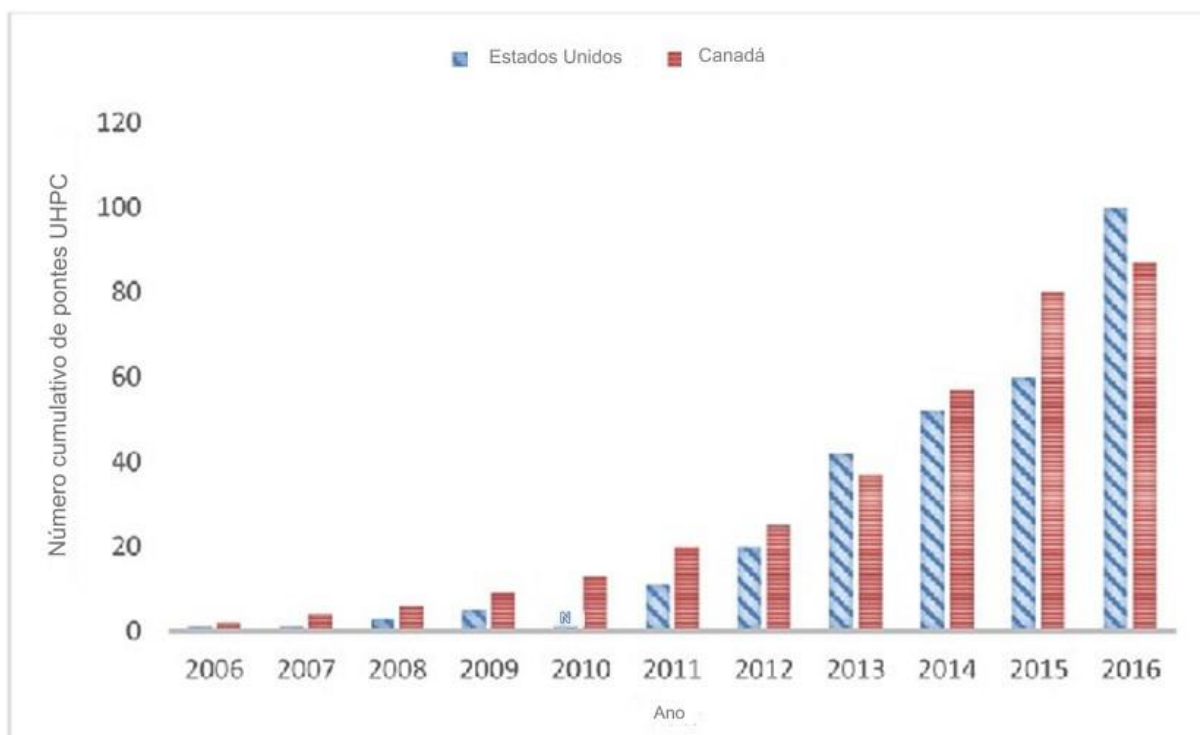
2.3.3 Aplicação do UHPC

Além da passarela construída na cidade de Sherbrooke, no Canadá, em 1997, o UHPC já foi utilizado, segundo Silva (2022), centenas de vezes, em elementos estruturais e decorativos. Segundo o autor, a primeira utilização no Brasil é datada de 2017, na execução de elementos decorativos na fachada de edificação na cidade de São Paulo.

Conforme mostra a Figura 13, verifica-se um aumento considerável no número de pontes projetadas utilizando UHPC como estrutura principal nos EUA e no Canadá. Na relação a seguir estão algumas das obras mais relevantes executadas com o material.

- Passarela de pedestres em Seonyu, Coréia do Sul (2002);
- Tabuleiro da ponte em Kassel, Alemanha (2004);
- Ponte em Volkermarkt, Áustria (2010);
- Museu das civilizações mediterrâneas, Marseille, França (2013);
- Ponte do aeroporto de Tóquio (2014), com elementos protendidos.

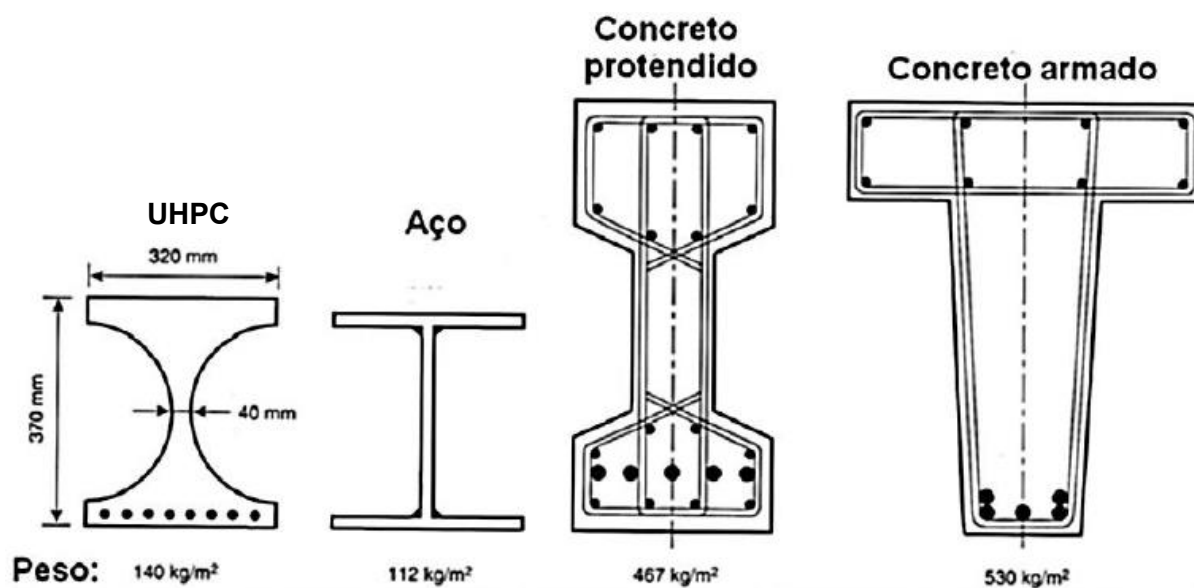
Figura 13 – Número de pontes projetadas em UHPC nos EUA e no Canadá



Fonte: Akhnouk e Buckhalter (2021).

A Figura 14 mostra a seção transversal e o peso por metro quadrado de vigas de diferentes materiais e composições, dimensionadas para um mesmo carregamento.

Figura 14 – Seções de vigas de UHPC, aço, concreto protendido e concreto armado com mesma capacidade de carga e grande diferença de peso por elemento



Fonte: Adaptado de Van Damme (2018).

Esta imagem evidencia que a utilização do UHPC representa, dentre as opções que utilizam concreto, uma solução com menor consumo de materiais e seções mais racionalizadas, que conseqüentemente afetam no impacto arquitetônico, no peso total da estrutura e no dimensionamento de suas fundações.

O UHPC, quando submetido a um carregamento, apresenta comportamento superior aos demais tipos de concreto, devido à grande quantidade de pequenas fibras presente na mistura e às dimensões dos demais constituintes, que garante ao compósito um maior empacotamento. (KHAN; ABBAS; FARES, 2017).

Elementos estruturais estão submetidos a diversos esforços, como o cisalhamento. Vigas e lajes apresentam diferentes princípios quanto a estes esforços, devido, principalmente, às variações das dimensões. Estudos desenvolvidos na Universidade de Kassel, na Alemanha evidenciaram que o cisalhamento é um dos pontos fracos quando os elementos projetados possuem apenas armadura passiva longitudinal (FEHLING et al., 2014).

Fica evidente que o UHPC apresenta ótimas características, as quais justificam sua utilização em estruturas. Todavia, para que seja implementado em maior escala e de maneira que justifique sua escolha, os projetos estruturais devem ser elaborados de forma a extrair ao máximo suas propriedades mecânicas em seções reduzidas, acarretando menor uso de material, conseqüentemente resultando em elementos estruturais menos onerosos e de menor impacto ambiental. Projetistas de estruturas devem, desta forma, entender o comportamento, a composição e as características do material. Apenas desta forma poderá se extrair ao máximo as excelentes propriedades do compósito, garantindo sustentabilidade.

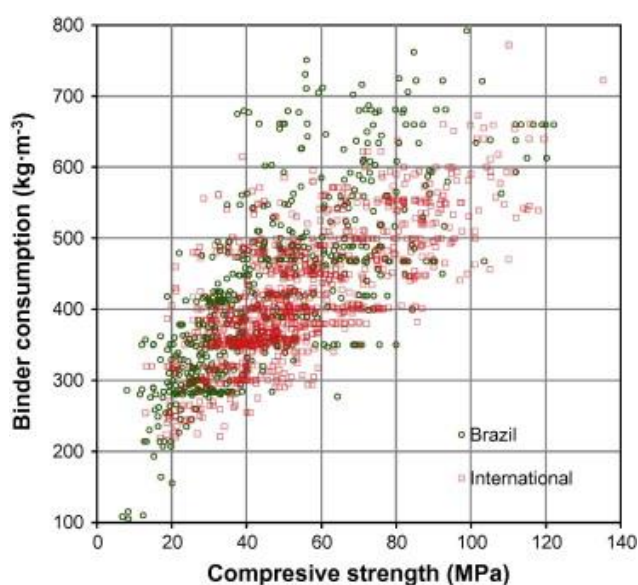
2.3.4 Sustentabilidade

São diversas as pesquisas que visam reduzir os impactos ambientais do UHPC, como as desenvolvidas por Wang et al. (2021), Salahaddin, Haido e Wardeh (2022) e Agüero et al. (2019), principalmente em termos de diminuição do consumo de cimento, material cuja produção é responsável por cerca de 7% do total de CO₂ emitido no mundo, em um setor já responsável pela emissão de um terço do total de gás carbônico para a atmosfera.

Damineli et al. (2010), por meio da análise de 604 estudos realizados no Brasil e 981 estudos realizados no resto do mundo, indicam que para se atingir maiores

resistências em concretos, há a necessidade de maior consumo de aglomerantes (principalmente de cimento), podendo chegar, conforme indica a Figura 15, a 700 kg/m³. Porém, é fundamental apontar que isso não é uma regra, tendo em vista que diversos trabalhos já realizados mostram que, a partir da utilização de materiais de menor impacto ambiental (como pozolanas e materiais cimentícios suplementares), consegue-se reduzir o uso de cimento, mantendo-se desempenho. Christ (2014) mostra que é possível produzir UHPC com consumos de cimento inferiores a 300 kgf/m³.

Figura 15 – Resistência à compressão vs. consumo de aglomerantes

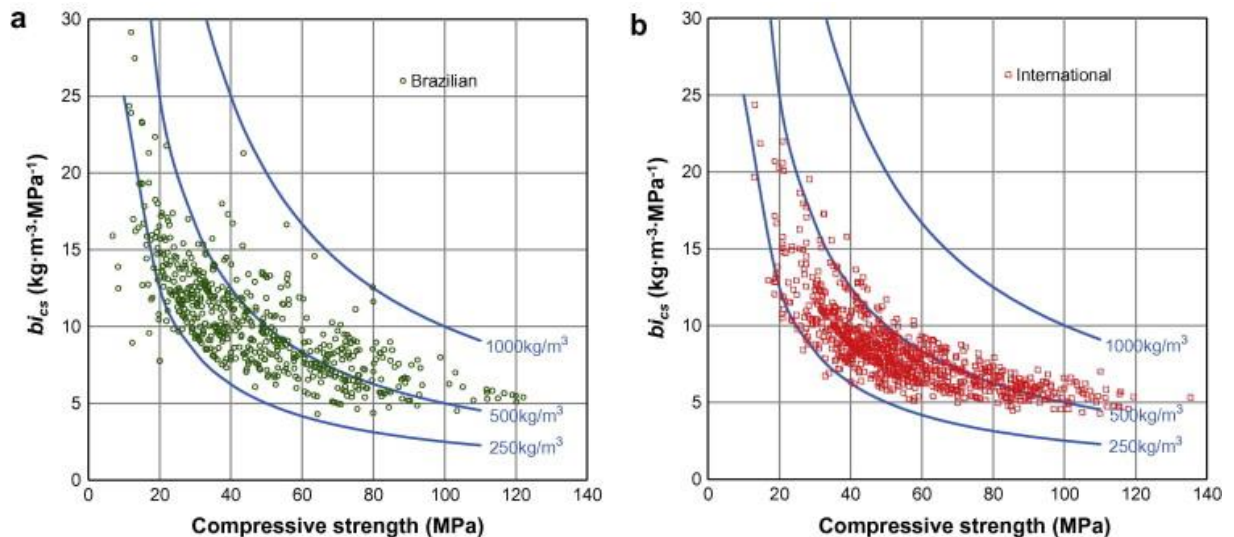


Fonte: Damineli et al. (2010).

Mesmo que haja uma tendência a consumos superiores de cimento em UHPC, Damineli et al. (2010) apontam, mediante a análise da Figura 16, que a relação de aglomerantes por resistência é mais baixa quanto maiores forem as resistências à compressão aos 28 dias. Ou seja, concretos com mais de 60 MPa aos 28 dias necessitam de cerca de 5 kg de cimento por m³ para cada MPa de resistência à compressão e concretos com menores resistências e mesma idade apresentaram índices significativamente superiores, da ordem de 13 kg de cimento por m³ para cada MPa de resistência à compressão. E ainda deve-se levar em consideração que, ao atingir maiores resistências, elementos estruturais em UHPC, como indicam Agüero et. al. (2019), irão apresentar seções menores do que as de elementos em concreto

convencional em cerca de um terço do volume, acarretando um consumo menor de concreto e aço.

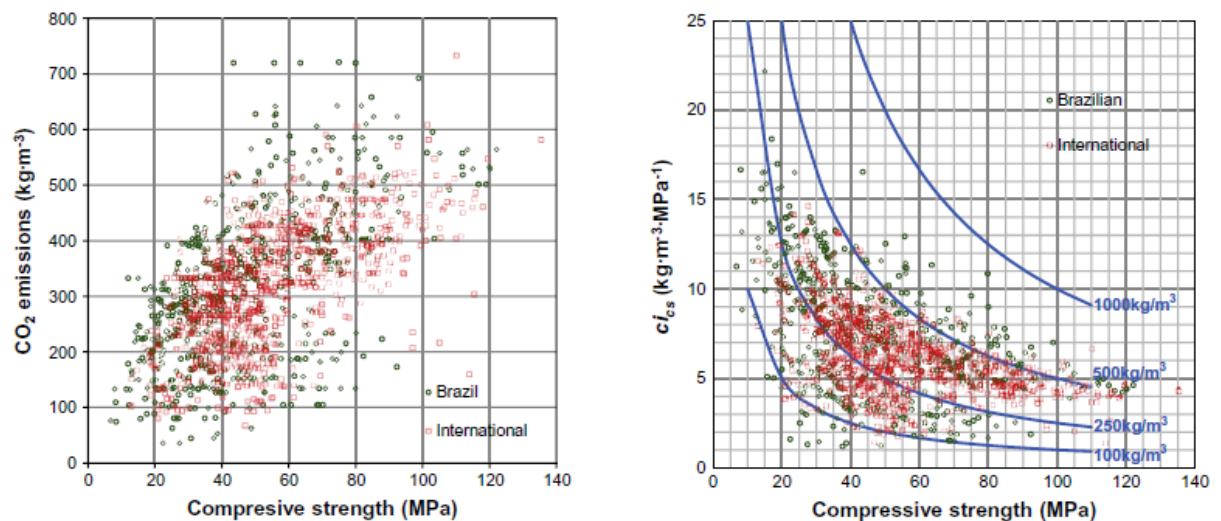
Figura 16 – Intensidade de aglomerantes (bi_{cs}) vs. resistência à compressão aos 28d



Fonte: Damineli et al. (2010).

Segundo Damineli et al. (2010), o comportamento das emissões de CO₂ acompanha o comportamento apresentado nas Figuras 15 e 16. A Figura 17 mostra que a intensidade de emissões de CO₂ tende a ser maior para concretos que apresentam maiores resistências, porém, quando se analisa a emissão de CO₂ em relação à resistência obtida por estes materiais, verifica-se valores menores quanto maiores forem as resistências.

Figura 17 – Emissão estimada de CO₂ vs. resistência à compressão aos 28d



Fonte: Damineli et al. (2010).

A mesma conclusão foi obtida por Sumitomo, Pimentel e Jacintho (2021) em seu estudo a respeito da emissão de energia e emissão de CO₂ em comparação com a resistência de concretos com diferentes resistências aos 28 dias (Tabela 8).

Tabela 8 – Relação entre energia gerada, emissão de CO₂ e resistência à compressão de CC e UHPC

Tipo de concreto	Classe	Resistência à compressão (MPa)	kgCO₂ eq. / MPa	MJ/ MPa
Concreto convencional (CC)	C20	29	11,0701	32,1081
	C50	48	9,0576	26,6306
	C65	65	7,342	23,0418
UHPC	C120	121	4,3152	12,0800
	C150	155	5,7887	13,7732
	C200	205	5,1264	16,5597

Fonte: Adaptado de Sumitomo, Pimentel e Jacintho (2021).

É possível verificar que a taxa de emissão de CO₂ em relação à resistência obtida pelo material é significativamente menor, comprovando que concretos que possuam maior resistência geram menor impacto ao meio ambiente, mesmo que demandem maior consumo de cimento. Esta teoria logicamente necessita de projetos estruturais que levem em consideração, também, que o aumento da resistência do elemento, resultará em diminuição de seções e, conseqüentemente, em menores volumes de concreto.

É possível concluir que a utilização do UHPC como reforço não apenas se torna interessante em termos mecânicos, mas também em relação à sustentabilidade. Ao utilizar um material com tamanha resistência, se possibilita a execução de chapas esbeltas com pouquíssimo consumo de cimento se comparado ao acréscimo de durabilidade que propiciará ao elemento estrutural reforçado. Isso é confirmado em estudo realizado por Brühwiler (2024), que ressalta que a grande vantagem do UHPC em termos de impactos ambientais se dá devido ao menor uso de recursos em termos de materiais, emissões de gases de efeito estufa e energia. Sendo assim, considera-se necessário abordar o UHPC como reforço de estruturas.

2.3.5 UHPC como Reforço

Comparativamente ao concreto convencional, as propriedades mecânicas do UHPC são consequência da reduzida relação água-cimento, do empacotamento dos constituintes e da presença de fibras internas descontínuas. Devido às suas propriedades reológicas, o UHPC possibilita o projeto e a construção de formas restritas e geometrias complexas comumente encontradas em aplicações de reforço. Tais vantagens do UHPC também se estendem a aplicações de remediação em elementos estruturais, proporcionando uma camada protetora externa contra influências ambientais severas. Além de mitigar os efeitos de ambientes agressivos, o UHPC também pode contribuir para a redução das tensões de impacto resultantes de carregamentos extremos e contínuos. (KHODAYARI et al., 2023).

Segundo Huang et al. (2022), ao se empregar finas camadas de UHPC para reforçar vigas de concreto armado, observou-se um aumento na carga última de 35%, apresentando deslocamento de até 26,8 mm, com adição de 2% de fibra de aço.

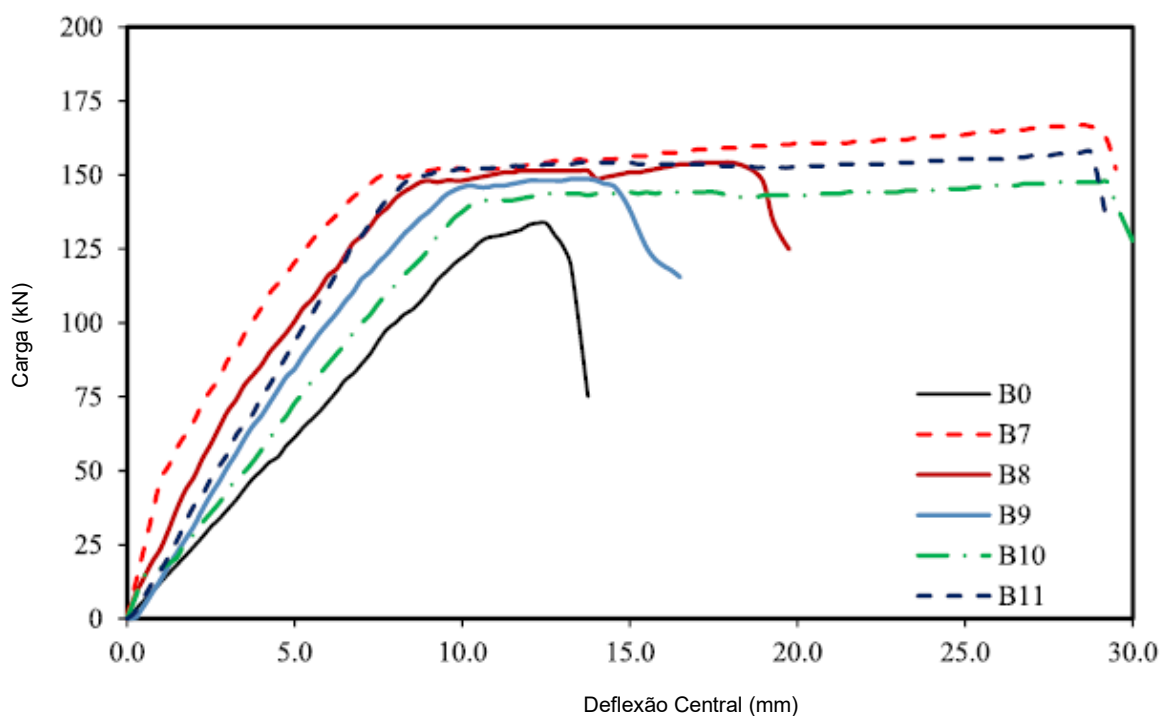
Mazer et al. (2021) realizaram ensaios de flexão de 4 pontos em exemplares reduzidos de vigas de concreto armado reforçadas com camada de UHPC aplicada diretamente sobre o elemento, realizando o ensaio tanto na região comprimida, quanto na região tracionada. O resultado em ambas as situações foi semelhante, atingindo carga última 40% superior à atingida pelas vigas de referência.

Entre as questões que devem ser verificadas está o tamanho do reforço e sua posição. Said et al. (2022) indicam em seu estudo sobre reforços ao cisalhamento em vigas, que reforçar toda a extensão da viga proporciona uma melhora mais significativa em seu comportamento do que reforçar apenas um terço. No entanto, reforçar um terço do comprimento da viga ainda resulta em um comportamento superior, em comparação com a viga referência, sem reforço. Além disso, o reforço com chapas inclinadas, em direção perpendicular às fissuras esperadas de cisalhamento, aprimora o comportamento das vigas frente à esta deformação.

A Figura 18 mostra um gráfico de Said et al. (2022). Os autores fizeram uma análise da relação tensão-deformação de vigas reforçadas com UHPC ao cisalhamento, sendo os reforços executados ou por meio de concretagem direta na viga (como os reforços usualmente executados em concreto armado) ou por ancoragem mecânica de chapas de UHPC pré-fabricadas.

O gráfico ilustra a relação entre carga e deslocamento para as amostras B0, B7, B8, B9, B10 e B11. A análise desse gráfico permite constatar que o uso do *Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete* (UHPC) como técnica de reforço melhora significativamente o comportamento estrutural das vigas quando comparado à viga controle (B0), que não recebeu reforço adicional.

Figura 18 – Relação tensão-deformação de vigas de concreto reforçadas com UHPC



Fonte: Said et al. (2022).

Sendo que:

- B0: Viga de referência (sem reforço);
- B7: Viga reforçada com aumento de seção concretado diretamente nos terços finais, em ambos os lados;
- B8: Viga reforçada com chapa de UHPC ancorada ao longo de toda a face lateral, em ambos os lados;
- B9: Técnica semelhante à B7, porém com reforço aplicado externamente (por meio de chapas de UHPC ancoradas à viga)
- B10: Viga reforçada com 8 chapas de UHPC ancoradas no sentido vertical, ao longo de toda a viga, em ambos os lados, simulando a posição de estribos;

- B11: Viga reforçada com 8 chapas de UHPC ancoradas a 45°, ao longo de toda a viga, em ambos os lados, simulando a posição de estribos.

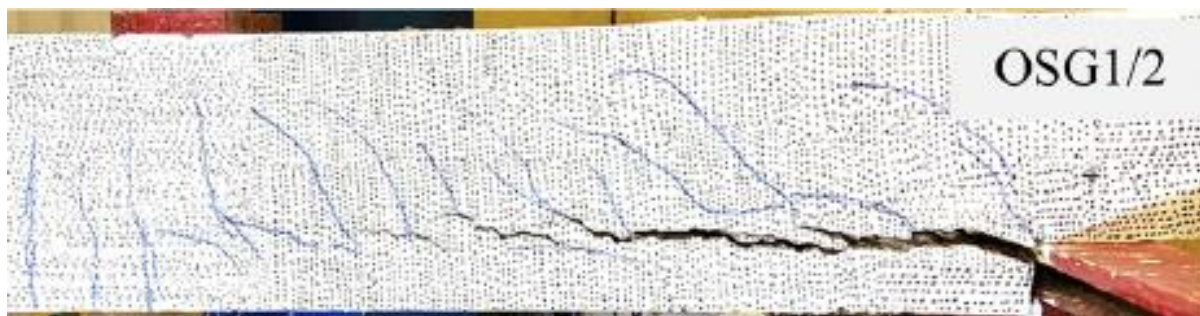
A viga referência apresentou um comportamento típico de uma viga de concreto armado sem reforço adicional, atingindo a carga última com menor resistência e ductilidade. Em contraste, as vigas que receberam reforço com UHPC demonstram um desempenho aprimorado em diversos aspectos, principalmente em termos de resistência última, ductilidade e absorção de energia.

Entre as diferentes estratégias de reforço analisadas, destaca-se a aplicação de tiras verticais e inclinadas, utilizadas nas vigas B10 e B11. Essas configurações de reforço apresentaram um comportamento mais eficiente, uma vez que a aplicação de tiras inclinadas (B11) permitiu um melhor aproveitamento da resistência do material ao atuar perpendicularmente às fissuras de cisalhamento esperadas.

Além disso, a análise da rigidez inicial revela que as vigas reforçadas apresentaram maior resistência às deformações iniciais. Em particular, as vigas B10 e B11 tiveram um incremento de 1,58 e 1,53 vezes na rigidez inicial, respectivamente, quando comparadas à viga referência. Esse fator é relevante, pois demonstra que o reforço aplicado não apenas melhora a capacidade resistente da viga, mas também reduz a deformação sob cargas iniciais, contribuindo para uma melhor eficiência estrutural.

Mirdan e Saleh (2022) realizaram ensaios de flexão em 4 pontos em vigas de concreto armado reforçadas à tração com camada de UHPC armada e não-armada. Conforme apresentado na Figura 19, os autores constatarem problemas na fixação entre os reforços e os elementos reforçados, mesmo que tivessem aplicado adesivo epóxi antes da execução da camada de UHPC.

Figura 19 – Falha na fixação entre viga de concreto armado e camada de reforço



Fonte: Mirdan e Saleh (2022).

Tanto Mirdan e Saleh (2022) em seus ensaios de flexão quanto Zhou et al. (2023), em seus ensaios à torção, concluíram que a execução de reforços em UHPC é eficaz principalmente no estado limite de serviço, devido ao atraso na propagação de fissuras, e que a execução de camada de reforço armada é uma alternativa interessante para acréscimo de resistência ao sistema, principalmente por garantir uma proteção à armadura com baixo cobrimento. Por fim, uma observação realizada pelos autores foi de que há a necessidade de se utilizar ancoragem mecânica do reforço, tendo em vista que a ancoragem química, para o que se propuseram ambas as pesquisas, foi insuficiente.

3 METODOLOGIA

Este trabalho contempla um vasto programa experimental que envolveu diversos materiais e métodos, desde a fase de concepção dos elementos, passando por sua dosagem, execução e fixação, até os ensaios e análise de resultados. Os processos foram divididos nas etapas apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Etapas e processos desenvolvidos previamente aos ensaios

Etapas	Descrição dos processos
01	Definição das características das vigas (seção, resistência e armação)
02	Definição das características dos reforços (seção, resistência e armação)
03	Obtenção dos materiais para a execução dos reforços, com ajuda de parceiros
04	Ensaio granulométrico de sílica, areia, cimento e cinza volante
05	Definição de 03 traços de UHPC para teste, a partir dos resultados acima
06	Testes em laboratório para definir o traço a ser utilizado
07	Execução das formas e armações das vigas de concreto armado
08	Concretagem e cura das vigas de concreto armado
09	Montagem das formas das chapas de UHPC, após definição do traço
10	Concretagem das 09 chapas de UHPC
11	Desforma das chapas e realização de cura térmica das chapas de UHPC
12	Desforma das vigas de concreto armado e transporte para o local dos ensaios
13	Furação das vigas, posicionamento e fixação dos reforços
14	Realização dos ensaios

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação as etapas 01 e 02, foram definidas as características das vigas e das chapas de reforço. São 09 vigas divididas em 03 grupos, como indicado na Tabela 10.

Tabela 10 – Características das vigas executadas para o estudo

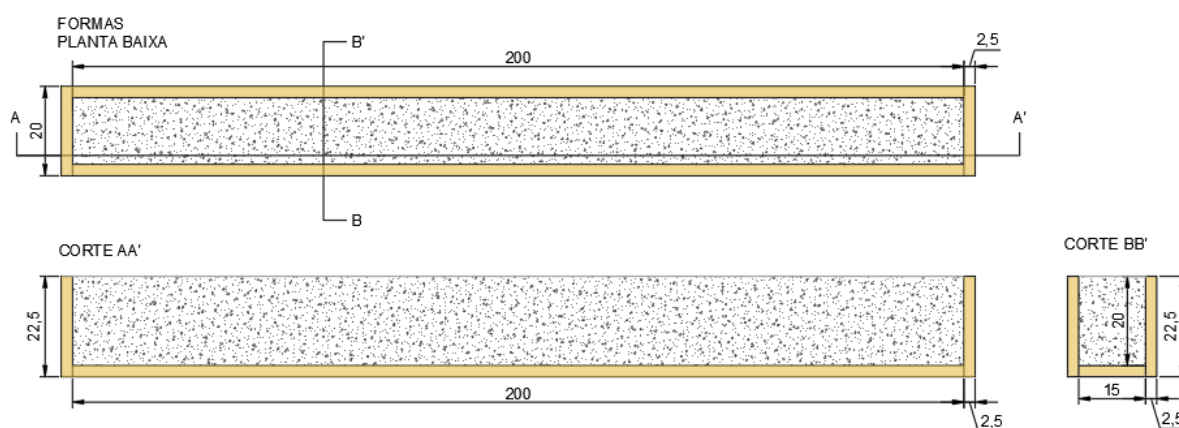
Viga	Característica	Seção (cm)	Comprimento (cm)	f_{ck} (MPa)
V1	Referência 01	15x20	200	30
V2	Referência 02			
V3	Referência 03			
V4	Chapa UHPC 01			
V5	Chapa UHPC 02			

V6	Chapa UHPC 03			
V7	Chapa UHPC ARMADO 01			
V8	Chapa UHPC ARMADO 02			
V9	Chapa UHPC ARMADO 03			

Fonte: Elaborado pelo autor.

- GRUPO 01 – VIGAS DE REFERÊNCIA:** Vigas em concreto armado convencional, com seção igual a 15x20 cm, comprimento igual a 200 cm e f_{ck} de 30 MPa (Figura 20). São vigas sem reforço, submetidas aos ensaios para que se obtenha os dados referenciais para análise da eficácia dos reforços posteriormente ensaiados.

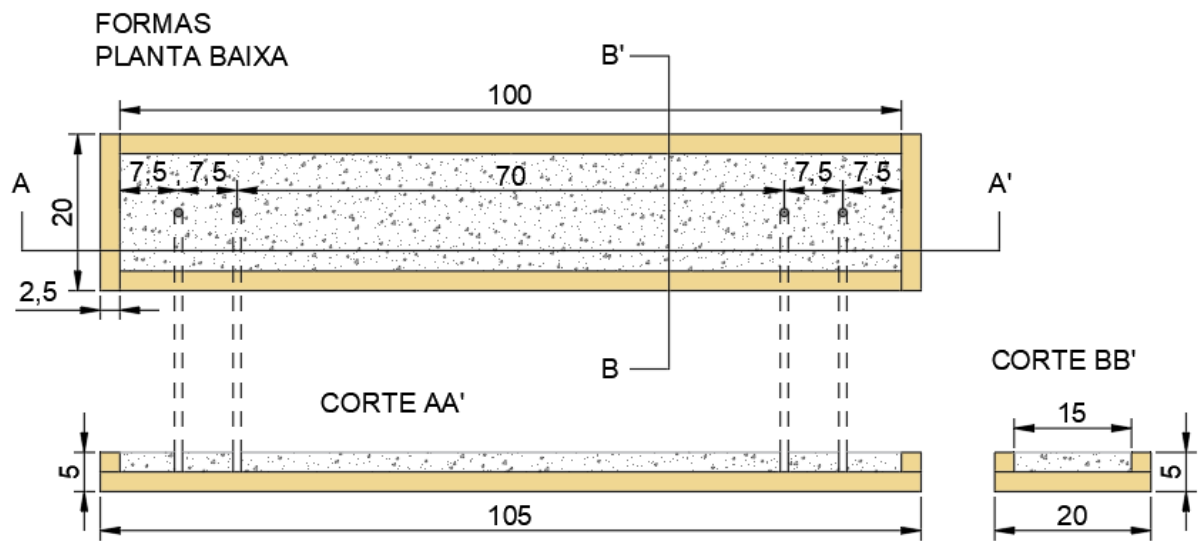
Figura 20 – Detalhamento da forma das vigas



Fonte: Elaborado pelo autor.

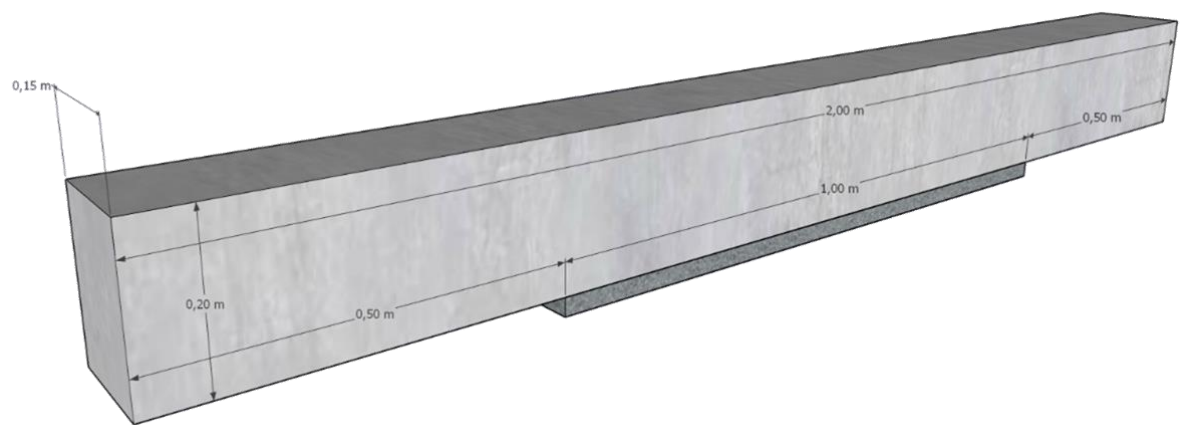
- GRUPO 02 – VIGAS REFORÇADAS COM UHPC NÃO ARMADO:** Vigas em concreto armado convencional, com seção igual a 15x20 cm, comprimento igual a 200 cm e f_{ck} de 30 MPa, reforçadas com chapa de UHPC sem armadura (Figura 21), com fixação química nos pontos de furação e em toda a superfície de contato entre reforço e elemento estrutural, bem como mecânica em 4 pontos. As Figuras 22 e 23 mostram a posição do reforço com o UHPC não armado e a posição das fixações químicas.

Figura 21 – Detalhamento da forma das chapas de UHPC



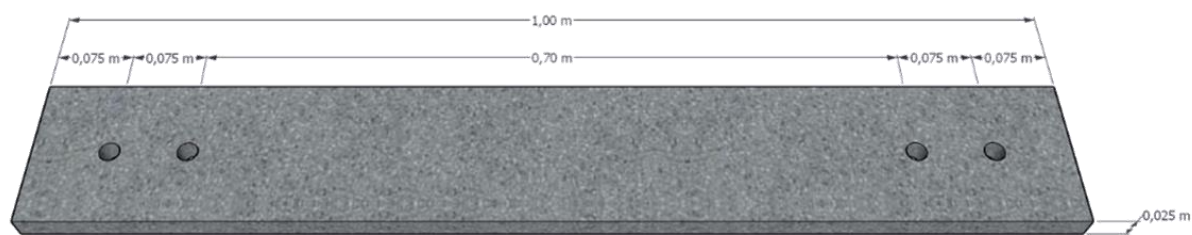
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Dimensões da viga de concreto armado e posição do reforço em UHPC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Dimensões do reforço em UHPC



Fonte: Elaborado pelo autor.

3. **GRUPO 03 – VIGAS REFORÇADAS COM UHPC ARMADO:** Vigas em concreto armado convencional, com seção igual a 15x20 cm, comprimento igual a 200 cm e f_{ck} de 30 MPa, reforçadas com chapa de UHPC armado com 3 barras de aço de Ø10mm, com fixação química nos pontos de furação e em toda a superfície de contato entre reforço e elemento estrutural, bem como mecânica em 4 pontos.

As formas foram executadas com tábuas de pinus cortadas e aplainadas e fixadas com parafusos, de forma a não danificar os reforços no momento da desforma.

Foi definido que as placas de UHPC seriam executadas com comprimento igual a 1 metro, compreendendo o terço mais tracionado da viga: o inferior central, onde o esforço cortante é nulo, como apresentado no Apêndice B. As placas de UHPC possuem espessura de 2,5 cm e largura igual à da viga a ser reforçada (15 cm). O comprimento da amostra também foi definido com base no tamanho do equipamento de cura térmica existente na Universidade. Além disso, o molde foi executado já com os furos de ancoragem, para evitar fissurações internas ao reforço em uma furação futura. Para isto, as formas das chapas foram furadas e trechos de mangueira cristal Ø12,5mm foram introduzidos no elemento na vertical.

Em relação ao concreto utilizado, o que compõe as vigas foi entregue por empresa especializada em fornecimento de concreto usinado, obtendo f_c igual a 30,8 MPa, com a proporção dos materiais conforme a Tabela 11 e composição granulométrica conforme indicada no Anexo A.

Tabela 11 – Materiais utilizados nas vigas de concreto armado

Material	Quantidade (kg/m³)	f_c (MPa)
Cimento CP II-F-40	226	30,8
Cinza Volante	88	
Areia natural média	495	
Areia de britagem	361	
Brita 0 - 12,5 mm	209	
Brita 1 - 19,0 mm	835	
Água	189	
Aditivo Redutor de Água RA1	3,14	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A concretagem das vigas foi realizada no dia 28 de novembro de 2024 (Figura 24) e envolveu conferência de armaduras, do cobrimento, bem como limpeza e travamento das formas. Foi utilizado vibrador durante o procedimento de concretagem. Após a realização foi colocada manta geotêxtil sobre todas as vigas para auxiliar no procedimento de cura (Figura 25), tendo em vista que ficaram em local descoberto. As vigas foram armadas com armadura longitudinal negativa com 2Ø 6.3mm e positiva com 2Ø 8mm. Os estribos foram executados com Ø5mm c/ 20cm. O detalhamento das armaduras se encontra do Apêndice B.

Figura 24 – Concretagem das vigas



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 25 – Vigas concretadas e cobertas com manta geotêxtil



Fonte: Acervo pessoal do autor.

A Figura 26 mostra os ensaios e processos realizados utilizando argamassadeira para definição do melhor traço a ser utilizado no estudo, com base, principalmente, em trabalhabilidade e resistência.

Figura 26 – Dosagens e testes realizados para a escolha do traço a ser utilizado



Fonte: Acervo pessoal do autor.

As chapas de UHPC foram executadas com f_c aos 28 dias de 131,2 MPa, com traço indicado na Tabela 12, escolhido a partir de 03 opções testadas, e composição granulométrica conforme indicado no Apêndice A.

Tabela 12 – Materiais utilizados nas chapas de UHPC

Material	Quantidade (kg/m³)	f_c (MPa)
Cimento CP V	465,00	131,2
Sílica ativa	90,89	
Areia natural média	11,62	
Areia natural fina	961,69	
Fibra metálica	186,79	
Água	122,32	
Aditivo Superplastificante	19,55	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 27 mostra a concretagem das chapas de UHPC, realizada no dia 18 de dezembro de 2024. Foram 8 chapas concretadas.

Figura 27 – Chapas de UHPC concretadas



Fonte: Acervo pessoal do autor.

No dia seguinte à concretagem, as peças foram desmoldadas (Figura 28), bem como os 04 corpos de prova, sendo todos estes materiais colocados em cura térmica, conforme indicado por Schachinger et al. (2008). Este procedimento foi realizado aumentando-se 10°C por hora até atingir a temperatura de 90 °C, mantendo este patamar por mais uma hora. Após este período a temperatura foi reduzida em 10°C

por hora, até atingir a temperatura ambiente. Após isso, as peças foram deixadas em cura úmida pelo período de 22 dias.

Figura 28 – Chapas concretadas e deformadas, indo para cura térmica



Fonte: Acervo pessoal do autor.

As vigas foram ensaiadas na idade de 56 dias e as chapas aos 28 dias. De forma a simular uma situação de reforço posterior, os furos foram realizados na viga após à cura, levando-se em consideração o posicionamento dos furos executados nas chapas de UHPC. Para evitar um conflito entre os furos dos reforços e os estribos das vigas, antes da concretagem foram marcados nas formas os pontos das armaduras transversais, de forma a conhecer seu posicionamento e poder desviar sem danificar o elemento, como apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Reforços colocados sobre as vigas identificadas, antes da fixação



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Em relação aos furos, foram testados 2 diâmetros: Ø13mm e Ø14mm. A segunda opção se mostrou mais adequada ao posicionar a barra rosca, considerando o preenchimento posterior, e foi a escolhida. Todos os furos foram realizados com 50 mm de profundidade dentro da viga, seguindo indicação de fornecedores e o que fora executado por Said et al. (2022), executados com furadeira de encaixe rápido. Em seguida, foram limpos com soprador de ar para remover toda sujeira e impurezas. Depois disso, o adesivo estrutural à base de resina epóxi MC Solid 1300 foi misturado e aplicada nos furos e em toda a superfície das vigas e das chapas na área a ser reforçada. Finalmente, barras rosca de ancoragem com 12,5 mm de diâmetro foram colocadas nos furos e mantidos até que a resina epóxi endurecesse. Dois dias depois, após a cura do chumbador químico, as porcas foram colocadas, finalizando a fixação mecânica do sistema. A Figura 30 mostra a fixação mecânica pronta.

Figura 30 – Detalhe da fixação mecânica dos reforços, com barra rosca e arruelas

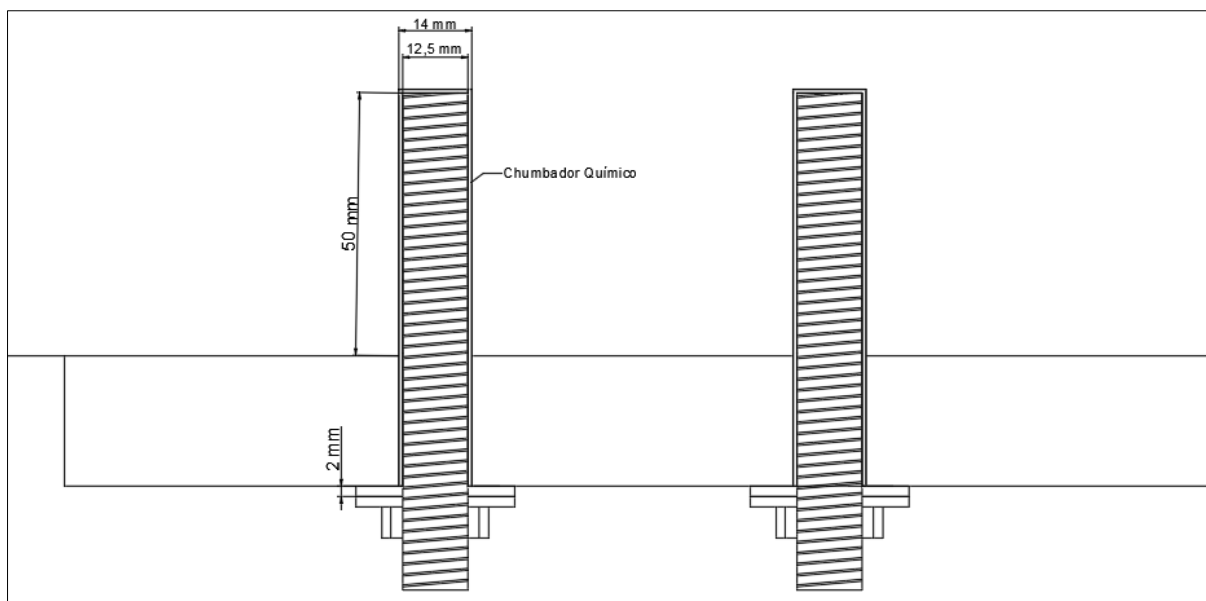


Fonte: Acerto pessoal do autor.

A resistência à tração e ao escoamento dos parafusos utilizados foi de 300 MPa e 500 MPa, respectivamente. Para manter o padrão utilizado por Said et. al. (2022), foram utilizadas 2 arruelas de 2mm de espessura em cada ponto de fixação, totalizando 4mm (Figura 31). A resistência ao escoamento e à tração das arruelas é de 240 MPa e 360 MPa, respectivamente.

O torque também foi medido na fixação das barras rosca, com a utilização de uma célula de carga. Todas as porcas foram colocadas utilizando um torque de 11,55 Nm.

Figura 31 – Detalhamento da fixação dos chumbadores mecânicos



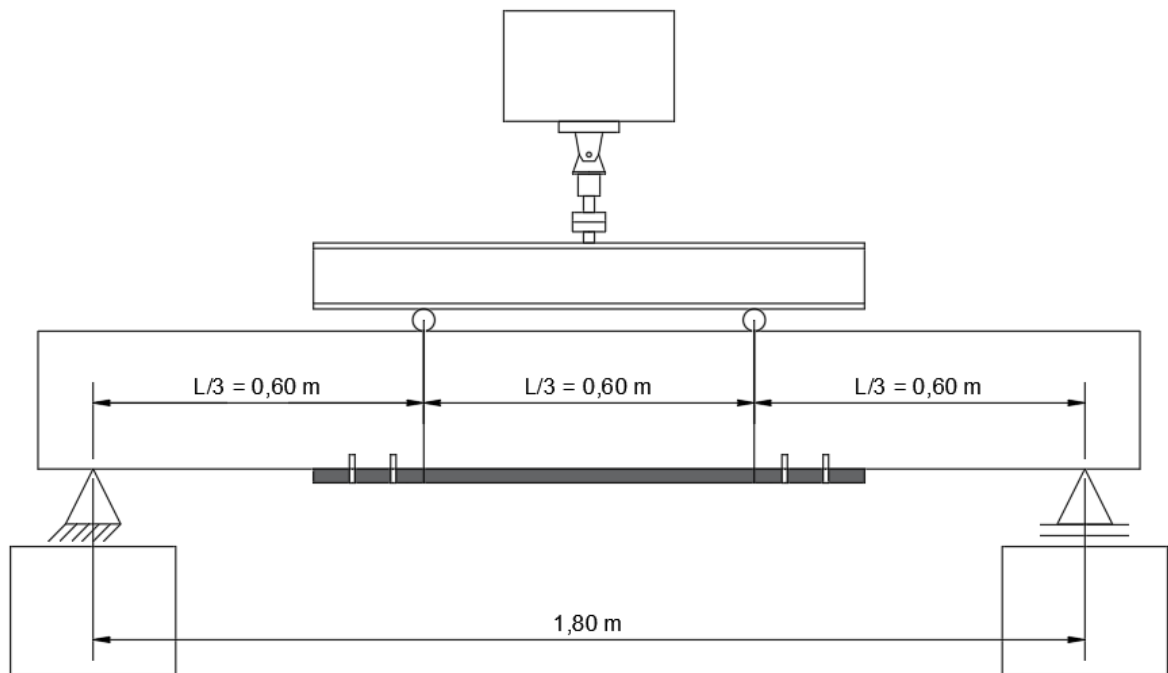
Fonte: Elaborado pelo autor.

As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos. Este ensaio foi definido por submeter as vigas referência e as reforçadas a um momento central mais coerente com situações reais de cargas distribuídas. Nele, a viga é apoiada em dois pontos extremos (vãos simples), e duas cargas concentradas são aplicadas de maneira simétrica ao longo do seu comprimento, dividindo a região solicitada em três segmentos de igual comprimento.

Diferentemente do ensaio de flexão em três pontos, em que ocorre um máximo de tensão no ponto central devido à presença de forças cortantes, no ensaio de quatro pontos a região entre as cargas apresenta um campo uniforme de momento fletor, sem a influência de esforços cortantes. Esse fator torna a análise da resistência à flexão mais confiável, pois os efeitos do cisalhamento não influenciam diretamente a resposta estrutural nessa região, como é apresentado no Apêndice B.

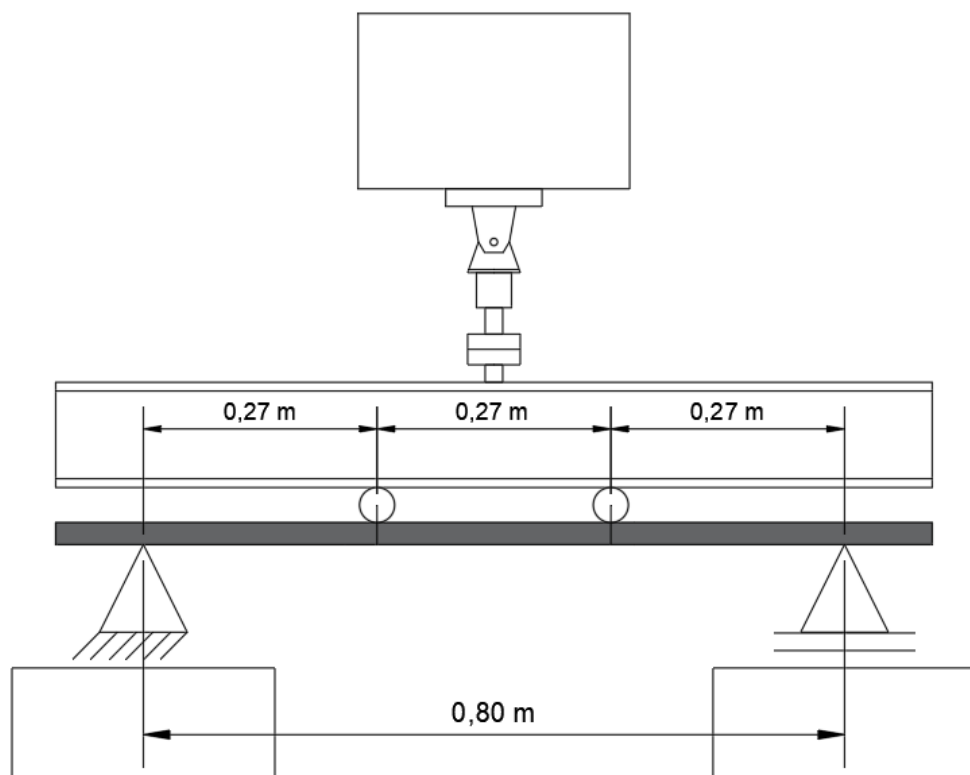
As Figuras 32 e 33 representam o ensaio de flexão de quatro pontos das vigas reforçadas e dos reforços. Nota-se que, nas chapas de reforço, quando já fixadas nas vigas de referência, os pontos de furação e fixação mecânica foram projetados para ficarem fora da área de momento máximo, para submeter exclusivamente o reforço aos esforços solicitantes.

Figura 32 – Esquema do ensaio de flexão de 4 pontos nas vigas reforçadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Esquema do ensaio de flexão de 4 pontos nos reforços



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ambos os ensaios foi definido que os apoios ficariam a uma distância de 10 centímetros das extremidades dos elementos. Tanto os apoios quanto os pontos de aplicação de cargas foram executados utilizando roletes.

O carregamento foi realizado transferindo-se a carga da prensa hidráulica Instron GR048 com capacidade de 300 kN a uma viga metálica apoiada sobre os roletes, posicionados no terço central do vão livre estabelecido entre os apoios.

Para avaliar os deslocamentos, foram utilizados LVDT's na parte central das vigas, no centro dos reforços e na viga metálica utilizada como suporte dos exemplares, como apresentado na Figura 34. No caso da viga metálica, esta medição foi necessária para avaliar se haveria uma deformação no elemento de apoio do ensaio, a ser descontado do deslocamento final da viga caso fosse constatado, o que não ocorreu.

Figura 34 – LVDT's posicionados no centro das amostras, medindo deslocamentos



Fonte: Acervo pessoal do autor.

4 RESULTADOS

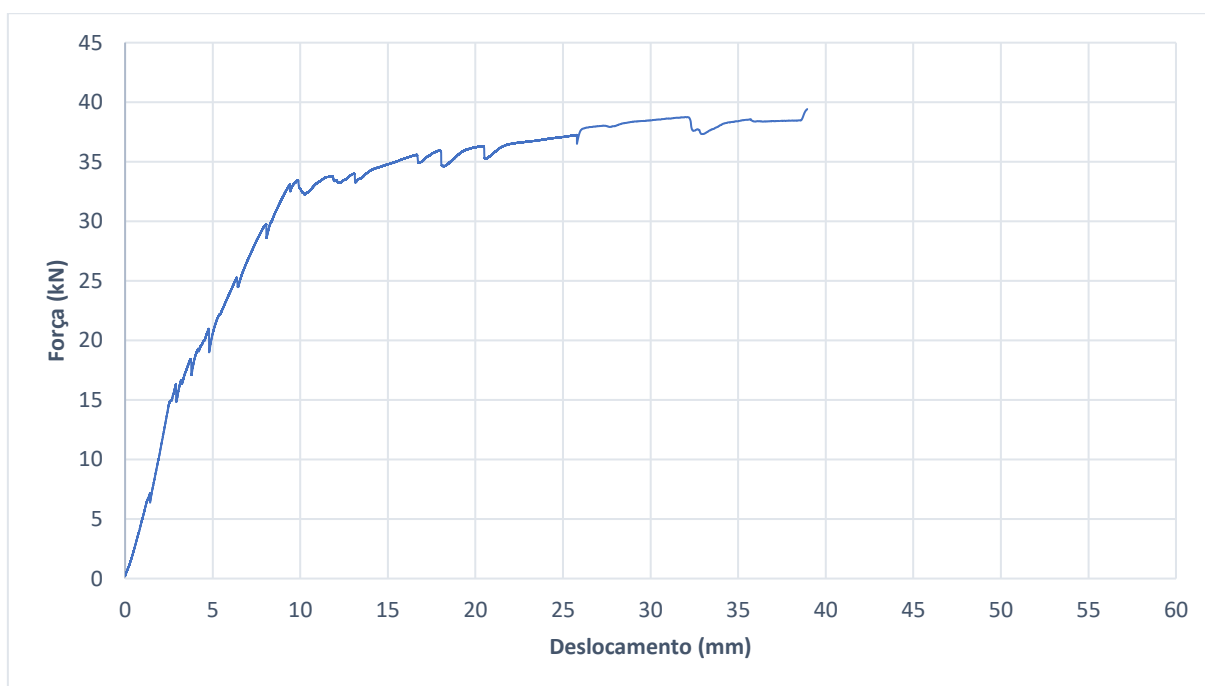
4.1 VIGAS DE REFERÊNCIA

Foram ensaiadas 03 vigas de referência, com características indicadas no capítulo 03. Durante os ensaios, foi possível verificar similaridades no comportamento de todas as amostras, com fissuração inicial com carregamento da ordem de 15 kN.

4.1.1 Amostra 01

A primeira amostra foi ensaiada em uma velocidade de 0,25 mm/min, semelhante à utilizada por Said et. al. (2022). Se caracterizou por um ensaio longo, de aproximadamente 2,5 horas de duração. Em virtude do tempo disponibilizado para ensaio no laboratório, as demais vigas foram ensaiadas em velocidade superior, como será apresentado nas próximas páginas. As Figuras 35 e 36 mostram o comportamento desta viga durante o ensaio, com rompimento à compressão na flexão. O ensaio foi realizado em 3 etapas, sendo no Gráfico 1 demonstradas as duas etapas iniciais. A Tabela 13 apresenta os principais resultados obtidos.

Gráfico 1 – Força x Deslocamento da Amostra 01



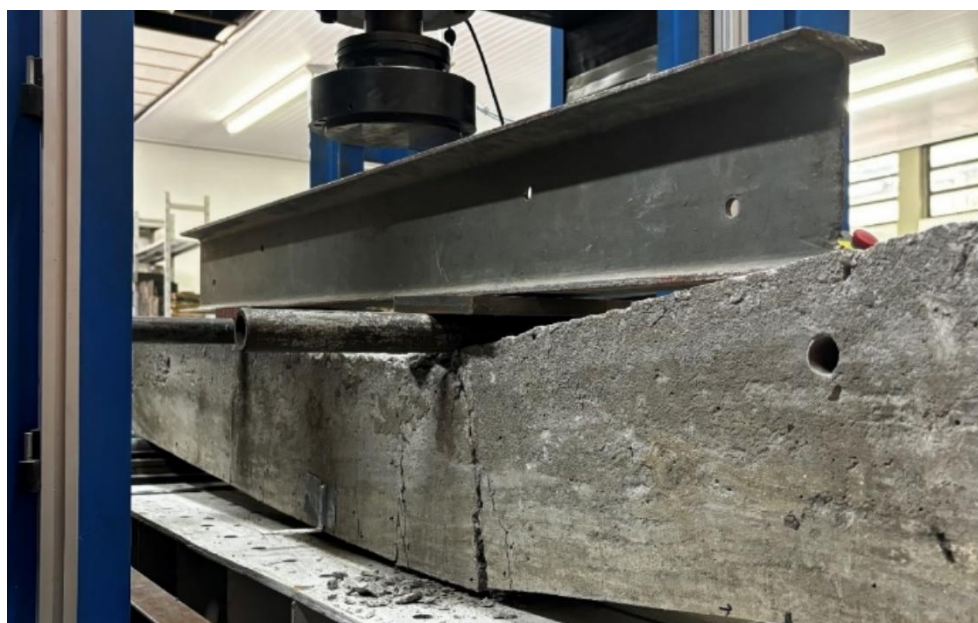
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Fissuração inicial, localizada na parte inferior central



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 36 – Rompimento da viga à flexão, abaixo de ponto de transferência de carga



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Tabela 13 – Principais resultados da amostra 01 (vigas de referência)

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra 01	38,94	39,42	7,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva apresenta uma inclinação acentuada no início, indicando um comportamento linear elástico típico do concreto armado. Nessa fase, a deformação é proporcional ao incremento de carga, demonstrando que o concreto e o aço trabalham conjuntamente, sem fissuração significativa.

A partir de aproximadamente 15 kN, observa-se uma redução na inclinação da curva, sugerindo o início do esgotamento da capacidade elástica do concreto. Esse ponto está associado ao início da fissuração do concreto na zona tracionada da viga.

Entre 15 kN e 33 kN, a curva continua ascendendo, porém com menor inclinação, indicando que o aço da armadura começa a assumir uma parcela maior das tensões na região tracionada, enquanto o concreto já está fissurado.

Por volta de 33 kN a 38 kN, a curva atinge um patamar próximo da carga máxima, com menor variação da força em função da deformação. Esse comportamento é característico do escoamento do aço e da propagação de fissuras críticas no concreto, antes do colapso.

A curva indica que a viga apresenta comportamento dúctil, dado o prolongamento da deformação após o pico de carga, permitindo deformações significativas antes do colapso, o que é desejável em estruturas de concreto armado para garantir segurança em situações de sobrecarga.

4.1.2 Amostra 02

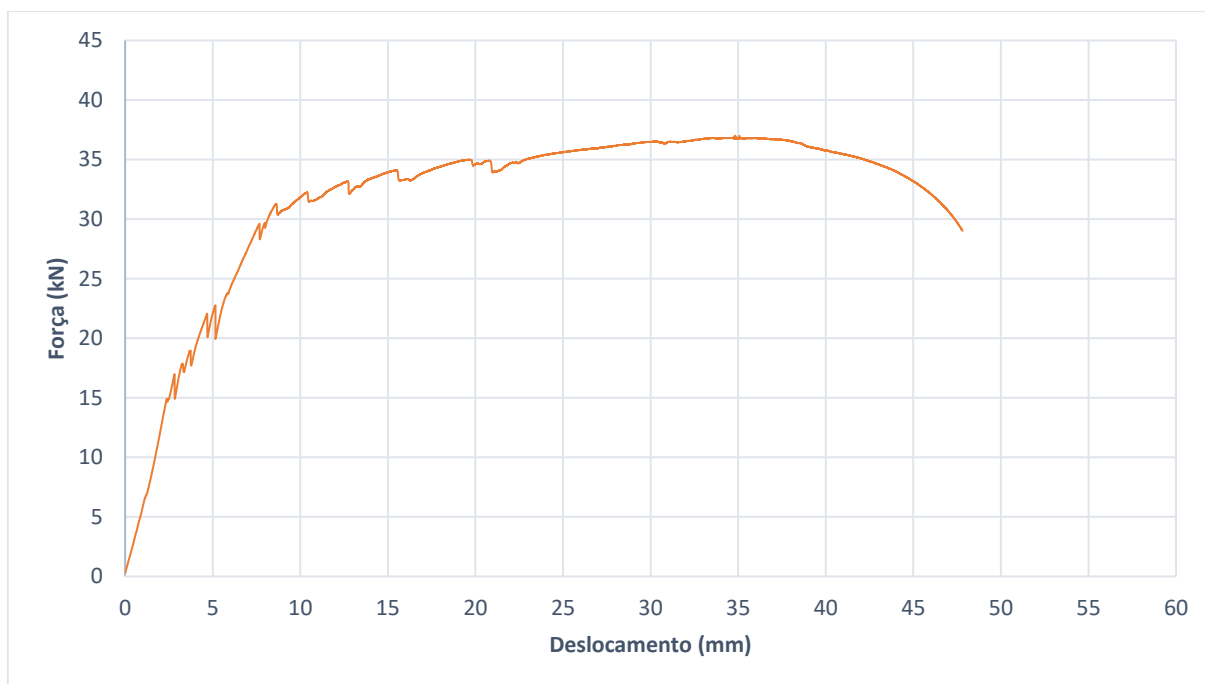
A segunda amostra foi ensaiada em uma velocidade de 1,5 mm/min, diferentemente do primeiro ensaio, de forma a diminuir o tempo total em virtude da disponibilidade de utilização do equipamento. A partir deste ensaio, todas as demais vigas serão apresentadas com ensaio realizado nesta velocidade, por motivos já indicados anteriormente. O Gráfico 2 mostra o comportamento desta viga durante o ensaio, com rompimento à compressão na flexão. A Tabela 14 apresenta os principais resultados obtidos.

Tabela 14 – Principais resultados da amostra 02 (vigas de referência)

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra 02	35,07	36,99	14,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Força x Deslocamento da Amostra 02



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva exibe um comportamento linear até aproximadamente 15 kN, evidenciando a resposta elástica do concreto armado. Nesta fase, tanto o concreto quanto o aço da armadura trabalham em conjunto, com o concreto absorvendo as tensões de compressão e o aço permanecendo na fase elástica.

Entre 15 kN e 23 kN, observa-se um desvio do comportamento linear, indicando o início da fissuração na zona tracionada da viga. Este ponto marca a transição do regime elástico para o plástico.

Após o início das fissuras, a curva continua ascendente, mas com uma inclinação reduzida, sugerindo que o aço da armadura começa a suportar uma parcela maior das tensões. O concreto, nesse estágio, contribui principalmente na zona comprimida.

A curva atinge o pico máximo de força em 36,99 kN. Este é o ponto de carga máxima da viga, após o qual a estrutura entra em regime de escoamento do aço ou propagação acelerada das fissuras. O pico é seguido por uma leve estabilidade, indicando um comportamento plástico antes da falha definitiva.

A presença de uma fase de deformação significativa (Figuras 37 e 38) após o pico de carga indica que a viga apresentou um comportamento relativamente dúctil.

Figura 37 – Trincas verticais na base, com maiores aberturas na parte central



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 38 – Deformação da viga

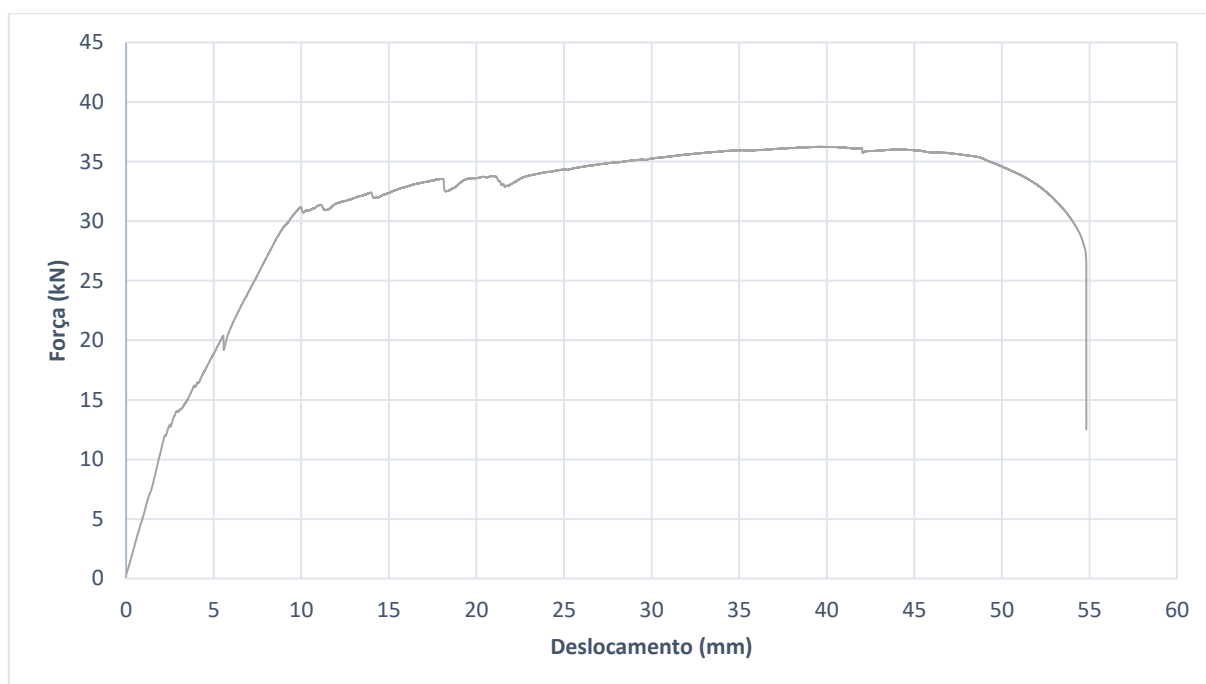


Fonte: Acervo pessoal do autor.

4.1.3 Amostra 03

A terceira amostra foi ensaiada em uma velocidade de 1,5 mm/min, assim como a amostra 02. O Gráfico 3 mostra o comportamento desta viga durante o ensaio, com rompimento à compressão na flexão. A Tabela 15 apresenta os principais resultados obtidos.

Gráfico 3 – Força x Deslocamento da Amostra 03



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Principais resultados da amostra 03 (vigas de referência)

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra 03	39,56	36,25	12,84

Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva apresenta um comportamento linear até aproximadamente 14 kN, evidenciando a fase elástica do material, onde a relação entre força e deformação é proporcional. Neste estágio, tanto o concreto quanto o aço trabalham de forma conjunta, sem fissuras significativas.

Entre 14 kN e 20 kN, observa-se uma mudança na inclinação da curva, o que indica o início da fissuração no concreto, especialmente na zona tracionada. Esse

comportamento é característico do concreto armado, onde o concreto começa a perder capacidade na tração e o aço da armadura assume maior parte da carga.

Após o início das fissuras, a curva continua ascendendo, mas com inclinação reduzida. Isso sugere que a armadura de aço está absorvendo mais tensões enquanto o concreto fissurado na tração contribui menos para a resistência global.

O gráfico atinge o pico máximo de força em 36,25 kN, o que representa a capacidade máxima da viga antes do início do escoamento do aço ou da propagação crítica das fissuras no concreto. Este é o ponto de máxima resistência estrutural.

Após o pico, observa-se uma leve queda na força com aumento da deformação, sugerindo que a viga entrou em colapso progressivo. A queda não é abrupta, o que indica comportamento dúctil da viga. O comportamento da viga durante o ensaio está representado nas Figuras 39 e 40.

Figura 39 – Trincas verticais na base, com maiores abertura na parte central



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 40 – Deformação da viga



Fonte: Acervo pessoal do autor.

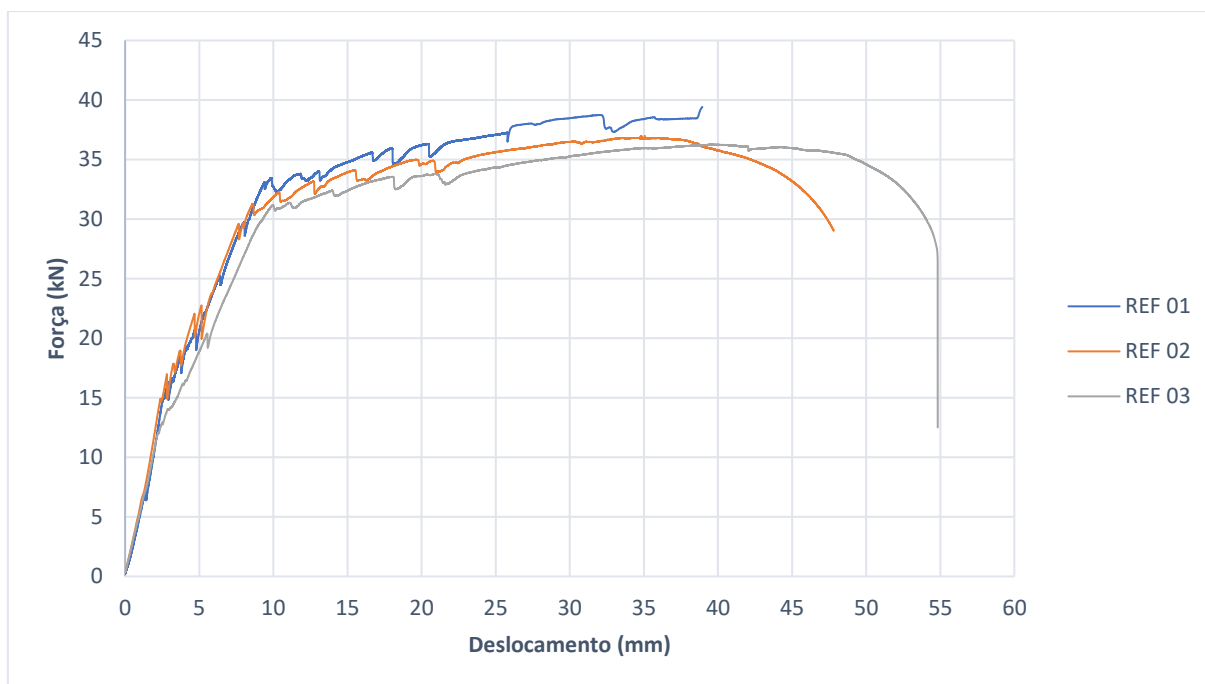
4.1.4 Dados

O Gráfico 4 reúne as 3 curvas no mesmo diagrama, para facilitar a visualização.

É possível avaliar que os comportamentos iniciais de todas as vigas na fase elástica linear foram muito parecidos, até aproximadamente 15 kN, ponto a partir do qual começa a fissuração, transferindo-se mais carga para a armadura.

A Amostra 01 apresenta melhor ductilidade do que as demais, mantendo uma capacidade de suporte de carga mais elevada por um intervalo maior de deformação, enquanto a Amostra 03 apresenta um comportamento mais dúctil do que a Amostra 02, sustentada pela maior capacidade de deformação antes do colapso.

Gráfico 4 – Força x Deslocamento de todas as amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 VIGAS REFORÇADAS COM UHPC ARMADO

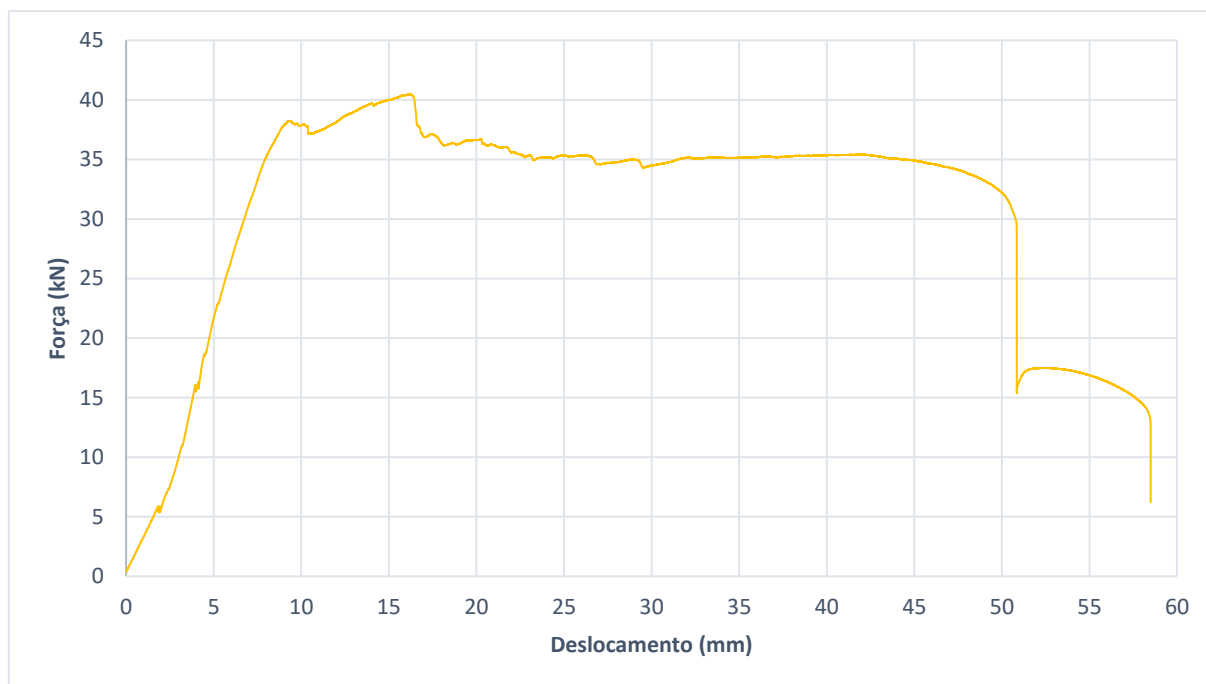
Foram ensaiadas 03 vigas, reforçadas com UHPC e armadura. Durante os ensaios, foi possível verificar similaridades no comportamento das duas primeiras amostras e uma terceira amostra com grande diferença de comportamento. Ao analisar o motivo após a realização do ensaio, foi possível verificar que esta viga foi executada com as armaduras positivas e negativas invertidas, diminuindo consideravelmente a resistência do elemento. Assim sendo, esta amostra foi descartada e não incluída na dissertação.

Todavia, algumas constatações interessantes relativas à fixação do elemento de reforço desta amostra são importantes para a compreensão do comportamento deste tipo de material e estão apresentadas no item 4.5.

4.2.1 Amostra 01

A amostra foi ensaiada em uma velocidade de 1,5 mm/min. O Gráfico 5 mostra o comportamento desta viga durante o ensaio, com rompimento por cisalhamento. A Tabela 16 apresenta os principais resultados obtidos.

Gráfico 5 – Força x Deslocamento da Amostra 01



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Principais resultados da amostra 01 (vigas com chapas armadas)

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra 01	16,21	40,48	38,12

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico exibe uma curva ascendente e linear até, aproximadamente, 9 mm de deslocamento, atingindo uma força de cerca de 38 kN.

Este comportamento indica que a viga está na fase elástica, na qual tanto o concreto quanto as armaduras estão trabalhando conjuntamente, sem sinais de fissuração significativa. A deformação é proporcional ao incremento de carga, conforme esperado para materiais que ainda não atingiram seu limite elástico.

Após o ponto de inflexão em 10 mm, observa-se uma leve redução na inclinação da curva, indicando o início da fissuração do concreto na zona tracionada da viga. A força atinge o pico máximo de 40,48 kN com 16,21 mm de deslocamento. Este é o ponto de capacidade máxima da viga, antes da transição para o regime plástico.

Após o pico de carga, há uma queda leve na força, que se estabiliza em torno de 35 kN. Esse comportamento sugere que o aço da armadura principal entrou em escoamento, enquanto o concreto na zona comprimida continua a resistir.

O platô observado entre 20 mm e 45 mm de deslocamento indica que, apesar das fissuras no concreto, a viga ainda mantém uma boa capacidade de carga, demonstrando um comportamento dúctil.

A partir de 45 mm de deslocamento, há uma queda acentuada na força, descendo rapidamente de 35 kN para, aproximadamente, 15 kN com 50 mm de deslocamento. Essa queda abrupta indica um colapso repentino da viga, que pode estar associado ao esmagamento do concreto na zona comprimida. O comportamento sugere que a viga atingiu seu limite último de resistência.

Após o colapso, o gráfico mostra uma pequena recuperação da força para cerca de 17 kN. Isso pode ser atribuído à redistribuição interna das tensões residuais ou à contribuição de armaduras secundárias (estribos) que retardam o colapso completo. Este comportamento sugere que, embora a viga tenha colapsado, ainda há uma capacidade residual limitada antes do colapso final.

Como é possível verificar na Figura 41, as fissuras surgiram na viga ao lado do reforço, sempre a 45° em direção ao ponto de aplicação da carga. Não houve deslocamento da chapa de UHPC e ficou visível que a viga estava sofrendo cisalhamento.

Figura 41 – Rachadura a 45° fora da área reforçada, indicando cisalhamento

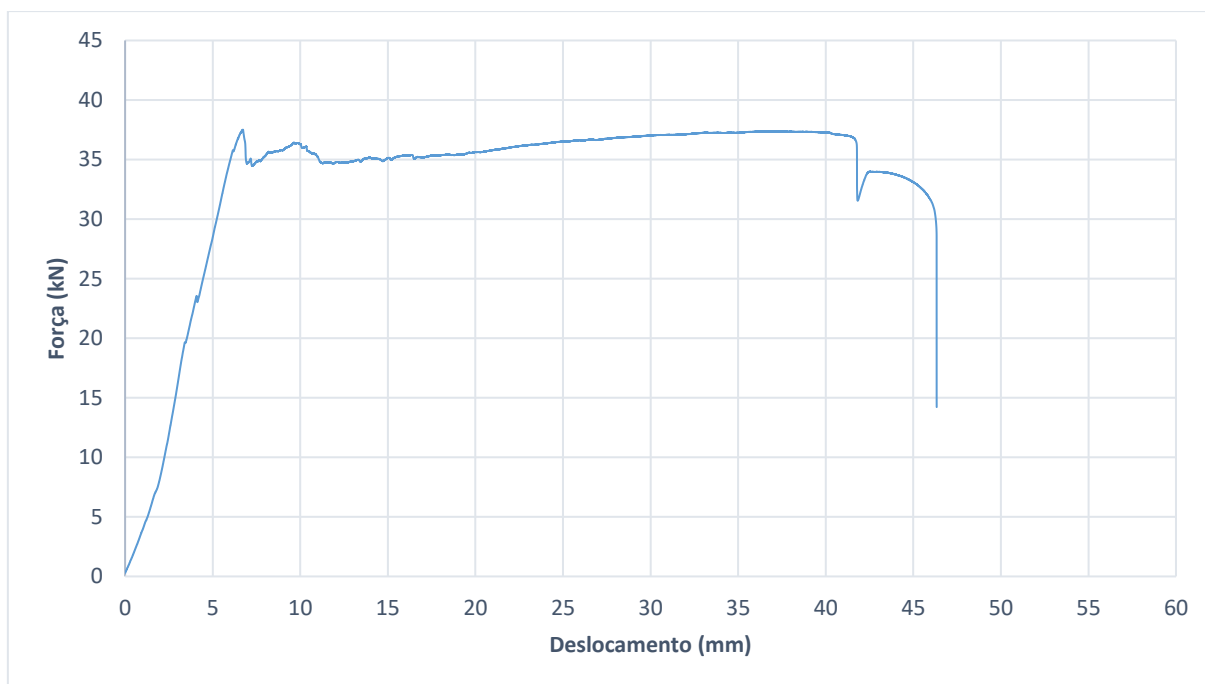


Fonte: Acervo pessoal do autor.

4.2.2 Amostra 02

A segunda amostra foi ensaiada em uma velocidade de 1,5 mm/min. O Gráfico 6 mostra o comportamento desta viga durante o ensaio, com rompimento por cisalhamento. A Tabela 17 apresenta os principais resultados obtidos.

Gráfico 6 – Força x Deslocamento da Amostra 02



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Principais resultados da amostra 02 (vigas com chapas armadas)

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra 02	6,73	37,51	37,51

Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva apresenta uma inclinação acentuada e linear até 6,73 mm de deslocamento, atingindo uma força máxima de 37,51 kN.

Esse comportamento é típico da fase elástica, onde o concreto e o aço da armadura trabalham conjuntamente sem fissuração significativa. A relação força-deslocamento é proporcional, conforme esperado para materiais que ainda não atingiram o limite elástico.

A partir desse ponto, observa-se uma redução na força, indicando o início da fissuração do concreto na zona tracionada. A queda abrupta após o pico sugere que a viga alcançou sua capacidade máxima de carga rapidamente.

Após a fissuração inicial, a curva apresenta um comportamento estabilizado entre 35 kN e 37 kN durante um longo intervalo de deslocamento, até aproximadamente 43 mm.

Esse platô sugere que, embora o concreto tenha fissurado, a armadura assumiu a maior parte das tensões, mantendo a capacidade de carga da viga. Esse comportamento é característico de elementos que apresentam ductilidade adequada, com o aço entrando em escoamento e retardando o colapso.

Em torno de 40 mm, a força volta a atingir um valor próximo do máximo (37 kN), mas ocorre uma queda súbita para aproximadamente 32 kN com 43 mm de deslocamento.

Essa queda abrupta é atribuída ao início do rompimento das armaduras longitudinais. A viga ainda consegue manter uma parte da capacidade de carga após essa falha inicial. Após a queda localizada, a curva apresenta uma descida gradual da força, reduzindo de 33 kN para 28 kN em 47 mm de deslocamento.

Como é possível verificar na Figura 42, as fissuras surgiram na viga ao lado do reforço, sempre a 45° em direção ao ponto de aplicação da carga. Não houve deslocamento da chapa de UHPC e ficou visível que a viga estava sofrendo cisalhamento.

Figura 42 – Fissura (à esquerda) e fenda (à direita) fora da região do reforço



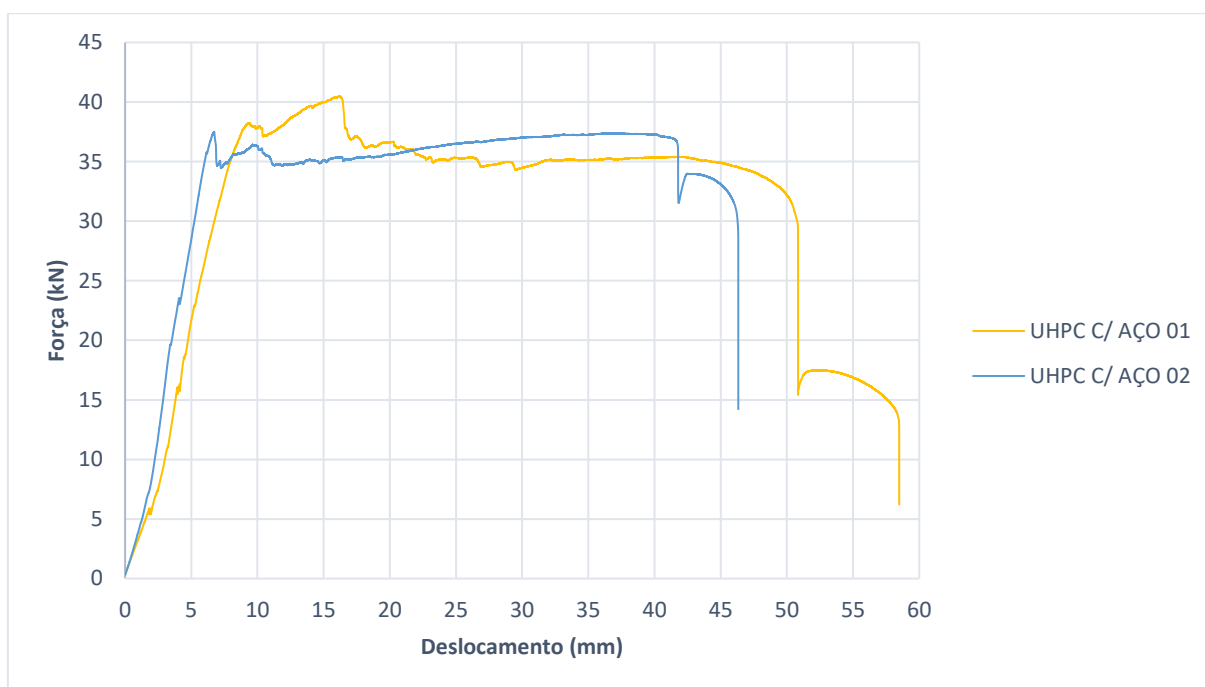
Fonte: Acervo pessoal do autor.

4.2.3 Dados

Os resultados são apresentados de forma conjunta no Gráfico 7.

É possível avaliar que ambas as vigas apresentam um comportamento elástico linear similar até aproximadamente 6-8 mm de deslocamento, evidenciado pelo crescimento proporcional da força.

Gráfico 7 – Força x Deslocamento das duas amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

A amostra 02 atinge um valor de força mais elevado mais rapidamente, chegando a cerca de 37 kN com menor deslocamento, o que sugere uma rigidez inicial maior em comparação com a amostra 01. Logo após esse pico, há uma leve queda, indicando o início da fissuração do concreto na zona tracionada.

A amostra 01 apresenta um comportamento mais gradual, atingindo o pico máximo de 40,48 kN por volta de 16,21 mm de deslocamento. Isso sugere que a amostra 01 possui uma capacidade de carga superior antes do início da fissuração.

Após o pico, a amostra 02 estabiliza em torno de 35-37 kN até aproximadamente 40 mm de deslocamento, mantendo um platô de força constante. Isso indica que o aço da armadura entrou em escoamento, e a viga conseguiu manter sua capacidade de carga, caracterizando um comportamento dúctil.

A amostra 01 também apresenta uma fase de estabilização, porém com uma leve queda progressiva após o pico, variando entre 35 kN e 37 kN. Embora essa viga tenha atingido uma carga máxima superior, a redução da força após o pico sugere uma menor eficiência na redistribuição de tensões após a fissuração.

A amostra 02 apresenta um colapso localizado abrupto em torno de 40 mm de deslocamento, com uma queda rápida da força de 37 kN para aproximadamente 33 kN, seguida de uma descida progressiva até 29 kN. Esse comportamento está relacionado à ruptura súbita, devido ao rompimento da armadura longitudinal por cisalhamento.

A amostra 01 apresenta um comportamento de colapso mais progressivo, com uma queda acentuada da força em torno de 50 mm, caindo de 35 kN para 15 kN. Após o colapso, observa-se uma leve recuperação da força para cerca de 17 kN, indicando uma capacidade residual de carga, atribuída a redistribuição interna de tensões.

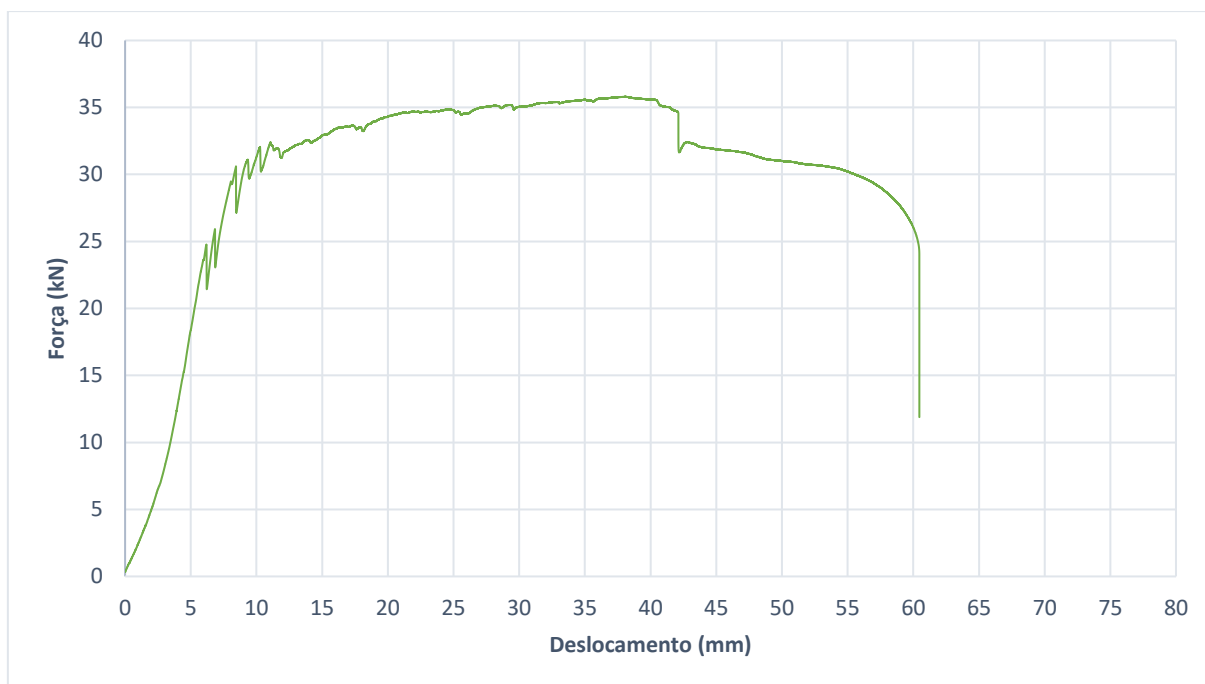
4.3 VIGAS REFORÇADAS COM CHAPAS DE UHPC NÃO-ARMADO

Foram ensaiadas 03 vigas reforçadas com UHPC não armado. Durante os ensaios, foi possível verificar similaridades no comportamento das três amostras, que acabaram apresentando dados considerados importantes na análise proposta para esta pesquisa.

4.3.1 Amostra 01

A amostra foi ensaiada em uma velocidade de 1,5 mm/min. O Gráfico 8 mostra o comportamento desta viga durante o ensaio, com rompimento à compressão na flexão. A Tabela 18 apresenta os principais resultados obtidos.

Gráfico 8 – Força x Deslocamento da Amostra 01



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Principais resultados da amostra 01 (vigas reforçadas com chapas de UHPC não-armadas)

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra 01	38,08	35,79	24,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, observa-se uma ascensão linear acentuada até aproximadamente 6,50 mm de deslocamento, atingindo cerca de 24,90 kN de força. Esse trecho indica o comportamento elástico da viga, no qual o concreto e o aço trabalham conjuntamente.

A partir dos 10 mm, há uma redução na inclinação da curva, sinalizando o início da fissuração do concreto na zona tracionada. Nesse estágio, a armadura começa a absorver uma maior parcela das tensões, enquanto o concreto fissurado perde parte de sua contribuição na resistência à tração.

A curva atinge seu pico máximo de força com 35,79 kN, e 38,08 mm de deslocamento. Após esse ponto a força estabiliza brevemente, indicando que o aço entrou em escoamento, enquanto o concreto comprimido ainda contribui para a resistência da viga. Esse comportamento demonstra a capacidade da viga de

redistribuir tensões após a fissuração inicial, mantendo sua capacidade de carga por um intervalo significativo de deslocamento.

Após o pico, a curva apresenta uma queda abrupta de força, descendo de 35,5 kN para 32 kN. Apesar dessa redução, a viga mantém uma capacidade residual, com uma queda gradual até aproximadamente 30,5 kN com 53,5 mm de deslocamento. Esse comportamento está relacionado ao esmagamento do concreto na zona comprimida. No entanto, a ausência de uma queda brusca completa mostra que a viga possui comportamento dúctil, mantendo parte da capacidade de carga mesmo após a falha inicial.

Esta amostra trabalhou de forma semelhante às 3 amostras de referência, apresentando fissuras e deformação à flexão. Mesmo com a fissuração na chapa de UHPC, é possível constatar um melhor comportamento em relação ao estado-limite de serviço, como se observa nas Figuras 43 a 47.

Figura 43 – Fissura vertical na parte inferior central da amostra e do reforço



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 44 – Fissura vertical na parte inferior central da amostra e do reforço



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 45 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 46 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 47 – Elevadas aberturas verticais e horizontais (acompanhando a armadura positiva), com grande deformação

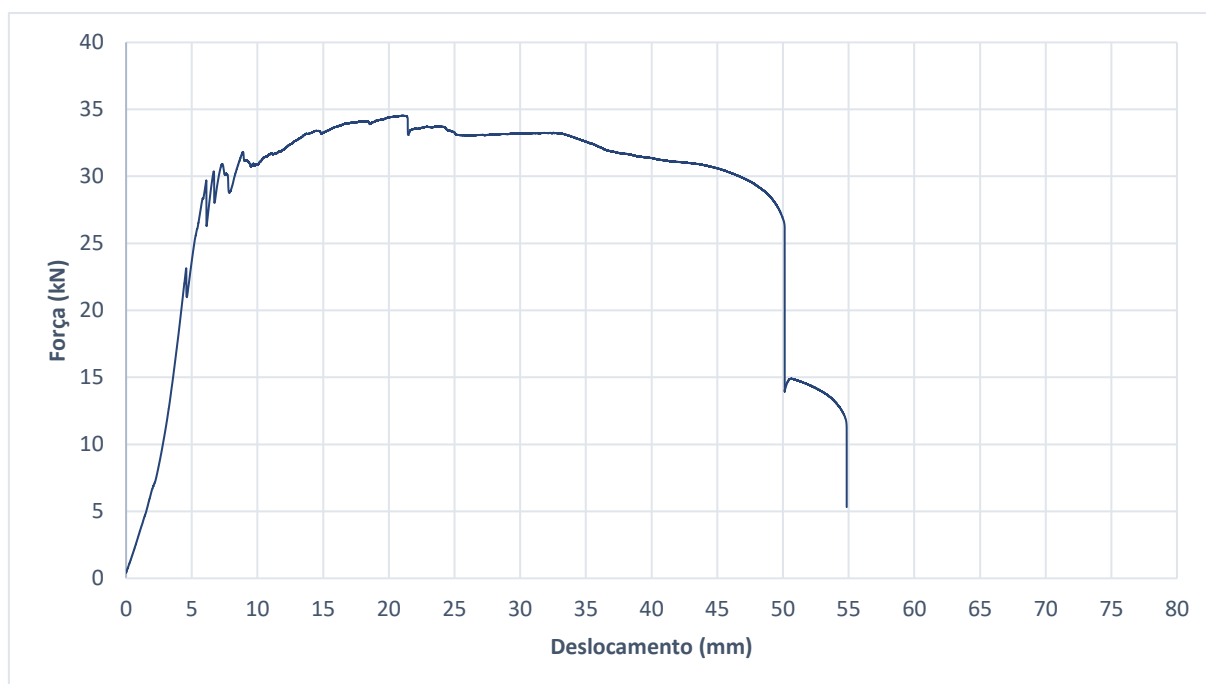


Fonte: Acervo pessoal do autor.

4.3.2 Amostra 02

A segunda amostra foi ensaiada em uma velocidade de 1,5 mm/min. O Gráfico 9 mostra o comportamento desta viga durante o ensaio, com rompimento à compressão na flexão. A Tabela 19 apresenta os principais resultados obtidos.

Gráfico 9 – Força x Deslocamento da Amostra 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Principais resultados da amostra 02 (vigas com chapas não-armadas)

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra 02	21,02	34,52	22,98

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, observa-se um crescimento acentuado e linear da força até aproximadamente 8 mm de deslocamento, atingindo cerca de 32 kN. Esse trecho corresponde ao comportamento elástico da viga, no qual tanto o concreto quanto o aço das armaduras trabalham conjuntamente, sem presença de fissuras significativas. A relação força-deslocamento é proporcional, caracterizando o regime elástico do material. Os sinais de fissuração já foram percebidos a partir dos 22,98 kN.

A partir dos 8 mm, o gráfico apresenta uma leve mudança de inclinação, mas apesar disso, a viga continua suportando aumentos de carga, alcançando um pico máximo de 34,52 kN em torno de 21,02 mm de deslocamento. Esse comportamento mostra que, após o início das fissuras, o aço passou a absorver a maior parte das tensões, enquanto o concreto fissurado contribuiu menos para a resistência à tração.

Após o pico de carga, o gráfico apresenta uma fase de estabilização, com a força oscilando levemente entre 32 kN e 34 kN até aproximadamente 45 mm de deslocamento. Esse platô confirma que a armadura entrou em escoamento plástico, permitindo que a viga mantivesse a capacidade de carga mesmo após o esgotamento da resistência do concreto tracionado.

A partir dos 45 mm, o gráfico exibe uma queda gradual da força, descendo para cerca de 27 kN em 50 mm de deslocamento. Essa redução representa o esmagamento do concreto na zona comprimida. Em seguida, há uma queda abrupta da força para cerca de 15 kN, indicando o colapso da viga. Contudo, mesmo após o colapso, a viga mantém uma capacidade residual de carga, estabilizando em torno de 14 kN, o que aponta mecanismos de redistribuição interna de tensões ainda atuantes. As Figuras 48 a 50 apresentam o comportamento dos elementos durante o ensaio.

Figura 48 – Fissura vertical na parte inferior central da amostra e do reforço



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 49 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 50 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações, e esmagamento de concreto na parte superior, em virtude de compressão



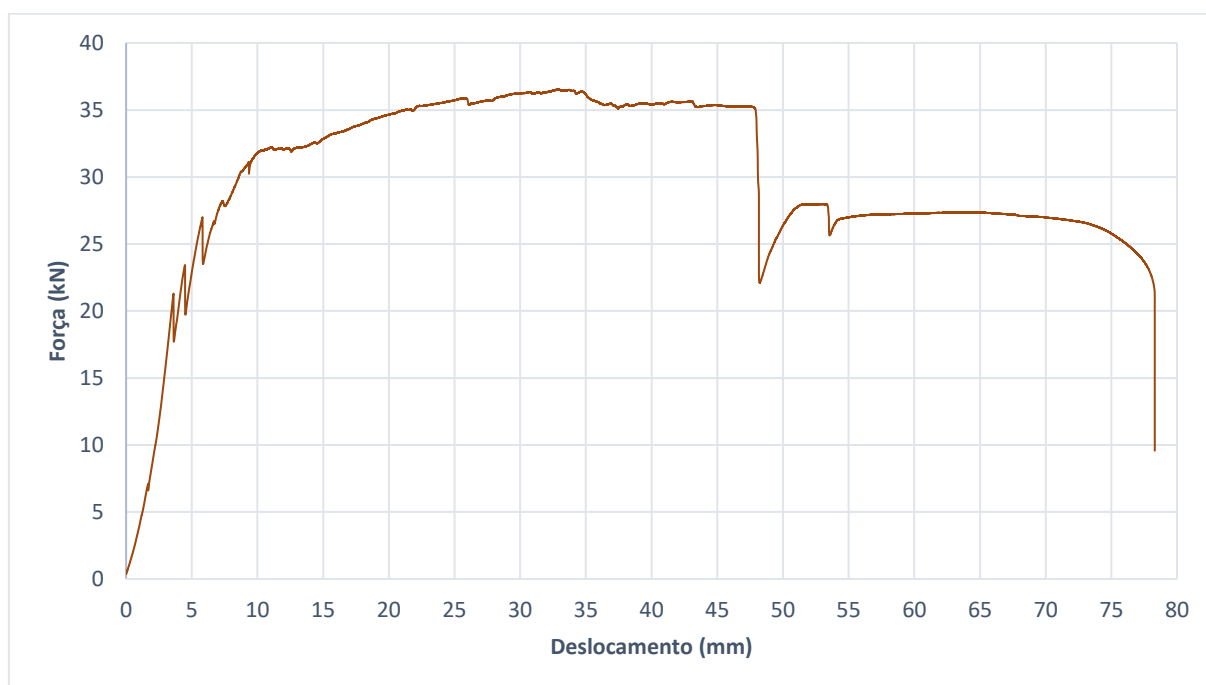
Fonte: Acervo pessoal do autor.

Esta amostra trabalhou de forma semelhante à primeira, apresentando fissuras e deformação à flexão. Mesmo com a fissuração na chapa de UHPC, é possível constatar um melhor comportamento em relação ao estado-limite de serviço.

4.3.3 Amostra 03

A terceira amostra foi ensaiada em uma velocidade de 1,5 mm/min. O Gráfico 10 mostra o comportamento desta viga durante o ensaio, com rompimento à compressão na flexão. A Tabela 20 apresenta os principais resultados obtidos.

Gráfico 10 – Força x Deslocamento da Amostra 03



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Principais resultados da amostra 03 (vigas com chapas não-armadas)

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra 03	32,84	36,54	21,62

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, observa-se uma ascensão rápida e linear da força até aproximadamente 3 mm de deslocamento, atingindo cerca de 21,62 kN. Esse comportamento corresponde à fase elástica da viga. A relação força-deslocamento é

proporcional, evidenciando que a viga ainda não ultrapassou o limite elástico do material.

Após os 10 mm, a curva apresenta uma mudança na inclinação, no entanto a viga continua suportando incrementos de carga, atingindo o pico máximo de 36,54 kN com 32,84 mm de deslocamento. Esse comportamento sugere que, após o início da fissuração, o aço da armadura passou a absorver a maior parte das tensões, enquanto o concreto fissurado perdeu parte da sua contribuição na resistência à tração.

Após o pico de carga, o gráfico revela uma queda abrupta da força para cerca de 22,5 kN em 48 mm de deslocamento, caracterizando o colapso repentino da viga, o que está atrelado ao esmagamento do concreto na zona comprimida, indicando que o elemento atingiu sua capacidade última de resistência.

Contudo, o gráfico também evidencia uma recuperação parcial da força após o colapso inicial, com a viga estabilizando em torno de 28 kN até aproximadamente 75 mm de deslocamento.

Esta amostra trabalhou de forma semelhante às 2 amostras anteriores, apresentando fissuras e deformação à flexão. Mesmo com a fissuração na chapa de UHPC, é possível constatar um melhor comportamento em relação ao estado-limite de serviço. As Figuras 51 a 54 apresentam o comportamento dos elementos durante o ensaio.

Figura 51 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 52 – Trinca na parte inferior central do reforço, com ramificações



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 53 – Rachadura na parte inferior central do reforço, com ramificações



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 54 – Rachadura na parte inferior central do reforço, com ramificações

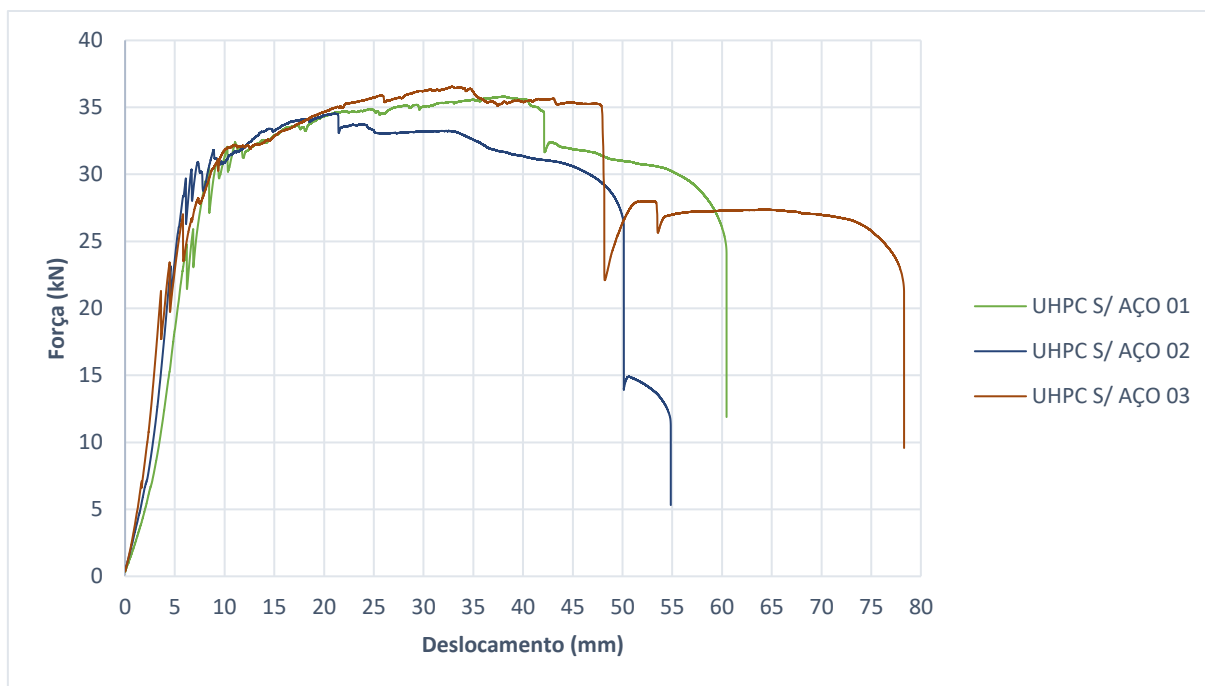


Fonte: Acervo pessoal do autor.

4.3.4 Dados

A apresentação dos resultados de forma conjunta, como no Gráfico 11, é necessária para avaliar as similaridades e diferenças nos comportamentos das vigas ensaiadas dentro deste grupo.

Gráfico 11 – Força x Deslocamento de todas as amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível avaliar que as três vigas apresentam um comportamento inicial semelhante, caracterizado por uma resposta elástica linear até aproximadamente 5 mm de deslocamento, com trechos iniciais de fissuração por volta dos 25 kN. Esse trecho da curva evidencia que, até esse ponto, o concreto e o aço trabalham de forma conjunta, sem ocorrência de fissuração significativa. O valor da força nesse estágio inicial é semelhante para todas as vigas, atingindo aproximadamente 30 kN.

A amostra 01 atingiu a maior capacidade de carga entre as três, com um pico de 35,79 kN com 38,08 mm de deslocamento. Após o pico, a viga manteve uma boa estabilidade antes de apresentar uma queda gradual da força.

A amostra 03 também alcançou valores próximos de 36 kN (36,54 kN, mais precisamente), mas o colapso ocorreu de forma mais abrupta após o pico, em torno de 48 mm de deslocamento.

Já a amostra 02 apresentou a menor capacidade máxima de carga, com um pico de 34,52 kN atingido mais precocemente, com 21,02 mm e com uma queda de força mais acentuada logo após o pico.

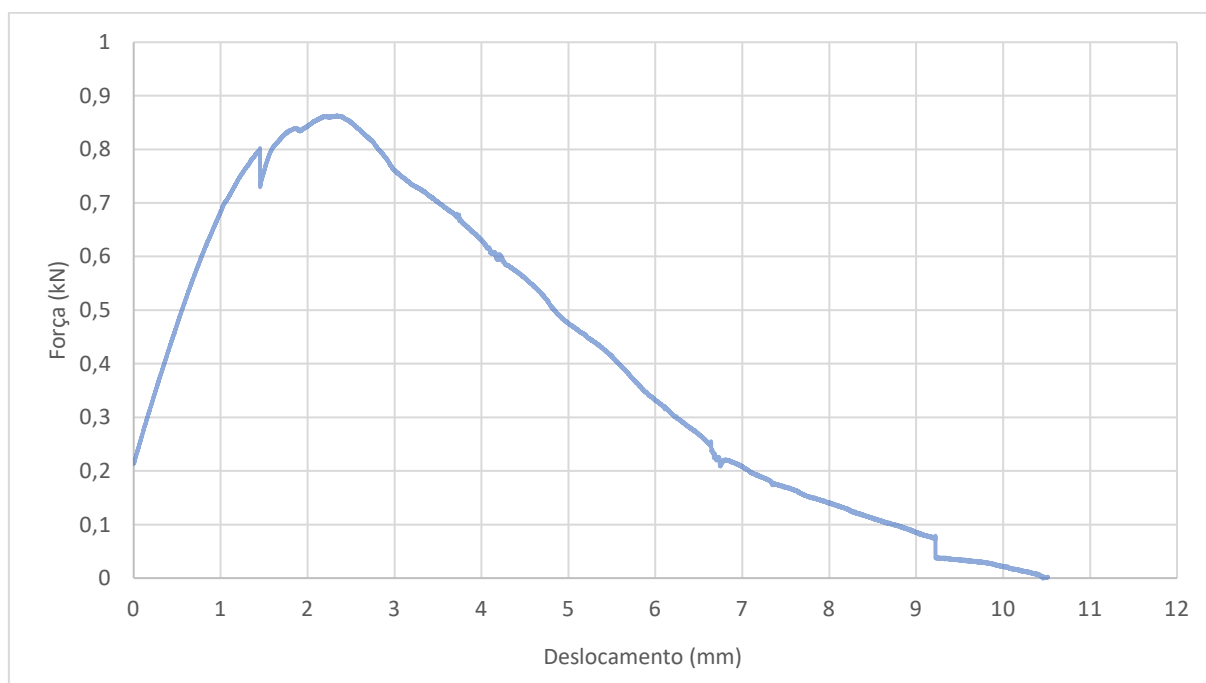
4.4 CHAPAS DE UHPC

Para avaliar seu comportamento à flexão, uma amostra de cada tipo de reforço (armada e não-armada) foi ensaiada pelo mesmo ensaio de 4 pontos, apresentando resultados que corroboram com o desempenho quando fixados às vigas de referência.

4.4.1 Não-armada

O Gráfico 12 apresenta um crescimento linear acentuado da força até aproximadamente 1,5 mm de deformação, atingindo cerca de 0,8 kN. Este trecho corresponde ao comportamento elástico da chapa, no qual o UHPC responde de forma proporcional ao carregamento aplicado, sem sinais de fissuração significativa.

Gráfico 12 – Força x Deslocamento da amostra não-armada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após 1,5 mm, observa-se um pequeno desvio da linearidade, indicando o início da microfissuração na matriz do UHPC. A força continua a aumentar, atingindo o pico máximo de 0,863 kN, com 2,34 mm de deformação (Tabela 21). Este ponto representa a capacidade máxima de carga da chapa, momento no qual o concreto atinge seu limite de resistência, e as fibras de reforço começam a atuar no controle da propagação das fissuras.

Tabela 21 – Principais resultados da amostra de UHPC não-armada

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra	2,34	0,863	0,806

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o pico de carga, a curva apresenta um declínio gradual da força, caracterizando o comportamento pós-pico do UHPC. A força diminui de forma contínua, passando de 0,9 kN para aproximadamente 0,1 kN em 10 mm de deformação. Esse comportamento é indicativo da atuação das fibras de reforço, que proporcionam ductilidade ao material e retardam o colapso frágil. A presença de pequenos patamares na curva sugere a ocorrência de eventos de desancoragem e redistribuição das tensões internas.

Ao atingir 10 mm de deformação, a força aproxima-se de zero, indicando o colapso completo da chapa. Nesta fase, a matriz cimentícia já sofreu fissuração extensa, e as fibras de reforço não conseguem mais contribuir significativamente para a resistência residual do material. A perda total da capacidade resistente marca o final do comportamento estrutural da chapa, como mostram as Figuras 55 e 56.

Figura 55 – Deformação inicial da chapa, já com fissuração central



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 56 – Deformação inicial da chapa, já com fissuração central

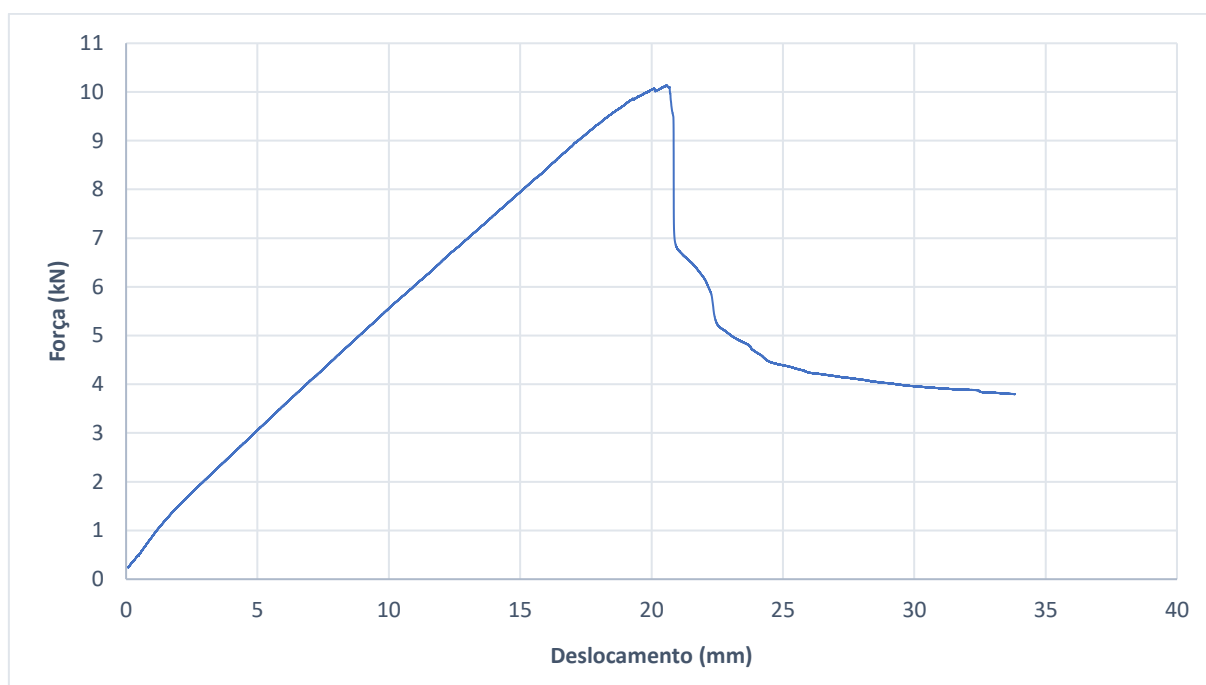


Fonte: Acervo pessoal do autor.

4.4.2 Armada

Inicialmente, analisando-se o Gráfico 13, observa-se um crescimento linear da força até 20,58 mm de deformação, atingindo 10,13 kN. Esse ponto marca a capacidade máxima da chapa antes do início da fissuração crítica na matriz do UHPC. Esse trecho representa o comportamento elástico da chapa, no qual tanto o UHPC quanto as barras de aço trabalham em conjunto para resistir ao carregamento. As barras longitudinais contribuem significativamente para a rigidez inicial do sistema, retardando o início da fissuração em comparação a chapas sem reforço metálico.

Gráfico 13 – Força x Deslocamento da amostra armada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, observa-se na Tabela 22 que, após o pico, ocorre uma queda abrupta da força, indicando o início da propagação das fissuras. No entanto, a presença das três barras de aço impede o colapso imediato, permitindo que a chapa mantenha uma resistência considerável mesmo após o início da fissuração.

Tabela 22 – Principais resultados da amostra de UHPC armada

	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga	
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)
Amostra	20,58	10,13	10,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre 21 mm e 30 mm de deformação, a curva apresenta uma redução gradual da força, caindo de 10,2 kN para aproximadamente 4 kN. Esse comportamento evidencia que, apesar da propagação das fissuras, as barras longitudinais continuam a contribuir para a resistência da chapa. A interação entre o UHPC fissurado e o aço proporciona um comportamento mais dúctil, retardando o colapso completo e permitindo uma redistribuição interna das tensões.

A fase final deste ensaio não foi apresentada neste gráfico por opção do autor, devido ao fato de que, em virtude do elevado deslocamento sofrido pela peça sem seu colapso (em virtude das barras de aço utilizadas como reforço), por diversas vezes a amostra caiu do local de ensaio, atrapalhando a análise e a apresentação dos dados em forma de gráfico. As Figuras 57 a 59 mostram etapas do ensaio.

Figura 57 – Deformação inicial da amostra, já com fissuração central



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 58 – Fissuração inferior e esmagamento superior da amostra



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 59 – Grande deformação da amostra, ainda sob elevação de carregamento

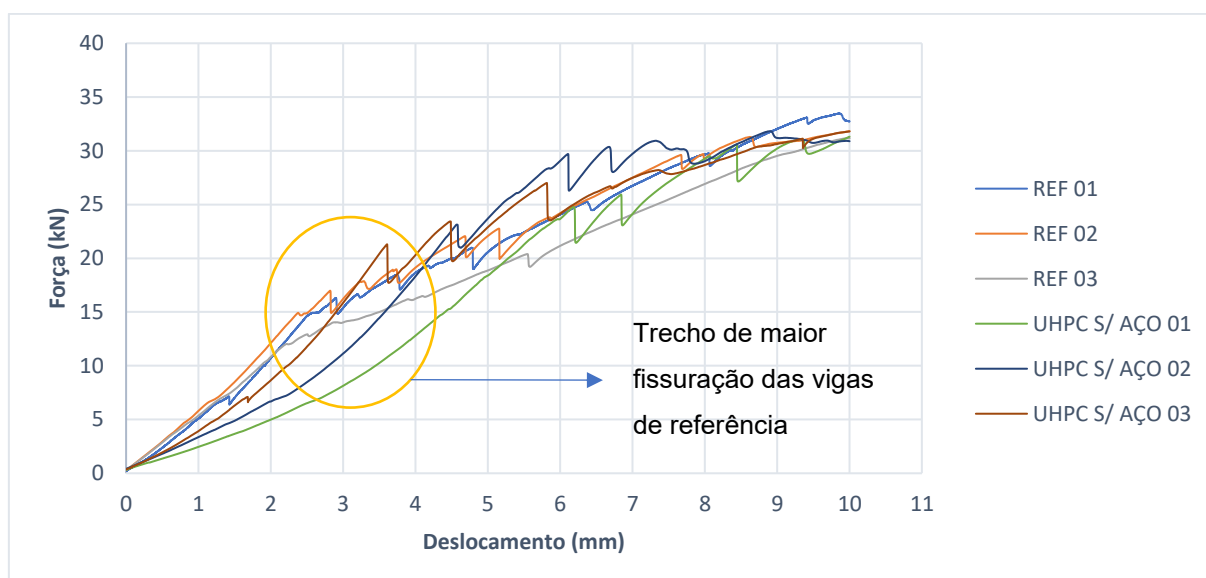


Fonte: Acervo pessoal do autor.

4.5 DESEMPENHO

As chapas de UHPC não armadas, quando aplicadas como reforço nas vigas, apresentaram um desempenho interessante em termos de fissuração nas fases iniciais de carregamento (Gráfico 14). As vigas reforçadas com estas chapas demonstraram menor fissuração nas primeiras aplicações de carga em comparação às vigas de referência, sugerindo um comportamento superior no estado limite de serviço (ELS).

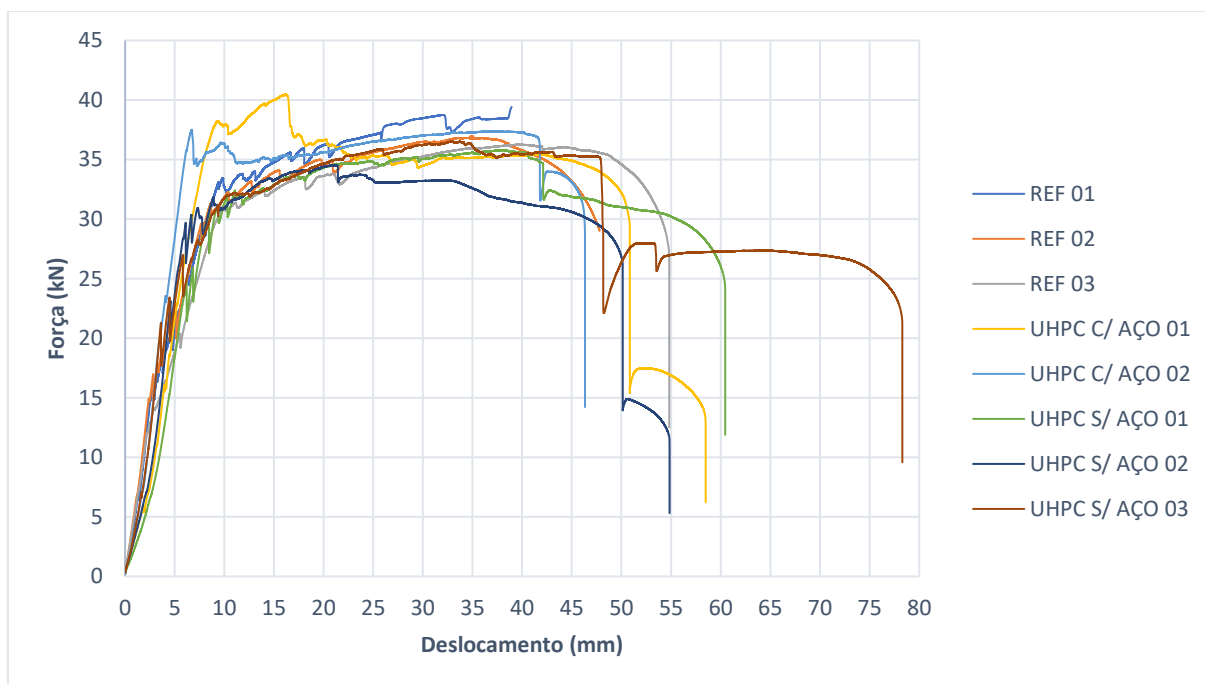
Gráfico 14 – Comparativo de comportamento entre as vigas de referência e as com reforço sem aço, em fase inicial de carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, as chapas de UHPC armadas se mostraram extremamente eficientes como solução de reforço externo à flexão em elementos de concreto armado. A introdução de armadura nas chapas, especialmente quando utilizada com baixo cobrimento, demonstrou ser uma alternativa altamente viável e eficaz, devido à baixíssima permeabilidade do UHPC. Esta característica do material protege a armadura interna contra a penetração de agentes agressivos, como água e íons cloreto, aumentando significativamente a durabilidade do sistema de reforço. Além disso, a presença de armadura nas chapas contribuiu para uma melhor distribuição das tensões ao longo do elemento reforçado, resultando em um comportamento mais dúctil e seguro sob condições de carregamento extremo, como pode ser verificado no Gráfico 15.

Gráfico 15 – Força x Deslocamento de todas as vigas ensaiadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando-se os dois gráficos apresentados, é interessante analisar que o comportamento das amostras é semelhante na fase elástica, porém com uma fissuração muito maior por parte das vigas de referência não reforçadas em relação às demais. Ao considerar que a fissuração é uma questão normativa importante a ser considerada na análise estrutural, verifica-se que até mesmo os reforços que não apresentaram bom comportamento à flexão garantem um desempenho melhor no estado limite de serviço.

O Gráfico 15 ainda mostra que as cargas máximas resistidas pelas vigas reforçadas com chapas de UHPC armadas são atingidas com deslocamentos baixos, diferentemente das demais vigas, que apresentam ganho de resistência na fase plástica.

Os Apêndices B e C mostram os cálculos e diagramas de esforço cortante e momento fletor, indicando que as vigas apresentaram um comportamento esperado e que, numericamente, as vigas reforçadas com finas camadas de UHPC possuem um potencial elevado de acréscimo de resistência.

As Tabelas 23 e 24 mostram o resumo dos resultados principais apresentados neste capítulo em relação às vigas ensaiadas.

Tabela 23 – Resumo dos resultados principais obtidos em cada amostra ensaiada

GRUPO	Deslocamento na carga máxima (mm)	Carga		
		Máxima (kN)	Primeira fissuração (kN)	Momento fletor (kN.m)
REFERÊNCIA 01	38,94	39,42	7,20	11,83
REFERÊNCIA 02	35,07	36,99	14,97	11,10
REFERÊNCIA 03	39,56	36,25	12,84	10,88
UHPC C/ AÇO 01	16,21	40,48	38,12	12,14
UHPC C/ AÇO 02	6,73	37,51	37,51	11,25
UHPC S/ AÇO 01	38,08	35,79	24,90	10,74
UHPC S/ AÇO 02	21,02	34,52	22,98	10,36
UHPC S/ AÇO 03	32,84	36,54	21,62	10,96

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 – Resumo dos resultados principais obtidos em cada amostra ensaiada

GRUPO	Deslocamento médio na carga máxima (mm)	Carga		
		Máxima média (kN)	Primeira fissuração média (kN)	Momento fletor médio (kN.m)
REFERÊNCIAS	37,86	37,55	11,67	11,27
UHPC C/ AÇO	11,47	39,00	37,82	11,70
UHPC S/ AÇO	30,65	35,62	23,17	10,69

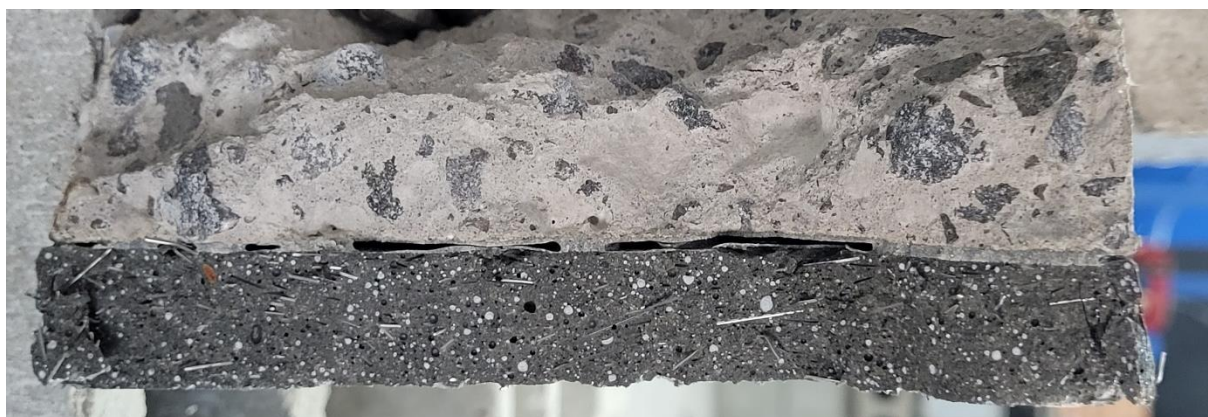
Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo que a carga máxima e os momentos fletores atingidos pelas amostras tenha sido praticamente semelhante, a carga média da primeira fissuração das vigas reforçadas com chapas de UHPC armadas (37,82 kN) representa 224,02% de aumento em relação às vigas de referência (11,67 kN). Já no caso da não adição de aço, as chapas de UHPC não-armadas apresentaram uma carga média da primeira fissuração (23,17 kN) equivalente a 98,54% superior ao resultado obtido pelas vigas de referência.

4.6 COLAGEM DAS CHAPAS

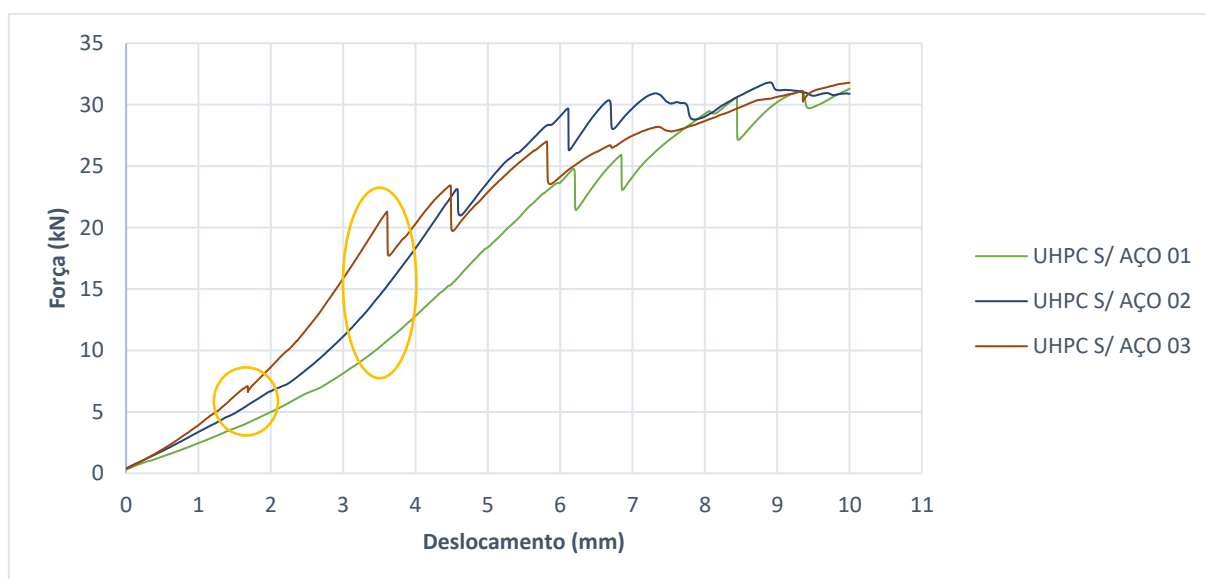
O processo de colagem requer cuidados rigorosos, pois falhas na adesão comprometem significativamente a eficiência do reforço. Em particular, as vigas que apresentaram falhas na colagem (Figuras 60 e 62) demonstraram um comportamento inicial de maior rigidez sob as cargas iniciais, quando comparadas às vigas não-reforçadas (Gráfico 16), mas tiveram desempenho inferior nas fases subsequentes em relação às vigas com reforço bem aderido (Figura 61), destacando a importância da integridade da interface adesiva.

Figura 60 – Falhas visíveis na colagem da chapa de reforço na amostra 03, que demonstrou maior fissuração em cargas iniciais dentro do grupo das reforçadas



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Gráfico 16 – Pontos de fissuração inicial na amostra 03, em virtude de má colagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61 – Colagem bem realizada na amostra 01, que apresentou melhor desempenho no estado limite de serviço do que a da figura anterior



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Figura 62 – Trinca vertical em viga, acima de trecho com má colagem da chapa



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Adicionalmente, foi observado um comportamento peculiar nas fissurações de cisalhamento. As fissuras desviaram dos pontos de furação destinados à inserção de chumbadores químicos, indicando que, quando corretamente aplicados, esses chumbadores representam pontos altamente confiáveis para a transmissão interna de cargas. Este fenômeno evidencia a importância de um controle rigoroso na execução dos furos e na aplicação do chumbador químico, garantindo que a conexão entre a chapa de UHPC e o concreto da viga seja eficaz e durável.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a eficiência do uso de chapas de *Ultra-High Performance Concrete* (UHPC) como sistema de reforço externo em vigas de concreto armado. Os resultados experimentais e análises realizadas demonstraram que a fixação das chapas de UHPC, dentro das concepções utilizadas neste trabalho, é eficiente na melhoria do desempenho estrutural das vigas submetidas às solicitações de flexão, principalmente em termos de aumento de rigidez.

Em relação à ligação entre viga e reforço, a utilização de chumbadores químicos e ancoragem mecânica se mostrou segura e eficiente, garantindo transferência de cargas de forma uniforme e evidenciando que uma boa escolha de materiais deve estar atrelada a uma execução bem-feita.

O uso de chapas de UHPC como sistema de reforço pode ser uma solução interessante para diversos tipos de vigas, como aquelas recém-concretadas que apresentam resistência à compressão mais baixa do que a especificada em projeto, proporcionando um aumento significativo na capacidade de carga sem comprometer a integridade estrutural, ou elementos que serão submetidos a cargas maiores para as quais foram inicialmente dimensionados. No entanto, é importante salientar que este tipo de reforço não é necessariamente indicado para elementos estruturais que devem suportar cargas extremamente elevadas ou que estão sujeitos a condições de serviço severas. A decisão pela aplicação do reforço deve ser tomada com base em uma avaliação detalhada das condições de serviço, da vida útil esperada e das exigências de desempenho da estrutura, garantindo assim a segurança e a durabilidade do sistema como um todo.

É fundamental destacar que o reforço de vigas com chapas de UHPC, apesar de sua comprovada eficiência, requer uma análise minuciosa das tensões de cisalhamento induzidas no elemento estrutural. Observou-se que, após a aplicação do reforço, as tensões de cisalhamento tendem a se intensificar, o que pode levar ao surgimento de fissuras diagonais e, em casos extremos, à falha por cisalhamento. Este fenômeno é particularmente crítico quando o reforço não é aplicado ao longo de toda a extensão do elemento, criando zonas de descontinuidade que funcionam como pontos de concentração de tensões. Portanto, a aplicação deste tipo de reforço deve ser acompanhada de uma análise estrutural detalhada, considerando não apenas os

ganhos em resistência à flexão, mas também os efeitos colaterais sobre o comportamento ao cisalhamento.

Em relação à análise estrutural, os cálculos realizados mostram que há grande possibilidade de se utilizar a camada externa de UHPC como uma segunda camada de armadura, desconsiderando a resistência à tração do concreto, mas utilizando de sua baixíssima permeabilidade para garantir que as armaduras desempenhem seu papel de forma conjunta com o aço já existente dentro do elemento estrutural a ser reforçado.

Desta forma, a dissertação contribui para o avanço do conhecimento técnico sobre o uso de materiais de alta performance em reforços estruturais, destacando tanto as potencialidades quanto as limitações do UHPC quando aplicado externamente em vigas de concreto armado. Os resultados aqui apresentados podem servir de base para futuras pesquisas e para a prática profissional, incentivando o uso consciente e eficiente de tecnologias inovadoras na engenharia estrutural.

Considerando as descobertas desta pesquisa, várias direções para estudos futuros podem ser exploradas. Um aspecto interessante seria a investigação do comportamento de vigas reforçadas com UHPC submetidas a condições ambientais adversas, como ciclos de congelamento e degelo, exposição a ambientes marinhos ou atmosferas industriais agressivas. Além disso, estudos que analisem a interação entre diferentes tipos de adesivos estruturais e chapas de UHPC podem revelar soluções ainda mais eficientes para a colagem e a transmissão de cargas. A modelagem numérica avançada, utilizando métodos como o Elemento Finitos (FEM), também pode contribuir para uma compreensão mais detalhada das tensões internas e dos mecanismos de falha.

Outra área promissora é a avaliação do desempenho de sistemas de reforço com UHPC em elementos submetidos a solicitações dinâmicas, como impactos ou cargas sísmicas. Estudos sobre o comportamento a longo prazo das ligações adesivas e das propriedades do UHPC sob carregamentos repetitivos também são essenciais para garantir a durabilidade e a segurança das estruturas reforçadas. Por fim, a exploração de combinações de materiais, como a utilização de fibras metálicas ou poliméricas no UHPC, pode abrir novas possibilidades para otimização do desempenho mecânico e da durabilidade do reforço estrutural.

Sabe-se também que uma das premissas da utilização das chapas de UHPC como reforço, principalmente quando comparadas aos reforços metálicos, é a sua

resistência ao fogo, entretanto pode parecer contraditória a indicação de barras roscadas para fixação mecânica das chapas. Assim sendo, se coloca como um interessante tema de estudo, a indicação de proteções a estes pontos de fixação, para dar ao sistema uma maior resistência ao fogo em situações críticas.

Essas direções de pesquisa têm o potencial de ampliar significativamente o conhecimento sobre o uso do UHPC em reforço estrutural, contribuindo para o desenvolvimento de soluções ainda mais eficazes e duráveis na engenharia civil.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-JABER, Hiba; GLISIC, Branko. **Monitoring of long-term prestress losses in prestressed concrete structures using fiber optic sensors**. Structural Health Monitoring, v. 18, n. 1, p. 254-269, 2019.
- AGUERO, R. R. et al. **Experimental study of concrete mixtures to produce UHPRC using sustainable brazilians materials**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, p. 766-789, 2019.
- AKHNOUKH, Amin K.; BUCKHALTER, Chelsea. **Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges**. Case Studies in Construction Materials, v. 15, p. e00559, 2021.
- ALEXANDER, Mark; BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Durability of concrete: design and construction**. CRC Press, 2017.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 239. **Ultra high performance concrete 2012** ACI Fall Convention. In: 2013, Toronto, Ontario, Canada. Anais... Toronto, Ontario, Canada.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Fios de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação, NBR 7483**. Rio de Janeiro, ABNT, 2020, 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação, NBR 7483**. Rio de Janeiro, ABNT, 2021, 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Barras, cordoalhas e fios de aço destinados a armaduras de protensão: método de ensaio de relaxação térmica, NBR 7483**. Rio de Janeiro, ABNT, 2021, 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, NBR 6118**. Rio de Janeiro, ABNT, 2024, 238p.
- BAJABER, M. A.; HAKEEM, I. Y. **UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review**. Journal of Materials Research and Technology, v. 10, p. 1058-1074, 2021.
- BASTOS, Paulo Sérgio. **Fundamentos do concreto protendido**. Bauru/SP: Universidade Estadual Paulista–UNESP, 2019.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London and New York: CRC Press, 2007.
- BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. **Patologia de estruturas**. Oficina de Textos, 2019.

BONOPERA, Marco; CHANG, Kuo-Chung; LEE, Zheng-Kuan. **State-of-the-art review on determining prestress losses in prestressed concrete girders**. Appl. Sci. 2020, 10, 7257. <https://doi.org/10.3390/app10207257>.

CARVALHO, Roberto Chust. **Estrutura em concreto protendido: cálculo e detalhamento**. São Paulo. Pini, 2012.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118: 2014**. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

CASAGRANDE, C. A. **Desempenho de microfibras de aço funconalizadas com silanos em concreto de ultra-alto desempenho reforçados com fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CHIN, Won Jong et al. **Flexural behavior of a precast concrete deck connected with headed GFRP rebars and UHPC**. Materials, v. 13, n. 3, p. 604, 2020.

CHRIST, Roberto. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. Tese de doutorado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, 2019.

CHRIST, Roberto; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. **Método de dosagem UNISINOS para UHPC**. CONCRETO & Construções, [s. l.], v. XLIX, n. 105, p. 30–33, 2022.

CHRIST, Roberto; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; PACHECO, Fernanda. **Estudo comparativo entre concretos de alto desempenho e compósitos cimentícios avançados**. Concreto e Construção - IBRACON, p. 72–76, 2011.

CORDEIRO, Tomás da Luz. **Estudo à flexão de vigas em BEAL reforçadas com UHPC**. 2019. Tese de Doutorado.

EL-TAWIL, Sherif et al. **Lab-Mixed versus Truck-Mixed UHPC—What's the Difference?**. Concrete International, v. 45, n. 1, p. 40-45, 2023.

ELSAYED, Mahmoud et al. **Behaviour of RC columns strengthened with Ultra-High Performance Fiber Reinforced concrete (UHPFRC) under eccentric loading**. Journal of Building Engineering, v. 47, p. 103857, 2022.

ENAMI, Rodrigo Mazia. **Reforço de pilares curtos de concreto armado por encamisamento com concreto de ultra-alto desempenho**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FANG, Zhi; TIAN, Xin; PENG, Fei. **Flexural strength of prestressed Ultra-High-Performance concrete beams**. Engineering Structures, v. 279, p. 115612, 2023.

FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; WALRAVEN, J.; LEUTBECHER, T.; FROHLICH, S. **Ultra-High Performance Concrete UHPC: fundamentals, design, examples**. Ernst & Sohn. 2014.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto com fibras de aço**. EPUSP. São Paulo, 2000.

HABER, Z. B.; VARGA, I. D. L.; GRAYBEAL, B. A.; NAKASHOJI, B.; EL-HELOU, R. **Properties and behavior of UHPC-Class materials**. FHWA-HRT-18-036. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Estados Unidos da América, 2018.

HUANG, Yishuo et al. **Reinforced concrete beams retrofitted with UHPC or CFRP**. Case Studies in Construction Materials, v. 17, p. e01507, 2022.

KANG, S. T.; KIM, J. K. **Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution**. Construction and Building Materials, v. 28, n. 1, p. 57–65, 2012.

KHAN, Muhammad Irfan et al. **Seismic behavior of beam-column joints strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete**. Composite Structures, v. 200, p. 103-119, 2018.

KHODAYARI, Abbas et al. **Experimental Study of Reinforced Concrete T-Beam Retrofitted with Ultra-High-Performance Concrete under Cyclic and Ultimate Flexural Loading**. Materials, v. 16, n. 24, p. 7595, 2023.

KODSY, Antony; MORCOUS, George. **Shear strength of ultra-high-performance concrete (UHPC) beams without transverse reinforcement: Prediction models and test data**. Materials, v. 15, n. 14, p. 4794, 2022.

KRENTOWSKI, Janusz R. **Assessment of destructive impact of different factors on concrete structures durability**. Materials, v. 15, n. 1, p. 225, 2021.

LIMA, Expedito Fernando Soares de Souza et al. **Recuperação estrutural de vigas de concreto armado**. 2020.

LIMA, Felipe Pedrosa de et al. **Fluência em concretos de ultra-alto desempenho: modelos de previsão e simulação computacional**. 2020.

LOEWE, M. S.; LLOVERA, J. C. **The four ages of early prestressed concrete structures**. PCI Journal, v. Fall, p. 93–121, 2014.

MAHAINI, Zin et al. **Experimental and numerical study of the flexural response of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) beams reinforced with GFRP**. Composite Structures, v. 315, p. 117017, 2023.

MANSOUR, Walid et al. **Bond behavior between concrete and prefabricated ultra high-performance fiber-reinforced Concrete (UHPFRC) plates**. Structural Engineering and Mechanics, v. 81, n. 3, p. 305-316, 2022.

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

MAZZÚ, Amanda Duarte Escobal. **Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto**. 2020.

MCTIC - Ministério Da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 4º Edição. 90 P. 2017.

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

MURTHY, A. Ramachandra et al. **Fatigue behaviour of damaged RC beams strengthened with ultra high performance fibre reinforced concrete**. International Journal of Fatigue, v. 116, p. 659-668, 2018.

MUSARAT, Muhammad Ali; WESAM Salah Alaloul; AHSEN Maqsoom; ABDUL Hannan Qureshi. **The effect of inflation rate on CO₂ emission: a framework for malaysian construction industry**. Sustainability 2021, 13, 1562.

MIRDAN, Dhafer; SALEH, Abdul Ridah. **Flexural performance of reinforced concrete (RC) beam strengthened by UHPC layer**. Case Studies in Construction Materials, v. 17, p. e01655, 2022.

NAGIB, Mohammed T. et al. **Cyclic behaviour of squat reinforced concrete shear walls strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete**. Engineering Structures, v. 246, p. 112999, 2021.

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

PAUL, Suvash Chandra; VAN ZIJL, Gideon PAG; ŠAVIJA, Branko. **Effect of fibers on durability of concrete: A practical review**. Materials, v. 13, n. 20, p. 4562, 2020.

PIMENTEL, Mário; SINE, Aurélio; NUNES, Sandra. **Resistência ao corte de vigas e lajes reforçadas com uma camada de UHPFRC**. CONSTRUCT – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2022.

POKORNÝ, Petr et al. **Effect of elevated temperature on the bond strength of prestressing reinforcement in uhpc**. Materials, v. 13, n. 21, p. 4990, 2020.

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, [s. l.], 2015.

RUSSELL, H. G.; GRAYBEAL, B. A. **Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art. Report for the Bridge Community**. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Estados Unidos da América, 2013.

SAID, Asmaa et al. **Using ultra-high performance fiber reinforced concrete in improvement shear strength of reinforced concrete beams**. Case Studies in Construction Materials, v. 16, p. e01009, 2022.

SALAHADDIN, Sevar Dilkhaz; HAIDO, James H.; WARDEH, George. **The behavior of UHPC containing recycled glass waste in place of cementitious materials: A comprehensive review**. Case Studies in Construction Materials, v. 17, p. e01494, 2022.

SCHACHINGER, Ingo et al. **Effect of curing temperature at an early age on the long-term strength development of UHPC**. In: 2nd international symposium on ultra high performance concrete. Kassel University Kassel, Germany, 2008. p. 205-213.

SILVA, Adriano Rodrigues da. **Avaliação da influência do confinamento e da adição de fibras metálicas na resistência e ductilidade de pilares curtos produzidos com concreto de ultra alto desempenho**. 2022.

SIM, Chungwook et al. **Flexural design of precast, prestressed ultra-high-performance concrete members**. PCI Journal, v. 65, n. 6, 2020.

SOUZA, Guilherme de; LORENA, Lia Lorena; AVILA, Ana Elisabete Paganelli Guimarães. **Análise comparativa de emissão de CO₂ e consumo de energia entre o concreto convencional e o UHPC**. [s.l.: s. n.], 2021.

SOUZA, Vicente Custodio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. Pini, 1998.

SZYDŁOWSKI, Rafał Stanisław; ŁABUZEK, Barbara. **Experimental evaluation of shrinkage, creep and prestress losses in lightweight Aggregate concrete with sintered fly ash**. Materials, v. 14, n. 14, p. 3895, 2021.

TAVARES, M. G. **Simulação da perda de protensão aderente em elementos de concreto**. 2020. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

TORREGROSA, Esteban Camacho. **Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties**. 2013. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA Dosage, [s.l.], 2013.

VAN DAMME, Henri. **Concrete material science: Past, present, and future innovations**. Cement and concrete research, v. 112, p. 5-24, 2018.

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

WANG, Xinpeng et al. **Design of sustainable ultra-high performance concrete: A review**. Construction and Building Materials, v. 307, p. 124643, 2021.

WARNOCK, R. **Flexural behavior of steel-fibre reinforced reactive powder concrete beams**. 2005. UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES, [s. l.], 2005.

WEI, Jie et al. **Impact resistance of ultra-high performance concrete strengthened reinforced concrete beams**. International Journal of Impact Engineering, v. 158, p. 104023, 2021.

XIONG, Xueyu et al. **Experimental Study on Seismic Performance of Precast Pretensioned Prestressed Concrete Beam-Column Interior Joints Using UHPC for Connection**. Materials, v. 15, n. 16, p. 5791, 2022.

YANG, Jian et al. **Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review**. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), v. 9, n. 3, p. 363-387, 2022.

YOO, Doo-Yeol et al. **Size effect in ultra-high-performance concrete beams**. Engineering Fracture Mechanics, v. 157, p. 86-106, 2016.

ZHANG, Yang et al. **Experimental validation of damaged reinforced concrete beam strengthened by pretensioned prestressed ultra-high-performance concrete layer**. Engineering Structures, v. 260, p. 114251, 2022.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DO UHPC

Tabela 25 – Granulometria dos materiais utilizados nas chapas de UHPC

Ø (µm)	% TOTAL PASSANTE ACUMULADA			
	Ø (µm)	Ø (µm)	Ø (µm)	Ø (µm)
	Cimento CP V	Areia Média	Sílica Ativa	Areia Fina
4760,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2380,00	100,00	99,98	100,00	100,00
1200,00	100,00	99,90	100,00	100,00
1000,00	100,00	99,02	100,00	99,89
704,00	100,00	97,71	100,00	99,73
592,00	100,00	97,21	100,00	99,67
497,80	100,00	89,04	100,00	99,49
418,60	100,00	82,17	100,00	99,34
352,00	100,00	76,40	100,00	99,21
296,00	100,00	71,54	100,00	99,10
248,90	100,00	50,57	100,00	79,72
209,30	100,00	32,95	100,00	63,42
176,00	100,00	18,12	100,00	49,72
148,00	100,00	5,66	100,00	38,20
124,50	100,00	2,59	100,00	17,47
104,70	100,00	1,18	100,00	7,98
88,00	100,00	0,54	100,00	3,65
74,00	100,00	0,25	100,00	1,67
62,20	99,66	0,11	100,00	0,76
52,30	99,16	0,05	100,00	0,35
44,00	98,40	0,02	100,00	0,16
37,00	97,20	0,01	100,00	0,07
31,10	95,24	0,00	100,00	0,03
26,20	92,00	0,00	100,00	0,01
22,00	86,83	0,00	100,00	0,00
18,50	79,25	0,00	100,00	0,00
15,60	69,45	0,00	100,00	0,00
13,10	58,24	0,00	100,00	0,00
11,00	47,72	0,00	100,00	0,00
9,25	37,65	0,00	100,00	0,00
7,78	28,60	0,00	100,00	0,00
6,54	20,64	0,00	100,00	0,00
5,50	14,02	0,00	100,00	0,00
4,62	8,97	0,00	100,00	0,00
3,89	5,43	0,00	100,00	0,00
3,27	3,11	0,00	100,00	0,00
2,75	1,64	0,00	100,00	0,00
2,31	0,73	0,00	100,00	0,00

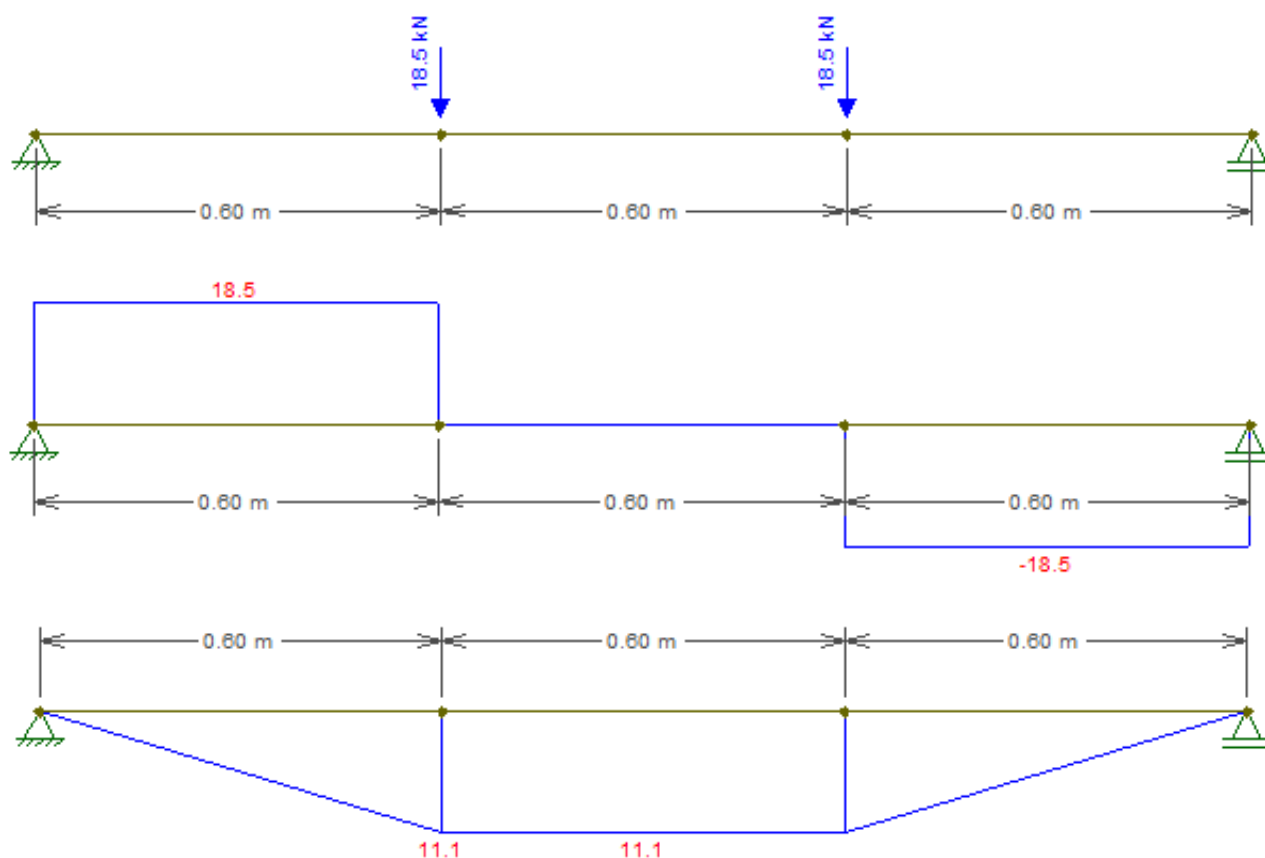
1,94	0,18	0,00	99,59	0,00
1,64	0,00	0,00	98,96	0,00
1,38	0,00	0,00	98,32	0,00
1,16	0,00	0,00	97,72	0,00
0,97	0,00	0,00	96,93	0,00
0,82	0,00	0,00	95,07	0,00
0,69	0,00	0,00	83,29	0,00
0,58	0,00	0,00	75,40	0,00
0,49	0,00	0,00	57,40	0,00
0,41	0,00	0,00	44,65	0,00
0,34	0,00	0,00	37,37	0,00
0,29	0,00	0,00	31,08	0,00
0,24	0,00	0,00	23,67	0,00
0,20	0,00	0,00	15,79	0,00
0,17	0,00	0,00	9,41	0,00
0,15	0,00	0,00	5,05	0,00
0,12	0,00	0,00	2,34	0,00
0,10	0,00	0,00	0,85	0,00
0,09	0,00	0,00	0,15	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS VIGAS REFERÊNCIA

Serão apresentados os diagramas de esforços cortantes e momentos fletores obtidos a partir de carregamentos previamente estabelecidos, e os resultados da análise estrutural realizada antes da realização dos ensaios das vigas de referência. Foi utilizada a carga de 37 kN, aplicada em 2 pontos, sendo esta a carga máxima média suportada pelas vigas ensaiadas na pesquisa

Figura 63 – Reações e gráficos de momento fletor e esforço cortante para cálculo das vigas de referência, considerando aplicação de carga igual a 37 kN



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26 – Cálculos e resultados dos esforços de flexão

FLEXÃO			
Resistência de cálculo do concreto $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	$f_{cd} =$	30	MPa
Resistência de cálculo do aço $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	$f_{yd} =$	500	MPa
Altura útil:	d =	16.6	cm

Altura útil superior:	$d' =$	3.32	cm
Linha neutra Limite $y_{lim} = 0,45 \cdot 0,8 \cdot d$	$y_{lim} =$	9	cm
Momento Fletor Limite $M_{d,lim} = \frac{0,85 \cdot f_{cd} \cdot Largura \cdot y_{lim} \cdot (d - 0,5 \cdot y_{lim})}{100}$	$M_{d,lim} =$	31.11	kN.m
Taxa de Armadura de Mínima:	$\rho_{min} =$	0.15	%
Armadura de Mínima: $A_{s,min} = \rho_{min} \cdot h \cdot b$	$A_{s,min} =$	0.45	cm ²
Armadura lateral Mínima: $A_{s,min} = 0,001 \cdot h \cdot b$	$A_{s,lat,min} =$	0	cm ² /face
Altura da linha neutra para cálculo $y = d \left(1 - \sqrt{1 - \frac{M_d}{0,425 f_{cd} \cdot b_w \cdot d^2}} \right)$	$y =$	1.85	cm
Altura da linha neutra real $x = y/0,8$	$x =$	2.31	cm
Cálculo da área de aço Superior: $A_{s,Sup} = \frac{M_d - M_{d,lim}}{f_{yd} \cdot (d - d')}$	$A_{s,Sup} =$	0	cm ²
Cálculo da área de aço Inferior: $A_{s,Inf} = \left(\frac{0,85 f_{cd} \cdot b_w}{f_{yd}} \cdot y \right) + A_{s,Sup}$	$A_{s,Inf} =$	1.42	cm ²
Armadura inferior adotada:	$A_{s,Inf,ad} =$	1,01 (2Ø8)	cm ²
Armadura superior adotada:	$A_{s,Inf,ad} =$	0,62 (2Ø6.3)	cm ²
Momento Resistente Característico	MRk	8,01	kN.m

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 27 – Cálculos e resultados dos esforços de cisalhamento

CISALHAMENTO			
Força resistente de cálculo: $V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$	$V_{Rd2} =$	177.49	kN
$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right)$	$\alpha_{v2} =$	0.88	
Resistência à tração média do concreto: $f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$	$f_{ct,m} =$	2.9	MPa
Resistência à tração na flexão do concreto: $f_{ct,d} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$	$f_{ct,d} =$	2.03	MPa
Parcela resistida pelo concreto: $V_{co} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$	$V_{co} =$	30.29	kN
Parcela resistida pelo aço: $V_{sw} = V_{sd} - V_{co} \geq 0$	$V_{sw} =$	0	kN

Área de aço calculada: $A_{sw} = \frac{V_{sw}}{0,9 \cdot f_{ywd} \cdot b_w \cdot d}$	$A_{sw} =$	0	cm ² / m
Área de aço mínima: $A_{sw,min} = 0,2 \cdot \frac{f_{ctm} \cdot b_w \cdot \sin \alpha}{f_{ywk}}$	$A_{sw,min} =$	2	cm ² / m

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 28 – Cálculos e resultados dos esforços de torção

TORÇÃO			
Força resistente de cálculo: $T_{Rd2} = 0,5 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot A_e \cdot h_e \cdot \sin 90$	$T_{Rd2} =$	9.52	kN
Área de núcleo: $A_e = (b - h_e) \cdot (h - h_e)$	$A_e =$	168.37	cm ²
Distância da face até o centro da armadura:	$c1 =$	3.4	cm
Área de concreto: $A = b \cdot h$	$A =$	300	cm ²
Perímetro Externo: $U = b \cdot 2 + h \cdot 2$	$U =$	70	cm
Espessura fictícia: $2c1 \leq h_e \leq A/U$	$h_e =$	4.29	cm
Perímetro no eixo da espessura fictícia: $U_e = (b - h_e) \cdot 2 + (h - h_e) \cdot 2$	$u_e =$	52.86	cm
Armadura longitudinal mínima: $A_{sl,min} = 0,2 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{ywk}} \cdot h_e \cdot u_e$	$A_{sl,min} =$	0.3	cm ² / m
Armadura transversal mínima: $A_{90,min} = 0,2 \cdot \frac{f_{ctm} \cdot b}{f_{ywk}} \cdot 100$	$A_{90,min} =$	1.74	cm ² / m / face
Armadura dos estribos: $A_{s,90} = \frac{T_{sd}}{2 \cdot A_e \cdot f_{ywd}}$	$A_{s,90} =$	0	cm ² / m / face
Armadura longitudinal: $A_{sl} = \frac{T_{sd}}{2 \cdot A_e \cdot f_{ywd}}$	$A_{sl} =$	0.3	cm ² / m
Armadura inferior e superior calculada: $A_{s,sup,inf} = A_{sl} \cdot (b_w - h_e)$	$A_{s,sup,inf} =$	0.03	cm ²
Armadura lateral calculada: $A_{s,lat,tor} = A_{sl} \cdot (h - h_e)$	$A_{s,lat,tor} =$	0	cm ²
Efeito combinado – Torção + Cisalhamento: $\pi = \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} + \frac{T_{Sd}}{T_{Rd}}$	$\pi =$	0.1	≤ 1

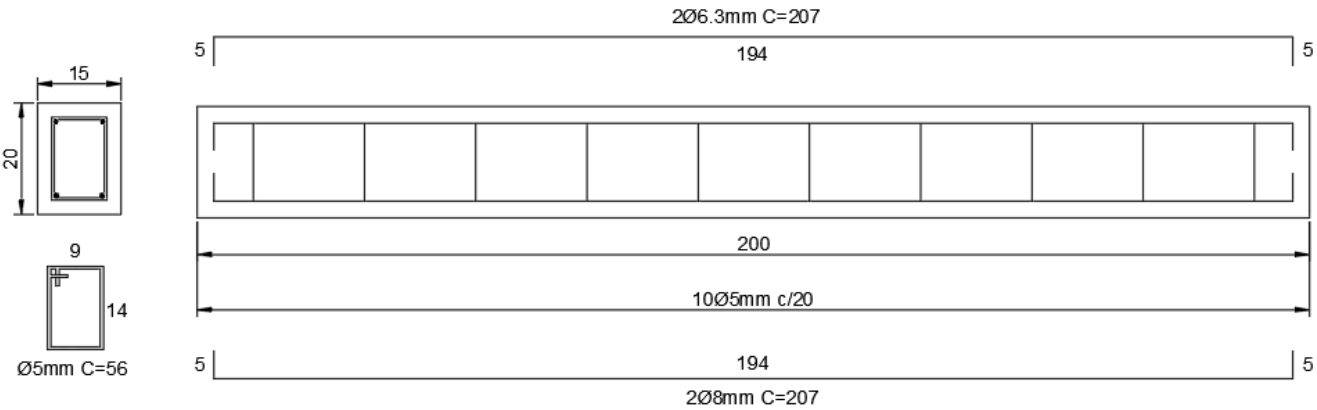
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29 – Resumo dos resultados

RESUMO			
Armadura inferior total: $A_{s,Inf,tot} = A_{s,Inf} + A_{s,sup,inf}$	$A_{s,Inf,tot} =$	1.42	cm ²
Armadura superior total: $A_{s,Sup,tot} = A_{s,Sup} + A_{s,sup,inf}$	$A_{s,Sup,tot} =$	0	cm ²
Armadura inferior adotada:	$A_{s,Inf,ad} =$	1,01 (2Ø8)	cm ²
Armadura superior adotada:	$A_{s,Inf,ad} =$	0,62 (2Ø6.3)	cm ²
Armadura lateral total: $A_{s,lat,tot} = \text{Maior}(A_{s,lat,tor} ; A_{s,lat,min})$	$A_{s,lat,tot} =$	0	cm ² / face
Armadura transversal (estribos) total: $A_{sw,tot} = A_{sw} + A_{s,90}$	$A_{s,sw,tot} =$	0	cm ² / m
Número de ramos de estribos		2	
Espaçamento adotado dos estribos:	c/	20	cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 64 – Detalhamento das armaduras das vigas



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS VIGAS REFORÇADAS

Serão apresentados os resultados da análise realizada antes da realização dos ensaios das vigas reforçadas com UHPC armado. Para isso considerou-se a eficiente adesão do reforço à viga e a armadura do reforço como a primeira camada da viga.

Tabela 30 – Cálculos e resultados dos esforços de flexão

FLEXÃO			
Resistência de cálculo do concreto $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	$f_{cd} =$	30	MPa
Resistência de cálculo do aço $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$	$f_{yd} =$	500	MPa
Altura útil:	$d =$	18.13	cm
Altura útil superior:	$d' =$	3.32	cm
Linha neutra Limite $y_{lim} = 0,45 \cdot 0,8 \cdot d$	$y_{lim} =$	10.13	cm
Momento Fletor Limite $M_{d,lim} = \frac{0,85 \cdot f_{cd} \cdot Largura \cdot y_{lim} \cdot (d - 0,5 \cdot y_{lim})}{100}$	$M_{d,lim} =$	37.13	kN.m
Taxa de Armadura de Mínima:	$\rho_{min} =$	0.15	%
Armadura de Mínima: $A_{s,min} = \rho_{min} \cdot h \cdot b$	$A_{s,min} =$	0.51	cm ²
Armadura lateral Mínima: $A_{s,min} = 0,001 \cdot h \cdot b$	$A_{s,lat,min} =$	0	cm ² /face
Altura da linha neutra para cálculo $y = d \left(1 - \sqrt{1 - \frac{M_d}{0,425 f_{cd} \cdot b_w \cdot d^2}} \right)$	$y =$	1.68	cm
Altura da linha neutra real $x = y / 0,8$	$x =$	2.1	cm
Cálculo da área de aço Superior: $A_{s,Sup} = \frac{M_d - M_{d,lim}}{f_{yd} \cdot (d - d')}$	$A_{s,Sup} =$	0	cm ²
Cálculo da área de aço Inferior: $A_{s,Inf} = \left(\frac{0,85 f_{cd} \cdot b_w \cdot y}{f_{yd}} \right) + A_{s,Sup}$	$A_{s,Inf} =$	1.28	cm ²
Armadura inferior adotada:	$A_{s,Inf,ad} =$	3,36 (3Ø10 + 2Ø8)	cm ²
Armadura superior adotada:	$A_{s,Sup,ad} =$	0,62 (2Ø6.3)	cm ²
Momento Resistente Característico	$MR_k =$	26,78	kN.m

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 31 – Cálculos e resultados dos esforços de cisalhamento

CISALHAMENTO			
Força resistente de cálculo: $V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$	$V_{Rd2} =$	193.87	kN
$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$	$\alpha_{v2} =$	0.88	
Resistência à tração média do concreto: $f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$	$f_{ct,m} =$	2.9	MPa
Resistência à tração na flexão do concreto: $f_{ct,d} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$	$f_{ct,d} =$	2.03	MPa
Parcela resistida pelo concreto: $V_{co} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d$	$V_{co} =$	33.09	kN
Parcela resistida pelo aço: $V_{sw} = V_{sd} - V_{co} \geq 0$	$V_{sw} =$	0	kN
Área de aço calculada: $A_{sw} = \frac{V_{sw}}{0,9 \cdot f_{ywd} \cdot b_w \cdot d}$	$A_{sw} =$	0	cm ² / m
Área de aço mínima: $A_{sw,min} = 0,2 \cdot \frac{f_{ctm} \cdot b_w \cdot \sin \alpha}{f_{ywk}}$	$A_{sw,min} =$	2	cm ² / m

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 32 – Cálculos e resultados dos esforços de torção

TORÇÃO			
Força resistente de cálculo: $T_{Rd2} = 0,5 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot A_e \cdot h_e \cdot \sin 90$	$T_{Rd2} =$	11.23	kN
Área de núcleo: $A_e = (b - h_e) \cdot (h - h_e)$	$A_e =$	189	cm ²
Distância da face até o centro da armadura:	$c1 =$	3.5	cm
Área de concreto: $A = b \cdot h$	$A =$	337.5	cm ²
Perímetro Externo: $U = b \cdot 2 + h \cdot 2$	$U =$	75	cm
Espessura fictícia: $2c1 \leq h_e \leq A/U$	$h_e =$	4.5	cm
Perímetro no eixo da espessura fictícia: $U_e = (b - h_e) \cdot 2 + (h - h_e) \cdot 2$	$u_e =$	57	cm
Armadura longitudinal mínima: $A_{sl,min} = 0,2 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{ywk}} \cdot h_e \cdot u_e$	$A_{sl,min} =$	0.34	cm ² / m
Armadura transversal mínima: $A_{90,min} = 0,2 \cdot \frac{f_{ctm} \cdot b}{f_{ywk}} \cdot 100$	$A_{90,min} =$	1.74	cm ² / m / face

Armadura dos estribos: $A_{s,90} = \frac{T_{sd}}{2 \cdot A_e \cdot f_{ywd}}$	$A_{s,90} =$	0	cm ² / m / face
Armadura longitudinal: $A_{sl} = \frac{T_{sd}}{2 \cdot A_e \cdot f_{ywd}}$	$A_{sl} =$	0.34	cm ² / m
Armadura inferior e superior calculada: $A_{s,sup,inf} = A_{sl} \cdot (b_w - h_e)$	$A_{s,sup,inf} =$	0.04	cm ²
Armadura lateral calculada: $A_{s,lat,tor} = A_{sl} \cdot (h - h_e)$	$A_{s,lat,tor} =$	0	cm ²
Efeito combinado – Torção + Cisalhamento: $\pi = \frac{V_{sd}}{V_{Rd}} + \frac{T_{sd}}{T_{Rd}}$	$\pi =$	0.1	≤ 1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 33 – Resumo dos resultados

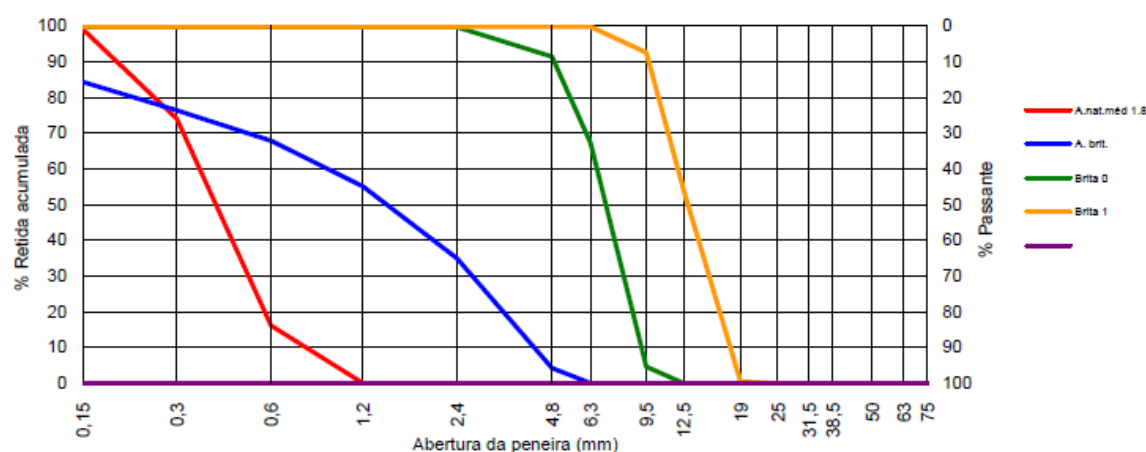
RESUMO			
Armadura inferior total: $A_{s,Inf,tot} = A_{s,Inf} + A_{s,sup,inf}$	$A_{s,Inf,tot} =$	1.28	cm ²
Armadura superior total: $A_{s,Sup,tot} = A_{s,Sup} + A_{s,sup,inf}$	$A_{s,Sup,tot} =$	0	cm ²
Armadura inferior adotada:	$A_{s,Inf,ad} =$	3,36 (3Ø10 + 2Ø8)	cm ²
Armadura superior adotada:	$A_{s,Inf,ad} =$	0,62 (2Ø6.3)	cm ²
Armadura lateral total: $A_{s,lat,tot} = \text{Maior}(A_{s,lat,tor} ; A_{s,lat,min})$	$A_{s,lat,tot} =$	0	cm ² / face
Armadura transversal (estribos) total: $A_{sw,tot} = A_{sw} + A_{s,90}$	$A_{s,sw,tot} =$	0	cm ² / m
Número de ramos de estribos		2	
Espaçamento adotado dos estribos:	c/	20	cm

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DAS VIGAS

Figura 65 – Granulometria dos materiais utilizados no concreto das vigas

		RELATÓRIO DE ENSAIO ANÁLISE DE AGREGADOS							
Peneira (mm)	% Retida				% Retida acumulada				
	A.nat.méd 1.8	A. brit.	Brita 0	Brita 1	A.nat.méd 1.8	A. brit.	Brita 0	Brita 1	
75									
63									
50									
37,5									
31,5									
25									
19				0				0	
12,5				54				54	
9,5			5	38			5	93	
6,3			63	7			67	100	
4,8		4	24			4	91	100	
2,4		31	8			35	100	100	
1,2		20				55	100	100	
0,6	16	13			16	68	100	100	
0,3	58	9			74	76	100	100	
0,15	25	8			99	84	100	100	
Fundo		16	0	0	100	100	100	100	
Módulo de finura					1,89	3,23	5,95	6,92	
Dimensão máxima característica (mm)					1,2	4,8	9,5	19,0	
Pulverulento (< 0,075 mm) (%)						8,2	0,3	0,2	
Material fino (< 0,30 mm) (%)					26	24	0	0	
Massa específica (g/cm ³)					2,63	2,88	2,88	2,88	
Massa unitária (kg/m ³)									
Absorção (%)									



Fonte: Fornecido por Concresul.