

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

JOSIANI FATIMA BETENCOURT

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO SUBSTRATO E DA
AUSÊNCIA DE ANCORAGEM NO REFORÇO DE VIGAS SUBMETIDAS AO
CISALHAMENTO UTILIZANDO MANTA DE FIBRA DE CARBONO**

**São Leopoldo/RS
2025**

JOSIANI FATIMA BETENCOURT

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO SUBSTRATO E DA
AUSÊNCIA DE ANCORAGEM NO REFORÇO DE VIGAS SUBMETIDAS AO
CISALHAMENTO UTILIZANDO MANTA DE FIBRA DE CARBONO**

Dissertação apresentada como requisito parcial 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
Coorientador: Prof. Dr. Roberto Christ

São Leopoldo/RS
2025

B562a

Betencourt, Josiani Fatima.

Análise da influência das características do substrato e da ausência de ancoragem no reforço de vigas submetidas ao cisalhamento utilizando manta de fibra de carbono / Josiani Fatima Betencourt. – 2025.

91 f. : il. ; 30 cm.

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

“Orientador(a): Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Coorientador: Prof. Dr. Roberto Christ”.

1. Manta de fibra de carbono. 2. Ancoragem. 3. Reforço.
4. Polímeros reforçados com fibra. 5. Cisalhamento. 6. Vigas. 7. Concreto armado. 8. Resistência.I. Titulo.

CDU 624.012.45

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster Ditbenner – CRB 10/2517)

Dedico este trabalho aos meus pais, por terem
me ensinado que o conhecimento liberta.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, sempre em primeiro lugar, por nunca me deixar esmorecer e ser meu alicerce em todos os momentos, principalmente diantes da dificuldade em conciliar trabalho e estudo.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram a estudar e procurar meu caminho, me criaram para o mundo mas com a certeza de que, se precisar, sempre terei para onde voltar e com quem contar.

Ao meu marido, meus melhores amigos e família, que sempre apoiaram e entenderam minha inquietude diante das coisas e minha vontade de buscar sempre o próximo degrau. Entenderam minhas ausências sem jamais me julgar. Além disso, aos meus grandes amigos que o mestrado trouxe, sem eles teria sido muito mais difícil.

Ao meu orientador, Bernardo Fonseca Tutikian, o qual escolhi com muito carinho e admiração, com o desejo de um dia ser pelo menos metade do profissional que ele é. Do mesmo modo, meu coorientador, Roberto Christ, excelente profissional que me guiou em todos os momentos, além de ser também um grande exemplo para minha carreira.

À Quartzolit, que patrocinou o material para oportunizar os ensaios com a manta de fibra de carbono, em especial o instrutor técnico, Wagner Costa, que se deslocou até o itt Performance para realizar a colagem de um lote de reforços e me ensinou todo o procedimento com cortesia e bom humor.

A Unisinos foi um sonho realizado para mim e não poderia deixar de agradecer aos demais professores mas, principalmente, à equipe do itt Performance, todos futuros profissionais incríveis que abraçaram meus ensaios, entenderam minhas urgências e me ajudaram e ensinaram ao longo dos meses.

No meio do percurso perdi minha companheira de vida, minha poodle Summer, que esteve comigo em todos os momentos desde minha primeira faculdade. A minha mais dolorosa despedida e um amor eterno. Agora resta apenas a Mabel, minha outra filha de quatro patas, e não poderia encerrar sem agradecer a essas duas pequenas e incríveis criaturas que nunca me deixaram só, mesmo quando dormiam ao meu lado enquanto eu estudava e trabalhava por horas a fio.

A todos, meu eterno agradecimento!

RESUMO

O presente trabalho estuda a utilização de manta de fibra de carbono, sem ancoragem, para o reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado, avaliando, com isso, o impacto ocasionado por possíveis falhas de colagem da manta. A manta de fibra de carbono possui características que incluem alta resistência à tração, à corrosão, alta durabilidade e facilidade de instalação, se mostrando como uma excelente alternativa para reforços estruturais, principalmente em casos de limitações arquitetônicas. Para desenvolver a pesquisa, a revisão bibliográfica foi feita de modo a aprofundar os conhecimentos quanto às características dos polímeros reforçados com fibras, suas propriedades para uso como reforço estrutural, além de técnicas de projeto e detalhamento. A etapa experimental consistiu na fabricação de 04 lotes de vigas de concreto armado, com três vigas em cada, todas com a mesma configuração de armadura longitudinal e transversal. O primeiro lote foi utilizado como referência enquanto os demais receberam o reforço, sendo um lote com o reforço colado pela equipe da Quartzolit e os demais com erros forçados de colagem, para avaliar o desempenho de modo comparativo com as demais. O ensaio foi o de flexão em três pontos com carga deslocada, de modo a conduzir o rompimento para um cisalhamento, analisando, ainda, a deformação, deslocamentos e padrão de fissuração em cada elemento ensaiado. Os resultados obtidos demonstraram que as vigas reforçadas com erro forçado de colagem obtiveram resultados até 101,55% superiores à média das vigas de referência, enquanto outros elementos, apesar de apresentarem incremento na resistência, obtiveram resultados inferiores. Além disso, observou-se uma alteração no padrão de fissuração e modo de ruptura quando comparados com as vigas de referência onde todos os rompimentos se deram por tração diagonal. A partir dos resultados obtidos, restou evidente a importância do preparo adequado da viga que irá receber o reforço como também da utilização de dispositivos de ancoragem, visto que algumas falhas ocorreram por destacamento da manta junto às bordas. Ainda assim, este estudo evidenciou a eficiência da manta de fibra de carbono como reforço estrutural ao cisalhamento, comprovando sua eficácia dentre os materiais disponíveis na engenharia civil.

Palavras-chave: Manta de fibra de carbono; Ancoragem; Reforço; Polímeros reforçados com fibra; Cisalhamento; Vigas; Concreto Armado; Resistência.

ABSTRACT

The present study investigates the use of carbon fiber sheets, without anchorage, for the shear strengthening of reinforced concrete beams, thereby assessing the impact caused by potential bonding failures of the sheet. Carbon fiber sheets exhibit characteristics such as high tensile strength, corrosion resistance, durability, and ease of installation, making them an excellent alternative for structural strengthening, especially in cases of architectural constraints. To develop this research, a literature review was conducted in order to deepen the understanding of fiber-reinforced polymers, their properties for use as structural reinforcement, as well as design and detailing techniques. The experimental phase consisted of the fabrication of four batches of reinforced concrete beams, with three beams in each batch, all with the same longitudinal and transverse reinforcement configuration. The first batch was used as a reference, while the others were strengthened: one batch was bonded by the Quartzolit team, and the remaining ones had intentional bonding defects introduced, in order to evaluate their performance in comparison with the others. The test carried out was a three-point bending test with an offset load, designed to induce shear failure. Deformation, displacements, and crack patterns were also analyzed in each tested element. The results showed that beams strengthened with intentional bonding defects achieved values up to 101.55% higher than the average of the reference beams, whereas other elements, despite showing increased strength, yielded lower results. Furthermore, changes in crack patterns and failure modes were observed when compared to the reference beams, where all failures occurred by diagonal tension. Based on the results obtained, the importance of proper preparation of the beam to be strengthened, as well as the use of anchorage devices, became evident, since some failures were caused by sheet debonding along the edges. Nevertheless, this study highlighted the efficiency of carbon fiber sheets as shear reinforcement, confirming their effectiveness among the materials available in civil engineering.

Keywords: Carbon fiber sheet; Anchorage; Strengthening; Fiber-Reinforced Polymers; Shear; Beams; Reinforced Concrete; Strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de tiras ou lâminas de fibra de carbono	23
Figura 2 – Manta de fibra de carbono.....	23
Figura 3 – Estrutura interfacial do compósito de fibra de carbono	25
Figura 4 – Tipos de falha do reforço colado externamente em vigas de concreto armado.....	29
Figura 5 – Modos de ruptura devido à perda de aderência do PRF	30
Figura 6 – Ruptura com descolamento interfacial na zona de ancoragem.....	30
Figura 7 – Ruptura devido à força de ancoragem na primeira fissura de cisalhamento.	31
Figura 8 – Destacamento do cobrimento pela fissura próxima à extremidade.....	31
Figura 9 – Diagrama tensão x deformação de diferentes PRF (PRFC = fibra de carbono; PRFA = aramida; PRFV = fibra de vidro) e o aço.....	33
Figura 10 – Possíveis modos de falha em uma viga de concreto	41
Figura 11 – Aplicações de reforço com PRFC – (a) manualmente com tecido impregnado ou (b) colagem de lâminas.	42
Figura 12 – Modelo clássico da treliça de Mörsch.....	43
Figura 13 – Contribuição do PRF para o cisalhamento.....	45
Figura 14 – Variáveis dimensionais utilizadas nos cálculos de reforço ao cisalhamento	46
Figura 15 – FRP cruzando a fissura devido ao cortante	51
Figura 16 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	53
Figura 17 – Planta baixa e corte da forma das vigas.	54
Figura 18 – Seção transversal e detalhamento da armadura das vigas ensaiadas ..	54
Figura 19 – Forma com armadura (a) e após a concretagem (b).....	56
Figura 20 – Corpos-de-prova (a) e cura das vigas com geotêxtil (b).....	57
Figura 21 – Esquema de armadura e aplicação de reforço nas vigas.....	59
Figura 22 – Esquema de reforço U90 (a) e U0 (b)	60
Figura 23 – Delimitação e preparo do Adesivo Tix (a) e aplicação no substrato com uso de desempenadeira (b).....	60
Figura 24 – Corte da manta na dimensão desejada (a) e aplicação do impregnante após colagem do reforço (b).....	61
Figura 25 – Lixamento das vigas (a) e reforço à flexão e cisalhamento colados (b).....	61

Figura 26 – Exemplo de uma das vigas instrumentadas com os LVDT's.....	62
Figura 27 – Ensaio de resistência ao cisalhamento.	63
Figura 28 – Ruptura da viga V2 por cisalhamento.	69
Figura 29 – Detalhe da ruptura da VER_02 e o descolamento da manta.	70
Figura 30 – Detalhe da ruptura da VER_01 e o rompimento da armadura.	71
Figura 31 – Detalhe da ruptura da VER_03.	72
Figura 32 – Detalhe da ruptura da VER_04.	72
Figura 33 – Detalhe da ruptura da VC_01.....	73
Figura 34 – Viga VER_05 após rompimento: observa-se a manta “enrugada”, com descolamento em vários pontos e o destacamento junto à fissura crítica.....	80
Figura 34 – Granulometria dos materiais utilizados no concreto das vigas.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado.....	19
Quadro 2 – Comparativo entre o sistema pré-curado e curado in situ	32
Quadro 3 – Comparativo entre modo de ruptura x volume de fibras e deformação última.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas das resinas utilizadas como matrizes	26
Tabela 2 – Efeitos da exposição contínua à água na durabilidade do PRFC.....	38
Tabela 3 – Parâmetros para a lei bilinear de aderência	52
Tabela 4 – Nomenclatura das vigas para ensaio	55
Tabela 5 – Carta de traço do concreto	56
Tabela 6 – Propriedades e características Manta Fiber C	58
Tabela 7 – Propriedades e características Adesivo Tix Fiber C	58
Tabela 8 – Propriedades e características Adesivo Impregnante Fiber C.....	59
Tabela 9 – Resultado dos ensaios de resistência ao cisalhamento	66
Tabela 10 – Comparativo entre as vigas de melhor desempenho e a V3	77

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
fib	Fédération Internationale du Béton
PRF	Polímero reforçado com fibra
PRFC	Polímero reforçado com fibra de carbono

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Tema	14
1.2 Delimitação do tema	14
1.3 Problema	15
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo geral	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
1.5 Justificativa	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Reforços em estruturas de concreto armado	19
2.1.1 Tipos de reforços estruturais	20
2.2 Polímeros reforçados com fibra (PRF)	22
2.2.1 Matriz e interface	24
2.2.2 Ligação entre reforço e substrato	27
2.2.3 Modos de ruptura	29
2.3 Reforço de estruturas com PRF	31
2.3.1 Propriedades mecânicas	34
2.3.2 Umidade	36
2.3.3 Alta temperatura	38
2.3.4 Aplicação em elementos sob ação de corrosão	39
2.4 Dimensionamento do reforço ao cisalhamento	40
2.4.1 Definições de projeto	43
3 METODOLOGIA	53
3.1 VIGAS DE CONCRETO ARMADO	53
3.2 REFORÇO AO CISALHAMENTO	58
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
4.1 AVALIAÇÃO DE CARGAS, DESLOCAMENTOS OBTIDOS E MODOS DE RUPTURA	65
4.1.1 Cargas e modo de ruptura	68
4.1.2 Deslocamentos e deformações das vigas	74
4.1.3 Comportamento do reforço	76
5 CONCLUSÕES	83
ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DAS VIGAS	91

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade de estruturas de concreto tem se tornado tema recorrente de pesquisas, visto a quantidade de obras mais antigas que apresentam sinais de deterioração e funcionalidade comprometida, sendo necessário pensar em intervenções que possam reabilitar ou reforçar os elementos existentes para que a demolição não seja a única alternativa (KARBHARI e ZHAO, 2000).

Independentemente da idade da edificação, a vida útil resta comprometida quando ações de manutenção não são mais viáveis técnica ou economicamente. As estruturas são afetadas em grande parte pela corrosão de armaduras, por mudanças na utilização dos edifícios – uma estrutura projetada para cargas residenciais transformada em uma academia ou biblioteca por exemplo – por erros na concepção do projeto; ou pela deterioração natural de uma edificação que não recebe manutenções (MHANNA et al., 2021).

Segundo Santo et al. (2022), quando os elementos estruturais de concreto armado são submetidos ao esforço de cisalhamento, a ruptura ocorre de forma frágil, sendo que a armadura transversal (estribo) é utilizada para tentar combater esse esforço e aumentar a resistência e ductilidade da peça. Porém, nem sempre a armadura bem posicionada pode ser suficiente para resistir aos esforços e sobrecargas atuantes, principalmente em casos onde ocorrem situações inesperadas, como uma sobrecarga não prevista em projeto ou necessidade de aumento de capacidade portante da estrutura, ou ainda, pela ação de agentes de deterioração, fazendo com que um reforço seja necessário.

Wu e Eamon (2017) apontam que, conforme a gravidade da deficiência que a estrutura apresenta, podem ser necessárias diferentes ações corretivas. Métodos tradicionais para reforço de uma estrutura sob ação de cisalhamento podem incluir o aumento da seção, com incremento de armaduras, ou a colocação de chapas de aço parafusadas nas laterais, na região dos apoios de vigas, por exemplo. Contudo, estes métodos tradicionais apresentam certas limitações, como restrições de projetos arquitetônicos, que impedem o aumento da seção do elemento, a própria questão estética, que envolve a exposição de chapas de aço, ou mesmo a possibilidade de corrosão destas chapas, passando a comprometer a eficácia do reforço, trazendo novos problemas à estrutura reforçada.

Com isso, o uso de compósitos de polímeros reforçados com fibra ganhou espaço, principalmente como alternativa aos métodos tradicionais de reforço externo, surgindo como uma resposta à necessidade de reparo e reabilitação de estruturas de concreto, visto suas inúmeras vantagens, que incluem alta resistência à tração, à corrosão, alta durabilidade e facilidade de instalação (BENJEDDOU et al., 2007).

A primeira utilização dos compósitos data dos anos 80, na Suíça, onde os primeiros ensaios foram executados com a intenção de substituição de chapas de aço coladas com epóxi por compósitos de fibra de carbono. A primeira obra com laminados de fibra de carbono foi executada em 1991, mediante o reforço da Ponte Ibach em Lucerna, na Suíça, passando a utilizar de forma sistêmica, após diversos testes de reforços, a partir de 1995 (HOLLOWAY, 2004 apud MENON, 2008).

O Japão foi o país responsável pela elaboração das primeiras normas para utilização destes compósitos como reforços de concreto. Complementarmente, a norma americana, com guias para o projeto, foi publicada em 1997. Ainda, boletins técnicos foram disponibilizados pelo *American Concrete Institute* (ACI), em 1996, pelo Comitê 440, atualizando, em 2002, de modo a melhorar as recomendações para projetos e técnicas de construção com materiais compósitos como reforço. Por sua vez, a *Fédération Internationale du Béton* (fib) publicou o primeiro boletim técnico, em 2001, tornando-se referência europeia com seu boletim 14 (Menon, 2008).

O Brasil ainda não possui uma norma técnica publicada para o uso de compósitos como reforço. Portanto, as normas internacionais são referência para estudos destes materiais no país.

Apesar de inúmeras pesquisas relevantes sobre o tema, o uso para reforço ao cisalhamento ainda apresenta literatura mais escassa do que o reforço de elementos à flexão e se tratando de uma ruptura mais brusca e praticamente sem aviso, a falha por cisalhamento se torna mais crítica para os elementos estruturais, a exemplo de vigas de concreto armado, que é o foco do presente trabalho. Além disso, a avaliação da falha de colagem também é um assunto pouco abordado nos trabalhos técnicos, sendo importante a análise sob o ponto de vista do quanto uma eventual falha no processo pode comprometer a eficácia do sistema.

1.1 Tema

Apesar de internacionalmente reconhecido, o reforço de elementos estruturais ao cisalhamento com utilização de manta de fibra de carbono ainda possui um número reduzido de trabalhos no âmbito nacional, sendo que ainda não há uma norma técnica publicada no Brasil. Desse modo, a literatura brasileira é composta, basicamente, pela ficha técnica de produtos e alguns poucos exemplares publicados sobre o tema, sendo importante ampliar o conhecimento e as pesquisas sobre a utilização de materiais compósitos e seu desempenho enquanto reforço estrutural.

Considerando ainda algumas lacunas no estudo dos modos de falha por descolamento do reforço sem a utilização de dispositivos adicionais para ancoragem da manta de fibra de carbono ao elemento reforçado, o tema deste trabalho aborda a influência do método de colagem da manta de carbono, sem ancoragem, no reforço de vigas de concreto armado quando submetidas ao cisalhamento.

A relevância do tema se dá na importância de avaliar as condições de aplicação do reforço in situ, investigando esses mecanismos para ampliar a compreensão sobre como as diferentes formas de colagem podem impactar na transferência de esforços entre o elemento e o reforço aplicado.

1.2 Delimitação do tema

Este trabalho foi desenvolvido com as seguintes delimitações:

- a) Dimensionamento de vigas em concreto armado com armadura mínima para o esforço cortante e reforço na flexão;
- b) Moldagem das vigas em 04 lotes, sendo 03 vigas de referência, 03 vigas com o reforço colado conforme orientação do fabricante da manta e dois lotes de 03 vigas cada com erros de colagem na manta, totalizando 12 vigas com concreto f_{ck} 30 MPa;
- c) Aplicação do reforço com manta de fibra de carbono em forma de "U" junto aos apoios, na região de maior esforço cortante.

1.3 Problema

Qual a influência do método empregado para a colagem de manta de carbono e da qualidade da mão de obra no reforço de vigas de concreto armado sob esforço de cisalhamento?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é analisar a influência do método empregado na colagem de mantas de carbono no reforço de vigas submetidas ao esforço de cisalhamento, sem ancoragem.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) analisar o comportamento das vigas com aplicação do reforço com manta de carbono em “U” na região dos apoios, submetendo ao esforço de cisalhamento no ensaio de resistência ao cisalhamento;
- b) comparar as cargas obtidas em cada lote de viga com o resultado das vigas de referência;
- c) analisar os deslocamentos obtidos para cada reforço aplicado;
- d) analisar de modo comparativo o tipo de ruptura para cada lote de viga ensaiado.

1.5 Justificativa

Recentemente, a ausência de manutenções preventivas, de inspeções de forma regular, alterações de uso de edificações, além de erros de projeto e até mesmo a alteração de normas após o dimensionamento de determinadas estruturas, são alguns dos motivos que trouxeram à tona as questões voltadas para o reforço e recuperação de elementos estruturais (Dalfré, 2022).

Além disso, a deterioração de edificações, elementos estruturais, pontes e demais construções pode ser atribuída não apenas ao envelhecimento, mas à falta de manutenção, à degradação que se impõe pelo meio em que estão inseridas, à falha na concepção de projeto e/ou de construção, ou até mesmo aos desastres naturais (fib 14, 2001).

De acordo com essas situações, Helene (1992) complementa que o concreto, para ser durável, depende de manutenções programadas e que as manifestações patológicas, por vezes de intensidade significativa, podem comprometer não apenas os aspectos estéticos do elemento, mas a capacidade resistente, podendo acarretar um colapso parcial ou mesmo total da estrutura. Ainda, a forma de agir perante as manifestações patológicas também demonstra um descaso, onde se observa que os reparos, às vezes, são meramente superficiais ou o extremo oposto, com demolições ou aplicação de reforços injustificados.

Assim, visto que a durabilidade das estruturas está atrelada às ações de manutenção, levando em conta todas as condições de entorno, as técnicas atuais para recuperação e reforço de estruturas devem ser empregadas de modo a garantir a vida útil de projeto do elemento, evitando intervenções desproporcionais e buscando estudar materiais alternativos que possam ser aplicados para solucionar as mais diversas manifestações patológicas que, eventualmente, atingem as estruturas.

De acordo com Täljsten (2003), a partir de 1993, a utilização de compósitos na construção civil, em especial para reforço de estruturas, apresentou um rápido crescimento, com vários estudos desenvolvidos no intuito de compreender o comportamento das estruturas de concreto reforçadas com polímeros reforçados com fibras.

Os polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) são materiais que ganharam popularidade no reforço de estruturas de concreto por serem compósitos leves, de alta resistência à corrosão, fáceis de aplicar, altamente resistentes que, em geral, alteram minimamente as dimensões originais de pilares e vigas (WU e EAMON, 2017).

Além disso, o reforço poderá ser aplicado em diferentes elementos de concreto armado, como lajes, vigas, pilares e paredes, substituindo principalmente as chapas metálicas que, apesar de proporcionar bons resultados, apresentam a possibilidade de corrosão do aço com consequente perda de capacidade e aderência, limitação do

comprimento implicando na realização de emendas e dificuldade do manuseio, dependendo da dimensão (Fortes et al., 2023).

Apesar de apresentar pontos positivos significativos, algumas desvantagens no uso de PRFC incluem o custo do material que, em comparação ao aço, é relativamente alto, em caso de incêndio a sua exposição a altas temperaturas pode causar degradação precoce e o colapso, visto que as lâminas ou mantas são coladas com resinas epóxi que sofrem mudanças de propriedades entre 45° e 70°C (fib 14, 2001). Outro fator a ser considerado é que a degradação, ao longo do tempo, altera e afeta várias propriedades, inclusive o modo de ruptura dominante do elemento. Isso significa que uma estrutura reforçada ao cisalhamento com lâmina ou manta de PRFC colada poderia romper abruptamente por flexão, passando de um modo de ruptura frágil para um modo de ruptura dúctil. As falhas possíveis, nesse caso, incluíram o escoamento da armadura de tração ocorrendo antes do esmagamento do concreto ou da ruptura do PRF, caracterizando uma falha dúctil (WU; EAMON, 2017).

Contudo, com relação ao alto custo, Täljsten (2003) aponta que a comparação simples de preços unitários entre as soluções não é a mais adequada. Segundo o autor, quando a instalação é incluída nessa comparação de custos, o PRFC pode competir com materiais convencionais, uma vez que seu baixo peso reduz os valores de transporte, além de apresentar uma vantagem significativa no que diz respeito ao ciclo de vida.

Até o momento não existem normas técnicas no Brasil que se destinem ao projeto e execução de reforços com PRFC, sendo a normatização internacional e o trabalho de alguns pesquisadores os norteadores dos estudos. Ainda segundo Täljsten (2003), deve-se levar em conta que a ruptura por cisalhamento é um mecanismo complexo e será ainda mais complicado quando um material de reforço for adicionado ao concreto. A falha nesse caso começa, comumente, com flexão e cisalhamento que, combinados, desenvolvem as fissuras características de cisalhamento.

Triantafillou (1998) já destacava que deveriam ser expandidos os estudos experimentais em vigas reforçadas com PRFC ao cisalhamento, analisando também o desempenho no longo prazo.

Ainda, existem casos em que se faz necessário aumentar a capacidade portante de uma estrutura, seja pela alteração de uso, seja por falhas relacionadas à concepção do projeto e, para que seja possível reforçar, as condições do elemento

são fatores relevantes. No caso da utilização de reforços com PRFC, Dalfré (2022) alerta que o elemento deve ser inspecionado para verificar condições preexistentes, a exemplo do efeito da carbonatação, ataque de íons cloreto, além de irregularidades e imperfeições no elemento de concreto, fissuras e mesmo condições mais avançadas de uma corrosão de armaduras, de modo a garantir as condições do substrato e evitar situações de falha de aderência do sistema de reforço, devido a um processo de deterioração.

Com isso, considerando esse cenário, bem como a importância do aprofundamento dos estudos experimentais visando a melhoria da prática, percebe-se um vasto campo a ser explorado no que se refere à utilização destes compósitos, sendo que o presente estudo se justifica, propondo verificar pontos específicos como a forma de colagem e a influência do preparo do substrato na aderência e ganho de capacidade resistente em vigas de concreto submetidas ao cisalhamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Reforços em estruturas de concreto armado

A ciência que estuda a origem, os mecanismos, sintomas e natureza das doenças é a *patologia*, sendo o estudo daquilo que se desvia das condições normais ou esperadas de algo, apoiando-se em exames e inspeções para compreensão e remediação do defeito percebido. Correlacionando com a engenharia civil, a patologia das construções pode ser definida como a ciência que estuda os defeitos incidentes em materiais, componentes e elementos ou na edificação como um todo, entendendo as origens, mecanismos, evoluções e formas de manifestação (BOLINA et al., 2019).

Assim, enquanto a patologia é uma ciência, chamam-se “manifestações patológicas” as anomalias que são visíveis num elemento construtivo, podendo surgir na forma de fissuras, manchas, deformações, escorrimientos etc. A partir da análise das manifestações patológicas, se faz necessário entender os mecanismos para corretamente determinar a intervenção, pois, uma medida inadequada não apenas permitirá que o processo patológico permaneça ativo, como poderá potencializá-lo e tornar a intervenção mais onerosa do que o devido, sendo importante conhecer as alternativas de recuperação para cada caso (BOLINA et al., 2019).

As diversas possíveis causas que podem ocasionar o surgimento de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado estão resumidas no Quadro 1:

Quadro 1 – Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado

Fase	Causas estimadas
Projeto e concepção da estrutura	Falhas de dimensionamento, erros de cálculo; Falha na compatibilidade entre as disciplinas de projeto; Especificação inadequadas de materiais; Falha no detalhamento; Falta de padronização das representações.
Execução	Falta de experiência/capacitação dos profissionais; Deficiência na confecção de fôrmas e escoramentos; Deficiência no posicionamento e quantidade de armaduras; Baixa qualidade de materiais e componentes; Baixa qualidade do concreto.
Uso da estrutura	Uso inadequado da estrutura em relação à sua concepção; Ausência de manutenções preventivas.

Fonte: Adaptado de Beber (2003).

As estruturas de concreto armado dependem de manutenções preventivas para garantir sua vida útil, além de uso adequado em conformidade com a sua concepção. Em contrapartida, algumas situações acarretam sobrecargas para as quais a estrutura não fora projetada, ou a ocorrência de incidentes envolvendo colisões e explosões que causam danos permanentes nos elementos de concreto armado que, no passado, faziam com que essas estruturas fossem abandonadas ou simplesmente destruídas (ALEKSEENKO et al., 2021).

O reforço ou reparo nas estruturas de concreto começou a surgir como uma ideia de manter os elementos estruturais que poderiam ser “salvos”, sem que para isso fosse necessário demolir a estrutura (ALEKSEENKO et al., 2021).

Corrobora com isso os apontamentos de Benjeddou et al. (2007) que mencionam a necessidade de encontrar técnicas de reparos adequadas, tanto em termos de custo quanto de tempo de processamento, visto que as estruturas de concreto armado podem apresentar fissuras, grandes deflexões, deslocamentos de concreto – que configuram deteriorações da estrutura, além de efeitos oriundos do envelhecimento, corrosão do aço, impactos e ações naturais como terremotos e efeitos ambientais.

Ainda, considerando estruturas de concreto, Karbhari e Zhao (2000) entendem como estratégias de renovação a reabilitação ou a substituição dos elementos, onde a reabilitação engloba o reparo, o reforço ou o *retrofitting*.

O reparo de uma estrutura envolve a correção de um defeito estrutural ou funcional, não objetivando, necessariamente, o restabelecimento das condições de resistência originais. O reforço, por sua vez, caracteriza-se por oferecer à estrutura uma elevação de desempenho, aumentando sua resistência ou rigidez. Por fim, o termo *retrofitting* é empregado para as ações de restaurar o elemento, mantendo suas características originais, porém adaptando às necessidades atuais de modo a aumentar sua resistência e ductilidade, melhorando sua capacidade de deformação (KARBHARI; ZHAO, 2000; BEBER, 2003).

2.1.1 Tipos de reforços estruturais

Dentre as possibilidades de reforço estrutural, os mais comuns, de acordo com Dalfré (2022), incluem:

- a) **Aumento de seção transversal:** indicado em situações em que o concreto apresenta danos e a estrutura necessita incremento na capacidade de carga e rigidez, é efetuado através de adição de armadura e aumento da seção com uso de graute. As desvantagens podem incluir limitações arquitetônicas, tempo de execução e cura e o aumento do peso próprio do elemento.
- b) **Chapa de aço colada com epóxi:** as chapas ou perfis colados na superfície de concreto propiciam o reforço sem o viés do aumento da seção transversal do elemento. Em contrapartida, a possibilidade de corrosão do aço, principalmente na região do adesivo que compromete significativamente a aderência, o peso das chapas e perfis que podem dificultar o posicionamento e instalação na peça, a necessidade de escoramento durante o processo de fixação e mesmo as questões estéticas, visto que o reparo é externo e aparente, acarretam desvantagens na utilização do método, apesar de consistir em um método bastante tradicional de reforço (DALFRÉ, 2022;BEBER, 2003).
- c) **Protensão externa:** é um método relativamente simples que consiste em aumentar a capacidade portante dos elementos através da aplicação da protensão na parte externa do elemento, não havendo dificuldades para realizar o cobrimento dos cabos de cordoalha, além de possibilitar inspeções e reposições de cabos conforme necessidade. As desvantagens incluem a vulnerabilidade em situações de incêndio, além da possibilidade de corrosão eletroquímica ou mesmo o vandalismo, uma vez que é um sistema externo que pode ficar aparente (BEBER, 2003).
- d) **Materiais compósitos:** os polímeros reforçados com fibra (PRF) estão ganhando espaço na construção civil nos últimos anos, visto suas características de elevada resistência à tração, neutralidade eletromagnética, resistência à corrosão, possibilidade de adaptação do módulo de elasticidade, além de baixo peso próprio e facilidade na aplicação, não requerendo a alteração das dimensões dos elementos.

2.2 Polímeros reforçados com fibra (PRF)

Os polímeros reforçados com fibra (PRF) são compósitos relativamente novos quando comparados aos materiais de construção convencionais, sendo utilizados de forma versátil também, devido ao seu baixo peso, na aviação, indústria automotiva, marinha e construção civil, com inúmeras possibilidades de aplicação como reforço (WU; EAMON, 2017; RASHEED, 2014).

Para a produção dos PRF, as fibras disponíveis de acordo com fib (2019) são as de carbono (PRFC), vidro (PRFV), aramida (PRFA), basalto (PRFB) e as fibras de aço.

Segundo Souza e Ripper (1998), a utilização de compósitos de fibras de carbono teve início na indústria aeronáutica, naval, aeroespacial e automobilística, como um reforço de alto desempenho, passando a ser objeto de estudo para reforço de estruturas após a ameaça de um violento sismo no distrito de Kanto, no Japão, levando o governo japonês a tomar decisões para preparar as construções existentes.

Ainda de acordo com Souza e Ripper (1998), foi após um abalo sísmico em Kobe no Japão, em 1995, que essa tecnologia ganhou desenvolvimento e importantes passos foram dados na busca de alternativas duráveis, resistentes e cada vez mais simples para reabilitação de estruturas de concreto armado.

Conforme fib (2001), os desenvolvimentos recentes relacionados a materiais, métodos e técnicas de reforço têm sido enormes e, com isso, o uso de compósitos de polímero reforçado com fibras é visto como algo “novo” e altamente promissor na indústria da construção. Assim, esses materiais podem ser ofertados na forma de tiras unidirecionais finas – com espessura na ordem de 1mm, fabricadas pelo processo de pultrusão (Figura 1), ou, por mantas flexíveis (Figura 2), feitas de fibra em uma ou duas direções, muitas vezes pré-impregnadas por resinas:

Figura 1 – Exemplo de tiras ou lâminas de fibra de carbono



Fonte: fib 35 (2006).

Figura 2 – Manta de fibra de carbono



Fonte: fib 35 (2006).

De acordo com Fortes et al. (2023, p.3), “[...] o FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) se configura como uma matriz polimérica com reforço de fibras contínuas, que podem ser de vidro, carbono ou aramida, que devem apresentar durabilidade à agressividade do ambiente [...]. Ainda, estas matrizes devem apresentar características adequadas de fluência, além de atender a resistência em estado de tensão constante.

As fibras de vidro, segundo Dalfré (2022), podem ser classificadas conforme sua composição química, sendo as fibras de vidro tipo “S” as mais resistentes e com módulo de elasticidade mais elevado que as do tipo E, sendo a escolha da fibra condicionada ao uso esperado. São utilizadas em substituição ou reforço às armaduras de aço devido ao custo relativamente baixo combinado com alta resistência mecânica, porém apresentam um módulo de elasticidade baixo em comparação às fibras de carbono e aramida, além de baixa resistência à umidade, sendo suscetíveis à ruptura por fluência.

Por sua vez, as fibras de aramida apresentam vantagens como a baixa densidade, condutibilidade elétrica e retração, porém tendem a se degradar quando expostas aos raios ultra-violetas, além de não apresentar uma boa relação custo-benefício (DALFRÉ, 2022).

Considerando a fibra de carbono, com relação à fabricação, Fortes et al. (2023) apontam que a matéria prima utilizada para a fibra de carbono é o *pitch* ou o PAN, sendo a primeira através do alcatrão ou alcatrão de hulha, em um processo de extrusão em finos orifícios, e, a segunda, produzida a partir da poliacrilonitrila, que é submetida a diferentes tratamentos térmicos para sua carbonização.

Segundo Dalfré (2022), a fabricação inclui a conformação da matéria-prima, pelo processo de extrusão, na forma de laminados, barras ou perfis. Por sua vez, as fibras são impregnadas em tanque de resina para então serem esticadas e moldadas em matriz aquecida, conformando e curando a resina.

Os compósitos são constituídos, basicamente, de 50% a 70% de volume de fibra para os laminados e 25% a 50% de fibra para os sistemas moldados *in situ*, sendo as fibras responsáveis pela tração do sistema, enquanto a matriz, além de manter as fibras unidas, é responsável pela distribuição de tensões entre elas, protegendo as fibras e transferindo a tensão da estrutura para o compósito (FORTES et al., 2023).

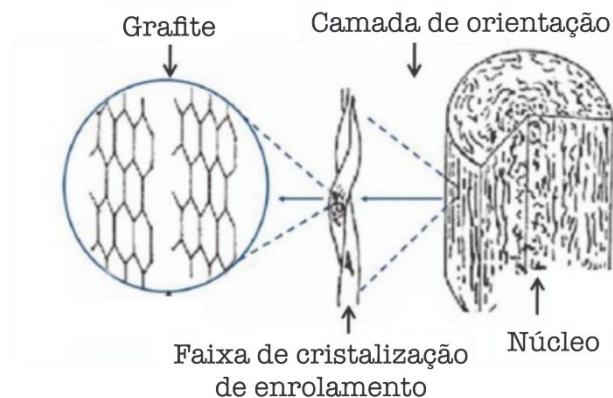
2.2.1 Matriz e interface

Segundo Liu et al. (2020, p.3), “a fibra de carbono possui mais de 95% de carbono, obtida por meio da carbonização e grafitização em alta temperatura da poliacrilonitrila, piche, fio de viscose ou fibra fenólica em uma atmosfera inerte”, largamente utilizada para materiais compósitos devido à sua alta resistência, resistência à corrosão e condutividade térmica. É um compósito de duas fases, considerando a fibra como material de reforço e o polímero como matriz. Durante a moldagem do PRFC, ocorrem efeitos químicos de cristalização e de tensão térmica entre as fibras de carbono e os polímeros, sendo que seu desempenho, juntamente com a microestrutura interfacial, é a chave para a sinergia dos compósitos.

Ainda segundo Liu et al. (2020), estudos apontam que a fibra de carbono tem distintas características do “núcleo de pele”, onde, conforme Figura 3, o núcleo interno é composto por camadas de desordem microcristalinas de grafite em pequena escala,

que aumentam gradativamente até a camada superficial e seu arranjo também se ordenam progressivamente. De acordo com Zheng et al. (2022), as características da camada superficial incluem, portanto, um arranjo compacto do grafite microcristalino, na direção da fibra, o que resulta na ausência de átomos de carbono ativos e baixa energia superficial.

Figura 3 – Estrutura interfacial do compósito de fibra de carbono



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2020).

De acordo com Fortes et al. (2023), a matriz do PRF é comumente um polímero termofixo, podendo ser, alternativamente, um polímero termoplástico ou uma argamassa cimentícia. Desse modo, a matriz exerce influência significativa sobre diversas propriedades mecânicas dos compósitos. A seleção adequada do material para compor a matriz do sistema PRF exige que se considere os seguintes fatores: temperatura de fusão ou cura, viscosidade e reatividade com as fibras. Ainda, as matrizes poliméricas mais utilizadas incluem o epóxi, o poliéster e o vinil éster.

As resinas podem ser classificadas em resinas termorrígidas e termoplásticas, sendo as termorrígidas as mais comumente utilizadas (RASHEED, 2014). As resinas termorrígidas apresentam custo mais baixo, baixa viscosidade e permitem a total imersão das fibras, impregnando-as sem necessidade de altas temperaturas (MENON, 2008; RASHEED, 2014). Segundo Menon (2008), o que caracteriza as resinas termoplásticas é a presença de macromoléculas mais lineares, permitindo a fusão após o aquecimento e endurecem ao resfriar, se solidificando numa forma plástica, porém a alta viscosidade acaba por prejudicar a impregnação de fibras mais longas, o que prejudica a fabricação de compósitos.

Desse modo, as resinas mais utilizadas para os PRF são as termorrígidas, por oferecer melhor estabilidade térmica e química quando comparadas às resinas termoplásticas (MENON, 2008).

São consideradas resinas termorrígidas as resinas epóxi, poliéster, éster vinílico, bismaleimida e poliimida, sendo as três primeiras as mais utilizadas e todas com boa resistência química (fib 14, 2001). Comparando as resinas mais utilizadas, as resinas epóxi são as que apresentam maiores vantagens, devido à sua excelente resistência à tração, boa resistência química, a solventes e à fluência, apresentando forte adesão com as fibras e retração baixa no período de cura. Como desvantagem, a resina epóxi se torna elastomérica em situações de temperatura elevada, passando a comprometer suas características de aderência (MENON, 2008).

A Tabela 1 apresenta as principais propriedades das resinas termorrígidas, de forma comparativa.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas das resinas utilizadas como matrizes

<i>Propriedade</i>	<i>Resina</i>				
	<i>Poliéster</i>	<i>Éster vinílico</i>	<i>Epóxi</i>	<i>Bismaleimida</i>	<i>Poliimida</i>
<i>Densidade (g/cm³)</i>	1,10-1,40	1,10-1,30	1,20-1,30	1,32	1,43-1,89
<i>Temperatura de transição vítreia (°C)</i>	70-100	70-165	95-175	250-300	280-320
<i>Resistência à tração (MPa)</i>	34,5-103,5	73,0-81,0	55,0-130,0	48-78	70-120
<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	2,1-3,4	3,0-3,3	2,8-4,1	3,6	3,10-4,90

Fonte: Adaptado de Fortes et al. (2023) e Rasheed (2014).

Em termos de custo, de modo geral o epóxi é mais caro que os poliésteres e os ésteres vinílicos, porém compensam nas propriedades mecânicas que acabam superando as outras opções, além de apresentar excelente durabilidade (WU; EAMON, 2017).

De acordo com Rezende (2000), as resinas bismaleimida (BMI) e poliimida apresentam comportamento semelhante, sendo resinas termorrígidas modificadas com termoplásticos, utilizadas em aplicações de alto desempenho no setor automobilístico e aeronáutico, apesar de a matriz epóxi ser ainda muito utilizada quando se trata de processamento de compósitos.

Para que a matriz apresente o efeito esperado, principalmente a transferência de tensões, é importante que seja garantida a ligação da interface entre fibra e matriz, fator crítico para o sucesso dos compósitos avançados (WU; EAMON, 2017).

A interface é determinada pela área de transição entre a fibra de carbono e a matriz da resina, com a função de transferir tensões, calor, eletricidade e demais informações (LIU et al., 2020). Em complemento, Sharma et al. (2014) explicam que durante o processamento do compósito é importante que haja um nível adequado de forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio entre a fibra de carbono e a matriz, para que ocorra uma forte adesão inicial, sendo que essa energia deve ser maior do que a energia de coesão da matriz.

Wu e Eamon (2017) alertam que, caso haja a degradação da matriz, devido a fatores ambientais, como exposição, ou efeitos de cargas mecânicas, a interface pode restar enfraquecida. Com isso, se houver a dissolução da interface, inevitavelmente ocorrerá a separação entre a fibra e a matriz.

Um ponto muito importante com relação à durabilidade do reforço, principalmente quando aplicado em ambientes com elevadas temperaturas, é a temperatura de transição vítreia (T_g). Diferente para cada polímero, a temperatura de transição vítreia é o ponto no qual os polímeros passam de materiais elásticos e relativamente duros para materiais relativamente emborrachados (FORTES et al., 2023).

E, enquanto a resina não endurece, passa pelos seguintes estágios:

- a) “pot life”: é o tempo de utilização, representado pelo período em que a resina pode ser manipulada, após mistura da resina e catalisador, e é possível manter suas características de aderência. Findado o tempo de utilização, a resina perde suas características e não deve mais ser utilizada. Quanto maior a temperatura, maior quantidade de calor e aceleração das reações (FORTES et al., 2023; MENON, 2008; BEBER, 2003);
- b) “open time”: equivale ao tempo de endurecimento, sendo o período no qual o compósito deve ser colado para garantir suas propriedades, sendo também influenciado pela temperatura do ambiente, compósito e superfície.

2.2.2 Ligação entre reforço e substrato

A aderência na interface entre o reforço e o substrato é muito importante para garantir uma transferência eficiente de cargas da matriz para o reforço, de modo a reduzir a concentração de tensões e melhorar as propriedades mecânicas, sendo que

há diversos estudos que buscam alternativas para melhorar essa interface entre matriz e fibra de carbono (ZHANG et al., 2012).

Para que seja possível o desenvolvimento da ação completa do compósito, o adesivo utilizado deverá oportunizar um caminho para a força cortante que age entre a superfície do concreto e o material compósito (FORTES et al., 2023).

Menon (2008) aponta que o adesivo deverá garantir a transferência de tensões na superfície do concreto, a partir da colagem do PRF. Desse modo, a transferência ocorre na interface concreto-adesivo-compósito, sendo tensões predominantemente cisalhantes.

A escolha do adesivo é importante, uma vez que a qualidade da ligação adesiva será crítica para utilização dos compósitos. A adesão ocorre através de forças intermoleculares que atuam através da interface, onde o adesivo, na forma líquida, preenche as irregularidades da superfície que está em contato, interagindo com suas forças moleculares, se solidificando para formar a “junta” (WU; EAMON, 2017). Para isso, a superfície deverá estar livre de poeira e contaminações, eliminando camadas fracas, garantindo, assim, uma boa adesão.

Os adesivos mais comuns para essa utilização são epóxi, resultando da mistura da resina com um endurecedor (FORTES et al., 2023).

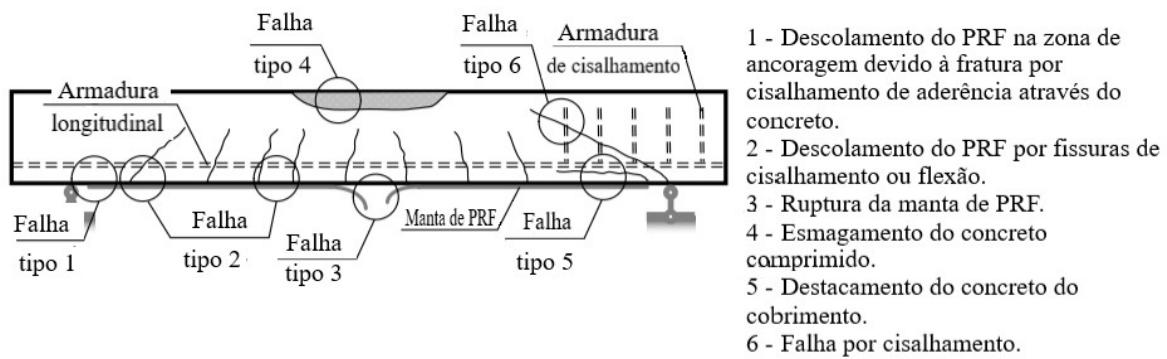
A falha de aderência pode ocorrer na interface entre o adesivo e o PRF, no próprio adesivo, na interface adesivo/concreto e no próprio concreto. Quando a resistência do adesivo é menor do que a do concreto, a falha deverá ocorrer na região do adesivo, geralmente constatada em situações de exposição a altas temperaturas ou utilização de concreto de alta resistência. Por sua vez, as falhas nas interfaces adesivo/concreto e adesivo/PRF geralmente estão relacionadas com falhas na preparação do substrato antes da aplicação do reforço, podendo haver propagação de fissuras nesse ponto que comprometam a estabilidade do sistema (FORTES et al., 2023).

Os autores ainda mencionam as situações que podem levar a uma falha de aderência na camada de concreto, que é considerada o elo frágil na ligação concreto/reforço, que incluem: penetração do adesivo nos poros do concreto fazendo com que uma fina camada de concreto atinja maiores resistências e descole quando submetida a um esforço; quando há a fissuração na camada do cobrimento da armadura principal, devido aos esforços de flexão e força cortante, enfraquecendo e descolando o concreto da armadura de reforço.

2.2.3 Modos de ruptura

De acordo com Gribniak et al. (2017), quando os compósitos de PRF são utilizados colados externamente aos elementos estruturais de concreto armado, podem introduzir modos de falha adicionais que deverão ser considerados, como falha de aderência na interface PRF-concreto, arrancamento do concreto, descolamento do reforço devido à formação de fissuras e demais casos ilustrados a seguir na Figura 4:

Figura 4 – Tipos de falha do reforço colado externamente em vigas de concreto armado.

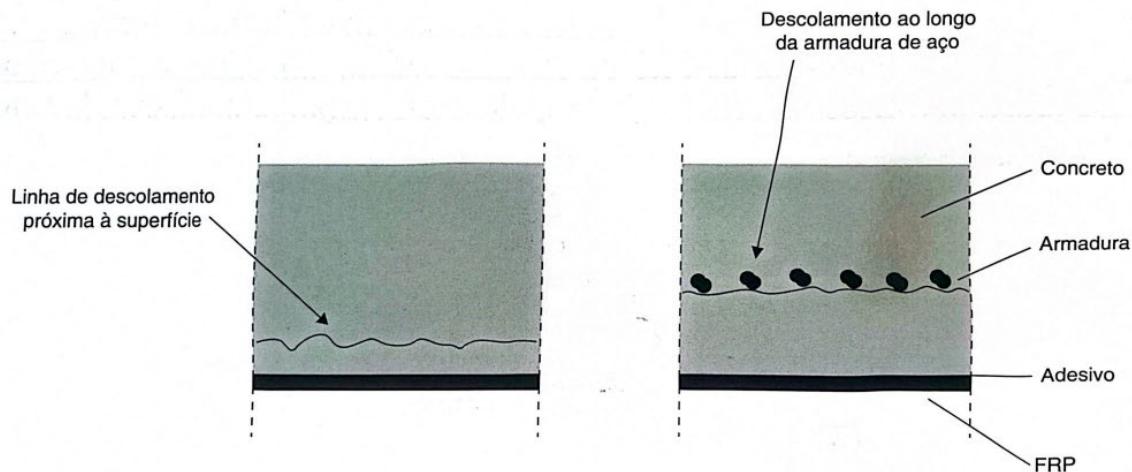


Fonte: Adptado de Gribniak et al. (2017).

O descolamento do PRF pode ocorrer na extremidade do PRF, devido à formação de fissuras intermediárias oriundas de esforços de flexão ou cortante, ou ainda pela irregularidade da superfície da viga.

A perda de aderência do PRF, que leva ao seu descolamento da viga reforçada, pode estar associada às tensões que se desenvolvem ao longo da interface concreto-reforço, sendo denominado descolamento interfacial na zona de ancoragem, ou ainda às forças cortantes que levam à separação da camada de cobrimento ao longo da armadura principal (FORTES et al., 2023), conforme Figura 5.

Figura 5 – Modos de ruptura devido à perda de aderência do PRF.



Fonte: Adaptado de fib 90 (2019).

Conforme Teng; Chen (2007), as falhas por descolamento ocorrem, em geral, no concreto, devido à alta resistência à tração do adesivo, somado com uma preparação adequada da superfície de concreto para aplicação, superando a resistência do concreto. Desse modo, ao longo da interface física entre o adesivo e o concreto poderá ocorrer a falha, geralmente iniciando por uma fissura em uma fina camada de concreto, a partir da extremidade do reforço colado, prolongando-se ao longo da viga (FORTES et al., 2023), conforme Figura 6.

Figura 6 – Ruptura com descolamento interfacial na zona de ancoragem.



Fonte: Adaptado de Teng; Chen (2007)

Outra situação que leva ao descolamento da extremidade do PRF é quando a extremidade do reforço está muito próxima ao apoio. Fortes et al. (2023) explicam que, quando isso ocorre, a primeira fissura de cisalhamento que intercepta o PRF proporciona o seu destacamento, fato que poderia ser evitado com a utilização adequada de dispositivos para ancoragem (Figura 7).

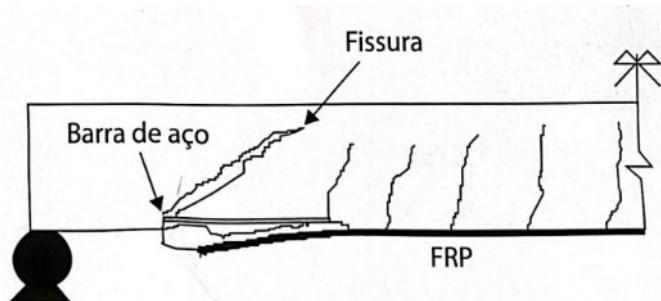
Figura 7 – Ruptura devido à força de ancoragem na primeira fissura de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de *fib 90* (2019).

No caso em que a separação do concreto do cobrimento ocorre no mesmo nível de contato com a armadura longitudinal, a partir da formação de uma fissura crítica de cisalhamento, percebe-se a extremidade do reforço situada em uma zona de elevado esforço cortante e baixo momento fletor, sendo geralmente casos em que a viga está reforçada à flexão e com armadura transversal limitada. Com isso, a fissura crítica intercepta o reforço próximo à extremidade e, à medida que a fissura se expande, aumentam as tensões entre o PRF e o concreto, levando à falha por descolamento do reforço com a camada de cobrimento junto à barra longitudinal (FORTES et al., 2023; TENG e CHEN, 2007), como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Destacamento do cobrimento pela fissura próxima à extremidade.



Fonte: Adaptado de *fib 90* (2019).

2.3 Reforço de estruturas com PRF

A utilização do PRF como reforço pode ocorrer a partir de duas técnicas: *Near Surface Mounting* (NSM), que se refere a inserir o material na superfície do concreto mediante cortes nas regiões a serem reforçadas ou *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), que consiste na colagem externa de lâminas unidirecionais ou mantas

flexíveis, sem a necessidade de promover o corte no elemento (fib 14, 2001;ARCINE; MENON, 2022).

Pela técnica EBR, de acordo com o disposto no boletim *fib 14* (2001), existem duas classificações para a definição do sistema de aplicação do reforço:

- **Pré-fabricados ou pré-curados:** a maioria em forma de lâminas, fornecidas como compósitos curados em sua forma final, com resistência e rigidez definidas, semelhantes a chapas de aço. Para esse sistema, o adesivo será a ponte de aderência entre a lâmina e o substrato de concreto do elemento que se pretende reforçar.
- **Sistema *wet lay-up* ou aplicação *in situ*:** são fornecidos os PRF na forma de fibras secas que serão curadas no local de aplicação, seja através de uma resina de impregnação ou como “pré-impregnados” – também chamados *prepreg* – quando as fibras contêm uma parcela de resina incorporada previamente. Ainda assim, para aderência no elemento de concreto, o adesivo será utilizado tanto para aderir o tecido ao substrato quanto para impregnar a manta.

O quadro 2 apresenta um comparativo entre o sistema pré-curado e o curado *in situ*:

Quadro 2 – Comparativo entre o sistema pré-curado e curado *in situ*

	Sistema pré-curado (pré-fabricado)	Sistema curado <i>in situ</i> (<i>wet lay-up</i>)
Forma	Laminados ou tiras	Lâminas ou mantas
Espessura	1,0 a 1,5mm	0,1 a 0,5mm
Adesivo	Colagem simplificada mediante adesivo	Necessário colagem e impregnação da manta/lâminas com adesivo
Geometria da aplicação	Se o elemento não for pré-moldado, recomendado apenas para superfícies planas	Previvamente arredondar cantos vivos, independentemente da forma
Aspectos típicos da aplicação	Utilizar adesivo tixotrópico, normalmente em uma camada (pode ser usado em múltiplas), pequenas irregularidades da peça podem ser acomodadas pelo adesivo e pelas tiras	Necessário resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação; pode ser necessário utilizar múltiplas camadas; irregularidades da peça devem ser corrigidas com massa para evitar o descolamento
Execução	Simples aplicação	Flexível, exige controle de qualidade mais rígido
	Em caso de aplicação inadequada ou má execução, pode haver perda de aderência entre o PRF colado externamente (EBR) e o substrato/estrutura de concreto, além de comprometer a integridade do sistema no longo prazo.	

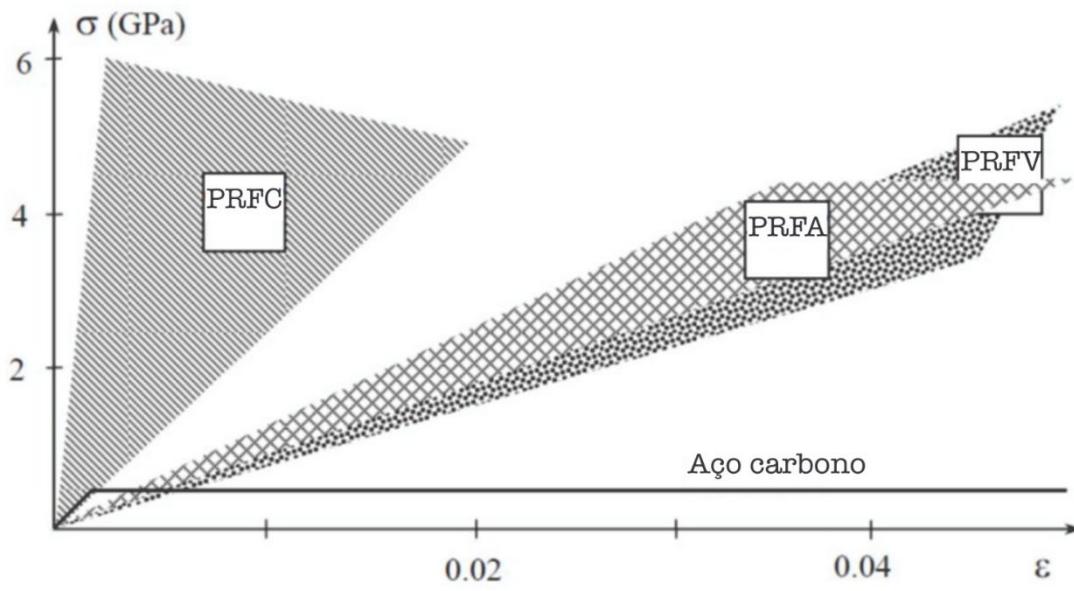
Fonte: Adaptado de *fib 14* (2001).

Grande parte das estruturas existentes requerem aprimoramentos devido a diversas deficiências estruturais, seja por ação de corrosão, mudanças de uso na estrutura acarretando acréscimo de cargas, erros de projeto ou construção etc. O uso de compósitos tem se mostrado uma tecnologia aliada ao aumento da vida útil dessas estruturas, através de aplicação como reforço nos elementos de concreto (MHANNA et al., 2021).

Os PRF vêm substituindo as técnicas de reforço com placas de aço, sendo que algumas pesquisas, estudando o desempenho em vigas de concreto armado, passaram a considerar os PRF de carbono, vidro ou aramida, visto que apresentam baixo peso em comparação ao aço, imunidade à corrosão, fácil aplicação em espaço confinado, alta resistência à tração, possibilidade de inúmeras formas geométricas e dimensões (fib 14, 2001).

Em forma de comparativo, a Figura 9 apresenta um gráfico tensão x deformação de PRF de carbono, vidro e aramida em relação ao aço.

Figura 9 – Diagrama tensão x deformação de diferentes PRF (PRFC = fibra de carbono; PRFA = aramida; PRFV = fibra de vidro) e o aço.



Fonte: Adaptado de fib 14 (2001).

Analizando o diagrama, os PRF exibem um comportamento elástico linear até a ruptura e geralmente desenvolvem tensões de tração muito superiores ao aço, o qual, por sua vez, apresenta um patamar de escoamento. Os PRF, portanto, apresentam uma ruptura frágil e a resistência e rigidez do polímero são diretamente

relacionadas com a fibra utilizada na composição do compósito (SARTI JÚNIOR, 2020; DALFRÉ, 2022).

Ainda, é importante destacar que existem, também, certas desvantagens e, portanto, o PRF não pode ser visto como um substituto absoluto das placas de aço. Sendo assim, deve-se considerar a diferença de comportamento explicada pela Figura 9 em que, ao contrário do aço que se comporta de forma elastoplástica, o PRF apresenta comportamento elástico linear até a ruptura – mesmo que isso ocorra sob grandes deformações, praticamente sem escoamento significativo ou deformação plástica, culminando com a redução da ductilidade (fib 14, 2001; WU; EAMON, 2017).

Wu e Eamon (2017) apontam que o reforço com PRF pode ser aplicado para mitigar diversos modos de falha, como reforço à flexão em vigas e lajes, posicionando o compósito na face tracionada, ou reforço ao cisalhamento através da colocação do PRF na lateral das vigas e encamisamento do pilar que, além de reforçar, proporciona o confinamento do concreto. Em complemento, Triantafillou (1998) destaca que, executar uma camisa de PRF nos pilares ou outros elementos similares, que estejam sob a atuação de cargas axiais, de flexão ou cisalhamento, demonstraram excelentes resultados de resistência, rigidez e ductilidade.

A decisão quanto à utilização de PRF no reforço de estruturas deve passar, portanto, pela análise das vantagens e desvantagens, considerando não apenas as propriedades mecânicas, mas também a durabilidade no longo prazo (fib 14, 2001).

2.3.1 Propriedades mecânicas

2.3.1.1 Compressão

Como mencionado, os compósitos podem ser aplicados pela técnica NSM e EBR, porém, quando os elementos a serem reforçados estão sob esforço de compressão, a ACI 440.2R (2008) alerta que não se deve aplicar o reforço com PRF para resistir unicamente à compressão, uma vez que o sistema deve ser projetado para resistir às forças de tração. Contudo, numa situação de inversão de momentos ou mudança no padrão de cargas, é admissível que a armadura de tração de PRF sofra compressão.

A resistência à compressão de um compósito de PRF pode chegar a valores entre 600 e 1.500 MPa, valores muito inferiores quando se compara com a resistência

à tração. De acordo com a ACI 440.2R (2008), isso ocorre devido à direção das fibras, uma vez que os compósitos de fibra de vidro ou carbono são extremamente resistentes à tração ao longo de seu eixo, porém não apresentam a mesma performance na compressão, podendo levar à microflambagem das fibras caso existam vazios de resina no laminado e os valores de resistência à compressão, considerados altamente inconsistentes, podem resultar no desalinhamento das fibras na aplicação em campo. Ainda, sob compressão, o PRF tende a falhar por delaminação ou esmagamento da matriz, além da flambagem de fibras, considerados modos de falha frágeis quando comparados à tração direta.

Wu (1990, apud Rasheed, 2014) aponta que os compósitos que apresentam fração volumétrica de 55% a 60% de fibra, possuem módulo de compressão de 80% do módulo de tração para PRF de fibra de vidro, 85% para fibra de carbono e 100% para aramida, porém estes resultados não são válidos para tecidos ou lâminas de PRF, apenas para as barras.

2.3.1.2 Tração

De acordo com Menon (2008), para a previsão do comportamento à tração de compósitos de PRF é importante conhecer alguns indicadores relacionados à ruína do material, como resistência última e extensão de ruptura, bem como o coeficiente de Poisson, módulo de compressibilidade e elasticidade. A autora complementa que a análise deve levar em conta o produto compósito na direção longitudinal e transversal.

A ACI 440.2R (2008) aponta que, sob tração direta, o PRF não apresenta escoamento antes da ruptura, e seu comportamento é caracterizado por uma relação tensão-deformação elástica linear até uma ruptura brusca e frágil. Ainda conforme a norma, a resistência à tração vai depender de características do material, que incluem: a orientação das fibras, a quantidade de fibras e as condições sob as quais o compósito foi produzido.

De acordo com o Consórcio ISIS (2003 apud GARCEZ, 2007), o comportamento do PRF à tração está diretamente relacionado com as deformações últimas da fibra e da matriz, sendo que o volume de fibras afeta o comportamento na ruptura em compósitos com deformações últimas diferentes, como se pode observar no Quadro 3.

Quadro 3 – Comparativo entre modo de ruptura x volume de fibras e deformação última

Deformação última	Volume de fibras	Modo de ruptura
A deformação última da matriz é inferior à das fibras	Baixo (<10%)	A ruptura do compósito é controlada predominantemente pela matriz, que falha antes que as fibras sejam plenamente solicitadas.
	Alto (>60%)	As fibras são responsáveis por resistir à maior parte do carregamento. A falha da matriz não compromete imediatamente o sistema, pois as tensões são transferidas para as fibras, que continuam a resistir até atingir sua deformação última.
A deformação última da matriz é superior à das fibras	Baixo (<10%)	Mesmo que ocorra ruptura nas fibras, o compósito pode não falhar de forma imediata, dada a baixa quantidade de fibras atuando no carregamento.
	Alto (>60%)	Quando as fibras atingem sua ruptura, a matriz passa a receber a maior parte da carga. No entanto, essa transferência é excessiva e o compósito não resiste, levando à falha completa do material.

Fonte: Adaptado de Garcez (2007).

Ainda de acordo com Garcez (2007), no caso comum de combinação de resina epóxi com fibras de alto desempenho, a matriz apresenta deformação última inferior à das fibras, fazendo com que a falha na matriz não seja crítica. Quando ocorre a falha, as cargas são transferidas para as fibras, que continuarão a suportar o carregamento até que se atinja a sua deformação última.

2.3.2 Umidade

De acordo com Fortes et al. (2023), um dos fatores que pode alterar as propriedades dos PRF é a umidade. Isso se deve ao fato de que, absorvendo um excesso de umidade, poderá resultar em um enfraquecimento das ligações poliméricas de modo significativo, pelo fenômeno da hidrólise – em que uma molécula de água quebra uma ou mais ligações químicas.

Nos PRF, a presença de umidade representa um risco para a resistência da matriz da resina sob ação prolongada da água. Numa situação de exposição à umidade, a matriz absorverá água em quantidade equivalente ao tipo de resina e à temperatura dessa água, obtendo, como efeito imediato, a redução da T_g e o endurecimento da resina. Conforme a resina, esses efeitos podem ser reversíveis ou irreversíveis, dependendo da temperatura e tempo de exposição (fib 14, 2001).

Ainda, a infiltração de umidade na interface resina/fibra pode gerar danos ao compósito a partir da quebra das ligações e a forma de ingresso da água nesse ponto pode ocorrer por ação capilar ao longo do eixo longitudinal da fibra ou diretamente na interface, por meio de fissuras ou vazios na estrutura ou por difusão através da matriz. A fibra de carbono, apesar de relativamente inerte à água, pode sofrer os efeitos na matriz da resina (fib 14, 2001).

Em complemento, Menon (2008) aponta que é imprescindível a escolha do material para a matriz do compósito, levando em consideração as condições ambientais em que este produto será aplicado.

Ensaios de Fortes et al. (2023) e Sarti Júnior (2020) demonstram que substratos com umidade acima de 5% podem resultar em tensões de arrancamento abaixo de 1,50 MPa, cujo valor é o mínimo necessário. Com isso, considerando a fibra de carbono, referidos ensaios consideram que este deve ser o valor limite de umidade para sua aplicação, ou 4% em situações normais, porém considerando os coeficientes de majoração indicados por norma para que a resistência de arrancamento permaneça em torno de 40% acima da tensão mínima requerida.

Choi et al. (2012) realizaram análises de diversas literaturas sobre os efeitos ambientais na durabilidade de estruturas reforçadas com PRFC colado externamente, categorizando em três grupos: i) exposição contínua à água (imersão ou alta umidade); ii) exposição contínua à soluções alcalinas, soluções de cloreto, água salgada e água do mar; e iii) exposição cíclica em ações de gelo/degelho, úmido/seco. Como se pode observar na Tabela 2, os dados mostram o resultado obtido de diversos autores com a exposição de elementos reforçados a situações de umidade, mostrando perdas significativas na ligação interfacial reforço/substrato ou mudança no modo de ruptura (Choi et al., 2012):

Tabela 2 – Efeitos da exposição contínua à água na durabilidade do PRFC

Materiais	Condições de exposição	Ensaios	Resultados
<i>Lâminas pré-curadas de PRFC coladas com epóxi</i>	Umidade relativa 100%, 23°C, 50°C/0 a 56 dias	Teste de cisalhamento/ arrancamento	As amostras secas falharam de forma coesiva; as úmidas de forma adesiva, perda de 50-60% na resistência à ruptura
<i>Concreto colado com epóxi</i>	Imersão/135 dias	Resistência de aderência (ASTM C882)	20-50% perda na força de aderência
<i>Concreto colado com epóxi</i>	Imersão à 23°C/48h + 48h secando	Resistência de aderência (ASTM C882)	17-35% perda na força de aderência
<i>Aplicação via úmida de PRFC em argamassas</i>	Imersão à temperatura ambiente/ 60 dias	Flexão em 4 pontos	24-34% perda de resistência
<i>Aplicação via úmida de PRFC em argamassas</i>	Imersão à temperatura ambiente/ 60 dias	Teste de arrancamento	Modo de ruptura altera de coesivo para adesivo Amostras secas romperam de forma coesiva; amostrar úmidas de modo adesivo; perda de 35-75% na resistência ao rompimento na interface
<i>Aplicação via úmida de PRFC em concreto</i>	Imersão/ 3-8 semanas	Viga de dupla alavancas modificada	úmidas de modo adesivo; perda de 35-75% na resistência ao rompimento na interface

Fonte: Adaptado de Choi et al. (2012).

2.3.3 Alta temperatura

Em temperaturas que excedem a T_g , podem ocorrer mudanças no comportamento mecânico das resinas poliméricas, que incluem o amolecimento e perda da capacidade de transferência de tensões entre o concreto e a fibra (RASHEED, 2014; FORTES et al., 2023).

Sendo assim, conforme Fortes et al. (2023), a integridade do elemento estrutural que recebeu o reforço pode ser comprometida, pois, excedendo a T_g , a transferência de tensão do concreto para a fibra será prejudicada, resultando na perda drástica da rigidez da resina.

Outra preocupação deve ser em relação a situações de incêndio, visto que, apesar de as fibras de carbono apresentarem comportamento significativamente resistente a altas temperaturas, a fibra de vidro reduz de 20% a 60% sua resistência

à tração, quando a temperatura excede os 600 °C e a fibra de aramida apresenta a mesma redução, porém, para temperaturas em torno de 300 °C (ARCINE; MENON, 2022; FORTES et al., 2023).

Os elementos de concreto armado possuem boa resistência ao fogo, de modo geral, devido à sua baixa condutividade térmica e apresentar degradação mais lenta das propriedades relacionadas à resistência e rigidez. Contudo, no caso de elementos reforçados com PRF, em uma situação de exposição direta ao fogo, ocorre o amolecimento da matriz polimérica, quando o compósito atinge temperatura próxima à T_g (geralmente em torno de 60 a 82°C), sendo necessário um isolamento contra incêndio (KODUR; BHATT, 2018).

Hawileh et al. (2009), realizaram um estudo elaborando um modelo numérico por elementos finitos de uma viga T reforçada com PRFC, em comparativo com uma viga real, sob condições de incêndio. Os resultados obtidos demonstram uma proximidade com os valores reais medidos, sendo que a perda de aderência entre o PRFC e o concreto ocorreu quando a lâmina de fibra de carbono atingiu temperaturas entre 66 e 81°C, corroborando com a temperatura de transição vítreia, momento em que ocorreu a perda de propriedades da resina, sendo estimado um tempo de resistência ao fogo de 81 minutos para uma viga reforçada com PRFC sem qualquer proteção. Diversos ensaios foram analisados nesse estudo e concluiu-se que as formas de mitigar esse efeito seriam através de proteções do reforço, mediante a instalação de placas de isolamento de silicato de cálcio, aumentando o tempo de resistência para 146 minutos ou ainda através de um revestimento cimentício leve de vermiculita e gesso que apresentou melhor desempenho, levando a uma resistência de 4 horas.

2.3.4 Aplicação em elementos sob ação de corrosão

A análise em relação à corrosão ocorre sob dois aspectos. Com relação ao material, ao contrário das placas de aço, os compósitos de PRF são altamente resistentes à corrosão mesmo quando expostos a ambientes marítimos ou regiões industriais (MENON, 2008). Porém, com relação a ambientes ácidos, quando se utiliza PRF de fibra de vidro, Wang (2015 apud Fortes et al., 2023) alertam para a lixiviação das fibras de vidro, expansão da matriz polimérica e consequente formação de fissuras, que poderão causar a ruptura do compósito.

Em complemento, Šimůnek et al. (2020) realizaram um estudo para avaliar a resistência química dos compósitos de PRF a diferentes ambientes corrosivos, concluindo que as fibras de carbono apresentam maior resistência mecânica, enquanto as fibras de vidro tipo E exibiram a menor resistência em meio ácido e a maior perda de massa, reagindo significativamente quando expostas a soluções alcalinas.

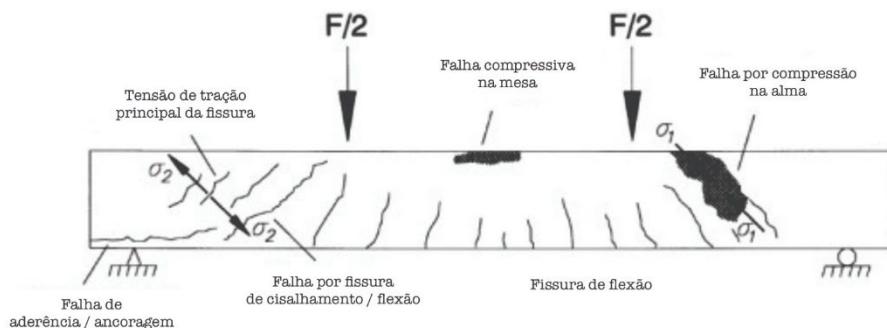
A segunda análise é com relação à aplicação do material para reforço de elementos com evidente corrosão de armaduras. Rasheed (2014) aponta que, antes da aplicação do reforço com PRF em elementos estruturais com danos decorrentes de corrosão, é imprescindível proceder com a limpeza das barras corroídas, de modo a garantir a integridade do compósito. A ACI 440.2R (2008) também não recomenda a colocação de laminados ou tecidos de PRF sem antes reparar a degradação no substrato. A norma complementa que as forças expansivas, que são associadas ao efeito da corrosão, podem comprometer a integridade estrutural do reforço e, portanto, a origem da corrosão deve ser encontrada, a causa devidamente tratada, o elemento reparado e só então proceder com a colagem do compósito.

2.4 Dimensionamento do reforço ao cisalhamento

De modo geral, o dimensionamento de vigas de concreto armado para o cisalhamento é baseado na suposição de que a soma da ação de pino, o intertravamento de agregados e o concreto não fissurado na zona de compressão com a armadura de cisalhamento – estribos ou barras inclinadas -, seria suficiente para promover a contribuição total à resistência ao cisalhamento (Triantafillou, 1998).

Além disso, Täljsten (2003) adiciona que, para que seja possível reforçar uma estrutura ao cisalhamento, é necessário compreender o comportamento deste esforço e os diferentes modos com que uma estrutura pode atingir a falha. Para isso, o autor utiliza o disposto na Figura 10 para exemplificar possíveis falhas em uma viga de concreto simplesmente apoiada.

Figura 10 – Possíveis modos de falha em uma viga de concreto



Fonte: Täljsten (2003).

De acordo com Täljsten (2003), uma estrutura de concreto geralmente é projetada para apresentar deformações antes de ruir, e o método de ruptura mais comum para uma viga de concreto é por flexão. Considerando o cisalhamento, o autor explica que a falha começa com uma ação combinada com a flexão, passando a desenvolver as fissuras características do cisalhamento. Observando o disposto na Figura 10, a região onde ocorre a tensão σ_2 é o ponto de maior resistência à tração e é onde a falha por cisalhamento ocorre.

Benjeddou et al. (2007) afirmam que as estruturas de concreto podem ser reforçadas ao cisalhamento ou flexão a partir da aplicação de PRF, através da colagem externa dos compósitos nas faces da viga, sendo que o polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) é o que vem recebendo maior atenção.

Täljsten (2003) explica que podem ser utilizados materiais compósitos na forma de tecidos flexíveis para envolver ao redor da superfície ou laminados pré-fabricados em tamanhos e formatos variáveis. Ainda assim, em ambos os casos, será necessário preparar a superfície para garantir uma boa aderência, através de jato de areia, lixamento ou simplesmente um jato de água para remover poeira, resquícios de óleo ou graxa, antes da aplicação de um adesivo.

Segundo o boletim fib 14 (2001), as técnicas básicas de reforço podem envolver o método *wet lay-up*, que é a aplicação do tecido ou malha através de uma resina de saturação e, manualmente, é disposta no substrato de concreto pré-preparado com um primer ou uma resina de regularização, ou ainda através de sistemas pré-fabricados colados com adesivo. Estas duas formas podem ser visualizadas na Figura 11.

Figura 11 – Aplicações de reforço com PRFC – (a) manualmente com tecido impregnado ou (b) colagem de lâminas.



Fonte: fib 14 (2001).

De acordo com Fortes et al. (2023), ainda existem outras técnicas que podem incluir:

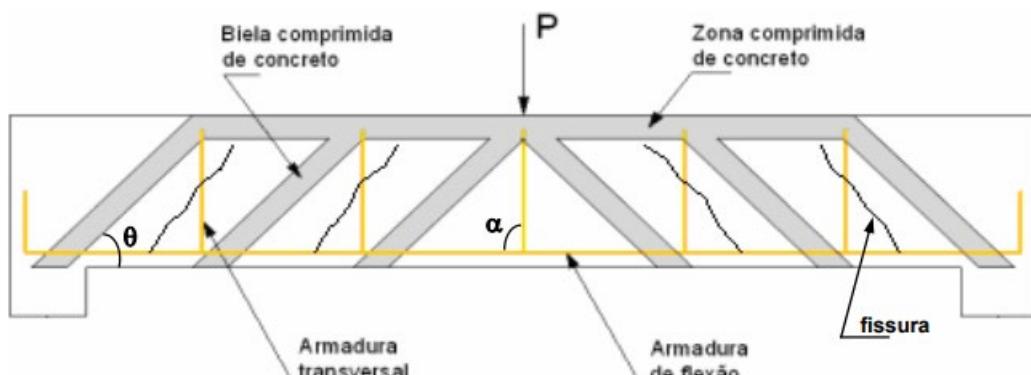
- a) Sistemas curados no local: além da técnica *wet lay-up*, também se utiliza o *dry lay-up*, que consiste na aplicação manual da manta ou tecido diretamente sobre a resina, aplicada na superfície do concreto;
- b) Sistema previamente impregnado: a preparação ocorre através da saturação da manta ou tecido com um adesivo estrutural à base de resina epóxi e então aplicada no concreto após preparo da superfície;
- c) Sistema impregnado no local: a partir da saturação do substrato com resina epóxi, o sistema consiste na impregnação da manta ou tecido diretamente sobre o concreto;
- d) Sistema pré-fabricado aderido à superfície: utilizando um adesivo estrutural, os laminados são aderidos ao concreto, após preparação do substrato;
- e) Sistema pré-fabricado inserido no cobrimento do concreto: é o sistema NSM, com a inserção dos laminados em entalhes no cobrimento com adesivo epóxi;
- f) Sistema pré-fabricado pretendido: neste caso é realizado um pré-alongamento do laminado através de ancoragens mecânicas, antes da instalação.

De acordo com De Lorenzis; Teng (2007) e Ji et al. (2023), a escolha do tipo do reforço passa pelas condições de aplicação, acesso ao elemento a ser reforçado, necessidade de desempenho, além de orçamento e experiência da equipe executora do reforço.

2.4.1 Definições de projeto

A treliça de Mörsch, proposta em 1906 e demonstrada na Figura 12, é uma das teorias clássicas para o dimensionamento da armadura de cisalhamento, a partir da associação do comportamento resistente da viga no estágio II – fissurada, ao comportamento de uma treliça. Nessa situação, as vigas fissuram devido ao momento fletor e força cortante, passando a se comportar como treliça de banzos paralelos, na qual a armadura longitudinal, que está tracionada, agirá como o banzo tracionado da treliça enquanto a zona comprimida seria como o banzo comprimido. Com a formação das fissuras, as bielas do concreto ficam divididas e se comportam como diagonais comprimidas a 45° , enquanto a armadura longitudinal faz o papel de montante da treliça (SANTOS, 2006).

Figura 12 – Modelo clássico da treliça de Mörsch



Fonte: Tullio e Machado (2020).

Com relação ao reforço de uma viga ao esforço cortante, alguns critérios de dimensionamento podem ser usados de modo comparativo, a exemplo do proposto no *fib Bulletin 14* (2001), ACI 440 (2008) e pelo IBRACON no trabalho de Fortes et al. (2023).

2.4.1.1 *fib Bulletin 14*

De acordo com o *fib* boletim 14, que leva em conta as recomendações de Triantafillou (1998) e Täljsten et al. (1999), o reforço externo pode ser tratado de forma análoga ao aço interno, assumindo que, no estado limite último ao cisalhamento, o PRF desenvolve uma deformação efetiva na direção principal do material (ϵ_f, e) que é

menor do que a deformação de falha por tração (ϵ_{fu}), e o cálculo para determinação da capacidade de cisalhamento de um elemento de concreto armado reforçado é dado pela equação (1).

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd_2}) \quad (1)$$

Onde:

V_{Rd} = resistência de projeto ao cisalhamento

V_{cd} = resistência de projeto do concreto ao cisalhamento

V_{wd} = resistência de projeto do estribo ao cisalhamento

V_{fd} = valor de projeto do esforço cortante resistido pelo PRF

V_{Rd_2} = esforço cortante de projeto que pode ser resistido sem ruptura na alma

A contribuição do PRF (V_{fd}) é calculada pela equação (2) e demonstrada na Figura 13.

$$V_{fd} = 0,9 \epsilon_{fd,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (2)$$

Sendo que:

$\epsilon_{fd,e}$ = valor de projeto da deformação efetiva do PRF

b_w = largura mínima da seção transversal sobre a profundidade efetiva

d = profundidade efetiva da seção transversal (altura útil: distância entre a fibra mais comprimida e o centro de gravidade da armadura de tração)

ρ_f = taxa de armadura do PRF, considerando:

Reforço colado de forma contínua, de espessura $t_f = \frac{2t_f \sin \alpha}{b_w}$

Reforço na forma de lâminas ou mantas, de largura b_f e espaçamento S_f :

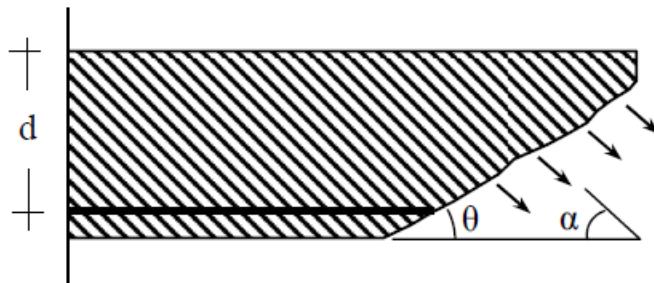
$$S_f = \frac{2t_f}{b_w} \times \frac{b_f}{s_f}$$

E_{fu} = módulo de elasticidade do PRF na orientação principal da fibra

θ = ângulo da fissura diagonal em relação ao eixo do elemento, adotado 45°

α = ângulo entre a orientação principal da fibra e o eixo longitudinal do elemento

Figura 13 – Contribuição do PRF para o cisalhamento



Fonte: fib 14 (2001).

O valor de projeto da deformação efetiva do PRF equivale ao valor característico, $\varepsilon_{fk,e}$ dividido pelo fator de segurança parcial γ_f . Segundo o fib 14 (2001), pela falta de dados suficientes, este valor pode ser aproximado multiplicando o valor médio da deformação efetiva do PRF por um fator de redução “k”, conforme equação (3):

$$\varepsilon_{fk,e} = k \varepsilon_{f,e} \quad k = 0,8 \quad (3)$$

Em que:

$E_{fk,e}$ = valor característico do módulo de elasticidade secante do PRF

k = fator de redução

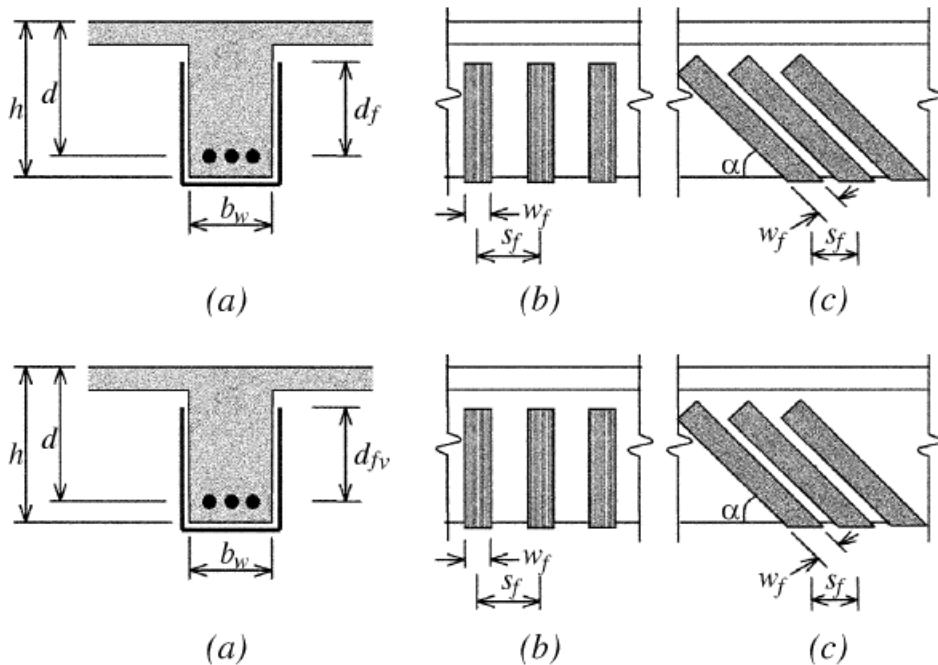
$\varepsilon_{f,e}$ = deformação específica do compósito

Na situação de colapso por aderência (envolvimento da viga em “U” ou sem ancoragem), considera-se $\gamma_f = 1,3$.

2.4.1.2 ACI 440 (2008)

A ACI apresenta o disposto na Figura 14 para ilustrar as variáveis dimensionais utilizadas nos cálculos de reforço ao cisalhamento, através de lâminas de PRF, onde d_{fv} é a altura útil do reforço ao cisalhamento em PRFC e d_f é a altura útil do reforço à flexão em PRFC.

Figura 14 – Variáveis dimensionais utilizadas nos cálculos de reforço ao cisalhamento



Fonte: ACI 440 (2008).

A contribuição do PRF ao cisalhamento é dada pelas equações (4), (5) e (6).

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (4)$$

$$A_{fv} = 2 n t_f w_f \quad (5)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (6)$$

Sendo que:

A_{fv} = área da seção transversal

n = número de camadas de fibra

t_f = espessura das fibras

f_{fe} = tensão efetiva na fibra

ε_{fe} = deformação específica do compósito

E_f = módulo de elasticidade longitudinal do compósito

A tensão no reforço de PRF é diretamente proporcional ao nível de deformação, que pode ser desenvolvida no reforço ao cisalhamento no estado limite último.

A determinação da deformação efetiva do PRF passa pela análise do modo de falha do sistema de reforço e do elemento estrutural. É necessário, portanto, considerar todos os modos de falha e adotar uma deformação efetiva representativa do modo crítico:

- Elementos completamente envolvidos: no caso de vigas e pilares completamente envolvidos pelo PRF, observa-se que a perda do intertravamento dos agregados do concreto ocorre em deformação das fibras inferior à deformação última da fibra. Sendo assim, para evitar esse modo de falha, a deformação máxima utilizada no projeto deve ser limitada a 0,4%, de acordo com a Equação 7.

$$\varepsilon_{fe} = 0,0004 \leq 0,75 \varepsilon_{fu} \quad (7)$$

Onde:

ε_{fu} = deformação específica de ruptura do PRF

- Envolvimento em "U" ou colagem nas faces laterais: são sistemas que não cobrem toda a seção nos quais se observa que o sistema se desprende do concreto antes da perda de aderência dos agregados na seção. Dessa forma, Triantafillou (1998) recomenda que estes esforços sejam objeto de análise para que se possa determinar o grau de utilidade desses sistemas e o nível de deformação efetiva que pode ser alcançado:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (8)$$

Sendo que:

ε_{fu} = deformação específica de ruptura do PRF

Este coeficiente de segurança de aderência (k_v) é determinado em função da resistência do concreto, do tipo de envolvimento da seção pelo PRF e da rigidez da lâmina, conforme equações (9), (10), (11) e (12):

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (9)$$

$$L_e = \frac{416}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \quad (10)$$

$$k_1 = \left(\frac{f_c}{27} \right)^{2/3} \quad (11)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} \\ \frac{d_f - 2L_e}{d_f} \end{cases} \quad (12)$$

Primeira equação do k_2 é para envolvimento em U e a segunda para colagem em duas faces.

Sendo que:

L_e = comprimento efetivo de aderência

d_f = profundidade efetiva da armadura de flexão em PRF (mm)

d_{fv} = profundidade efetiva da armadura de cisalhamento em PRF (mm)

E_f = módulo de elasticidade longitudinal do compósito (GPa)

t_f = espessura do compósito (mm)

k_1, k_2 = fatores de correção

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa)

A deformação efetiva nas lâminas de PRF não pode exceder 0,004, não se recomenda a utilização de valores superiores para aplicação de reforço ao cisalhamento.

2.4.1.3 Prática recomendada IBRACON (2023)

Do mesmo modo que dos itens anteriores, a metodologia proposta por Fortes et al. (2023) recomenda que se inicie pela verificação da capacidade à força cortante, de acordo com o disposto na ABNT NBR 6118 (2023).

Sendo assim, a verificação da resistência à cortante de um elemento estrutural com reforço à força cortante pode ser obtido pela equação (13), onde o PRF é tratado em analogia com a armadura transversal:

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{Rd,f} + V_{ccd} + V_{td} + V_c \quad (13)$$

Sendo que:

$V_{Rd,s}$ = valor de cálculo da força cortante resistida pela armadura de força cortante;

$V_{Rd,f}$ = valor de cálculo da força cortante que pode ser suportado pelo PRF aplicado externamente;

Em elementos com banzos inclinados, considerar as demais parcelas:

V_{ccd} = valor de cálculo da componente da força cortante na área de compressão, se banzo de compressão inclinado;

V_{td} = valor de cálculo da componente da força cortante da armadura de tração, se banzo inclinado;

V_c = parcela de cortante resistida por mecanismo complementares ao modelo de treliça.

A verificação da compressão diagonal do concreto, também conforme ABNT NBR 6118 (2023), deve ser realizada para o reforço à cortante com ângulo θ da biela de compressão:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (14)$$

Sendo que:

α_{cw} = coeficiente que considera o estado de tensão na biela de compressão;

z = braço de alavanca;

v_1 = fator de redução da resistência para concreto fissurado por cortante.

A força cortante que pode ser resistida pelo PRF pode ser calculada pela equação (15):

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw}}{S_f} * h_f * f_{fwd} * (\cot \theta + \cot \alpha) * \sin \alpha \quad (15)$$

Sendo que:

A_{fw} = área de reforço de PRF à força cortante, medida perpendicularmente na direção das fibras (se mantas aplicadas simetricamente, com largura b_f e espessura efetiva t_f , então: $2 * b_f * t_f$);

s_f = espaçamento entre faixas, medido na direção do eixo do elemento;

h_f = altura do reforço de PRF que cruza pela fissura de força cortante (pode ser considerado igual a $h - 0,1d$);

α = ângulo entre as fibras e o eixo do elemento que está perpendicular à força cortante;

f_{fwd} = valor de cálculo da tensão média do PRF interceptada pela fissura de força cortante no estado limite último.

De acordo com Fortes et al. (2023), o valor de f_{fwd} depende da configuração do reforço aplicado externamente, assumindo-se que os estribos têm capacidade de deformação suficiente para que o PRF atinja sua resistência de cálculo.

a) Para caso de envolvimento total na viga, utiliza-se a equação (16):

$$f_{fwd} = f_{fwd,c} = k_R * a_t * f_{fd} \quad (16)$$

Sendo que:

a_t = fator de carregamento de longa duração = 0,8

k_R = fator de redução que considera o raio (R) no canto onde a fibra faz a dobra na seção transversal, calculado pela equação (17):

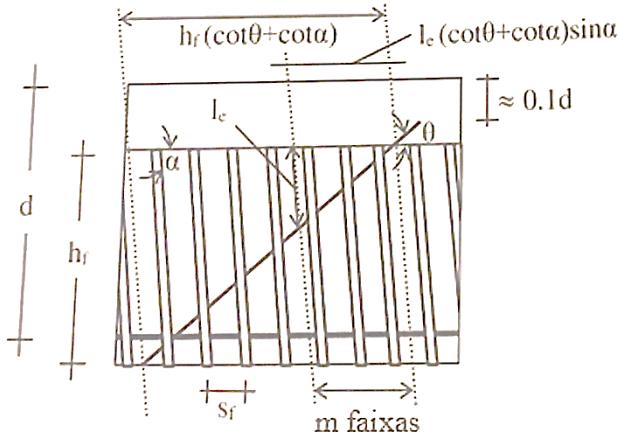
$$k_R = 0,5 * \frac{R}{50} * \left(2 - \frac{R}{50}\right) \quad \text{para } R < 50\text{mm ou } 0,5 \quad \text{para } R \geq 50\text{mm} \quad (17)$$

b) Para PRF em três lados da viga, a equação (18):

$$f_{fwd} = \min(f_{fbwd}, f_{fwd,c}) \quad (18)$$

Nesse caso, o valor de f_{fbwd} será obtido em função das relações geométricas apresentadas na Figura 15 e pelas equações (19), (20), (21), (22) e (23):

Figura 15 – FRP cruzando a fissura devido ao cortante



Fonte: Fortes et al. (2023).

Se todas as faixas de PRF interceptadas pela fissura têm comprimento de aderência $\geq L_e$:

$$f_{fbwd} = \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (19)$$

Se algumas das faixas interceptadas têm comprimento de aderência maior que L_e e algumas apresentam comprimento menor:

$$f_{fbwd} = \left[1 - \left(1 - \frac{2}{3} * \frac{m * S_f}{l_e} \right) * \frac{m}{n} \right] * \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (20)$$

Se todas as faixas interceptadas têm comprimento de aderência menor que L_e :

$$f_{fbwd} = \frac{2}{3} * \frac{\frac{(n * S_f)}{l_e}}{\frac{(cot \theta + cot \alpha) * sin \alpha}{l_e}} * \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (21)$$

Sendo que:

n = número de faixas de PRF interseccionadas pela fissura de força cortante = quociente inteiro $h_f * [(\cot \theta + \cot \alpha) / s_f]$;

m = é o número de faixas de PRF em que o comprimento de aderência é menor que l_e = quociente inteiro $l_e * (\cot \theta + \cot \alpha) * \sin \alpha / s_f$

$$l_e = \frac{\pi}{2} * \sqrt{\frac{E_f * t_f * S_{0k}}{\tau_{b1k}}} \quad (22)$$

$$f_{fbk} = \sqrt{\frac{E_f * t_f * S_{0k}}{\tau_f}} \quad (23)$$

Da Tabela 3 podem ser extraídos os valores para τ_{b1k} e S_{0k}

Tabela 3 – Parâmetros para a lei bilinear de aderência

<i>Tipo</i>		τ_{b1}	s_1 (mm)	s_0 (mm)
<i>Laminados de PRFC</i>	Valor médio	$0,53 * \sqrt{f_{cm} * f_{ctm}}$	0,0063	0,21
	5% valor característico	$0,37 * \sqrt{f_{cm} * f_{ctm}}$	-	0,2
<i>Mantas de PRFC</i>	Valor médio	$0,72 * \sqrt{f_{cm} * f_{ctm}}$	0,0107	0,24
	5% valor característico	$0,44 * \sqrt{f_{cm} * f_{ctm}}$	-	0,23

Fonte: Adaptado de Fortes et al (2023).

Onde:

τ_{b1k} = tensão característica de aderência (MPa)

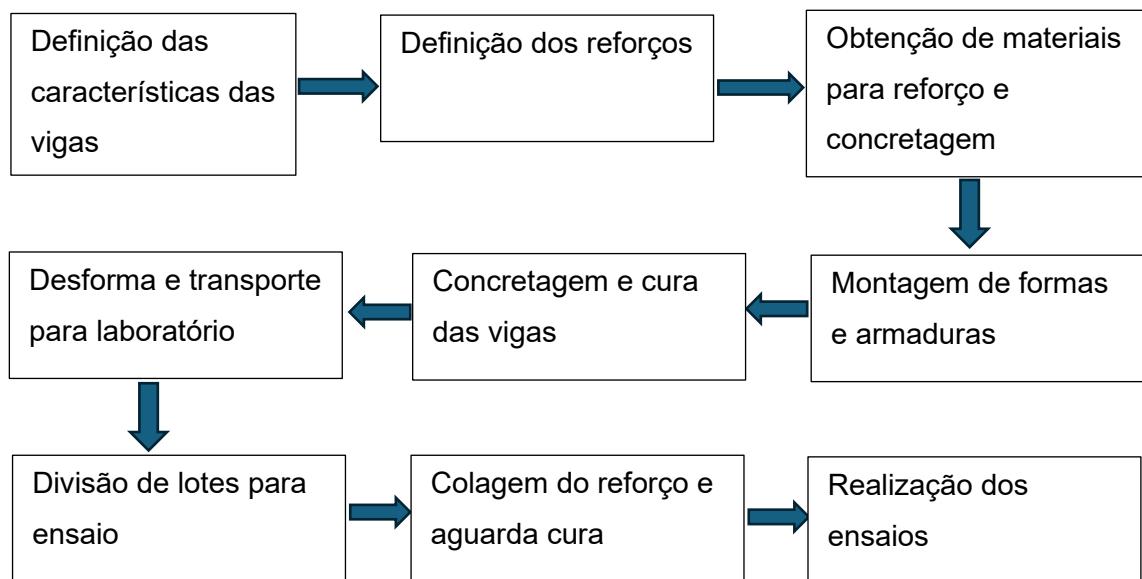
S_{0k} = deslizamento característico a partir do qual inicia o descolamento local do PRFC (mm)

3 METODOLOGIA

A finalidade deste capítulo é apresentar a metodologia adotada neste estudo para avaliar as vigas de concreto reforçadas ao cisalhamento com manta de PRFC, conforme os lotes de ensaio. Ao longo do capítulo foram apresentadas as características das vigas concretadas, os materiais e técnicas de reforço, bem como a condução do programa experimental.

Os processos, por sua vez, estão resumidos no fluxograma apresentado na Figura 16:

Figura 16 – Fluxograma das etapas da pesquisa



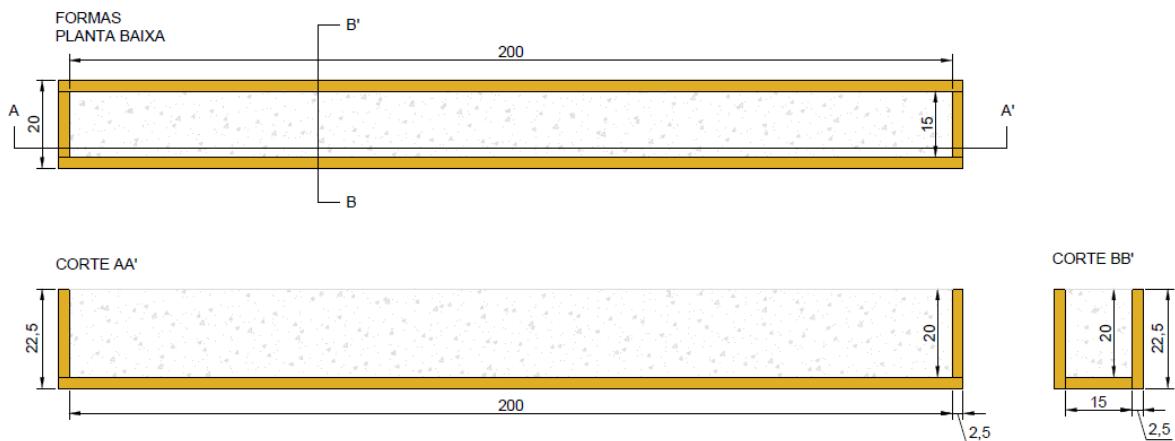
Fonte: Autora (2025).

3.1 VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Conforme descrito, o objetivo do trabalho é avaliar o comportamento de vigas de concreto armado sob esforço de cisalhamento, a partir do reforço com manta de PRFC e com erros de execução.

Foram utilizadas vigas retangulares de seção 15x20cm, em escala real com comprimento total de 200cm, conforme Figura 17.

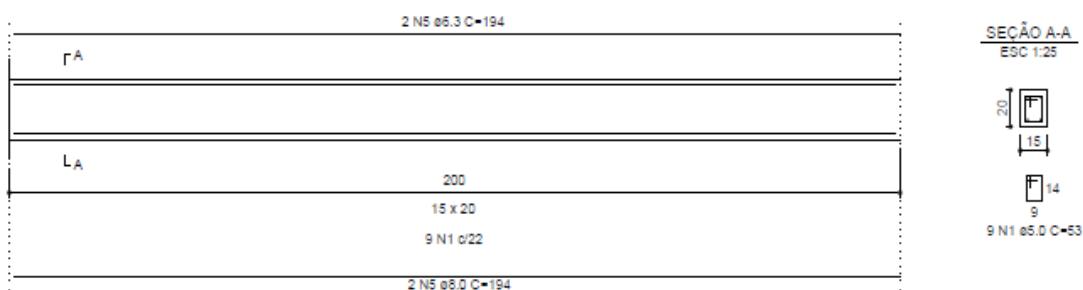
Figura 17 – Planta baixa e corte da forma das vigas.



Fonte: Autora (2025).

Com relação à armadura das vigas, a Figura 18 mostra que adotou-se a armadura mínima para cisalhamento, considerando estribos de Ø5mm espaçados a cada 22cm, enquanto que as barras longitudinais foram dimensionadas com 2 barras de Ø8mm na flexão (armadura inferior) e 2 barras de Ø6,3mm na compressão (armadura superior), além de uma faixa de 1,00 m de extensão de manta de PRFC, na largura da viga (15cm), aplicada no meio do vão embaixo das vigas – exceto as de referência, de modo a isolar as análises no ensaio para o cisalhamento.

Figura 18 – Seção transversal e detalhamento da armadura das vigas ensaiadas



Fonte: Autora (2025).

No total foram concretadas 12 vigas, formando 04 lotes e nomeadas conforme demonstrado na Tabela 4

- Lote 01: 03 vigas de referência sem reforço;
- Lote 02: 03 vigas reforçadas ao cisalhamento conforme orientação do fabricante da manta (Quartzolit);

- Lote 03: 03 vigas com erro de colagem, considerando a aplicação do adesivo impregnante em faixas;
- Lote 04: 03 vigas com erro de colagem, considerando a aplicação do reforço sobre o substrato sem preparo adequado.

Tabela 4 – Nomenclatura das vigas para ensaio

Viga	Lote	Descrição
V1	01	Viga de referência 01
V2	01	Viga de referência 02
V3	01	Viga de referência 03
VC_01	02	Viga colagem certa 01
VC_02	02	Viga colagem certa 02
VC_03	02	Viga colagem certa 03
VER_01	03	Viga com erro de colagem 01
VER_02	03	Viga com erro de colagem 02
VER_03	03	Viga com erro de colagem 03
VER_04	04	Viga com erro de colagem 04
VER_05	04	Viga com erro de colagem 05
VER_06	04	Viga com erro de colagem 06

Fonte: Autora (2025).

O Lote 01 é composto pelas vigas referência, o Lote 02 pelas vigas com o reforço colado pelo fabricante, o Lote 03 com o adesivo impregnante aplicado em faixas, sendo: “Viga VER_01” com impregnante em 15% da área de manta, “Viga VER_02” com impregnante em 20% da área de manta e “Viga VER_03” com impregnante em 75% da área de manta e, por fim, o Lote 04 com reforço aplicado sem preparo do substrato.

O concreto utilizado foi com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30 MPa, fornecido pela empresa Concre sul de Estância Velha/RS, obedecendo à seguinte carta de traço, descrita na tabela 5:

Tabela 5 – Carta de traço do concreto

Material	C30 B1 140+- 20mm
<i>Cimento CP II F-40 Itambé (kg)</i>	226
<i>Adição mineral (kg)</i>	88
<i>Areia natural média (kg)</i>	495
<i>Areia de britagem (kg)</i>	361
<i>Brita 0 - 12,5 mm (kg)</i>	209
<i>Brita 1 - 19,0 mm (kg)</i>	835
<i>Água (kg)</i>	189
<i>Aditivo plastificante tipo RA1 Sika 421 RM (kg)</i>	3,14
<i>Abatimento (mm)</i>	(140+-20)mm

Fonte: Concre sul (2024).

A concretagem das vigas ocorreu em novembro de 2024, e foi realizado o teste de abatimento do tronco de cone (*slump test*) e moldados os corpos-de-prova para rompimento aos 7, 14 e 28 dias e, posteriormente, as vigas foram submetidas à cura com a utilização da manta geotêxtil conforme Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Forma com armadura (a) e após a concretagem (b).



Fonte: Autora (2025).

Figura 20 – Corpos-de-prova (a) e cura das vigas com geotêxtil (b)



Fonte: Autora (2025).

3.1.1 Controle tecnológico

Após a moldagem dos corpos-de-prova, os corpos-de-prova foram levados ao Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, e ficaram armazenados até as datas de rompimento.

Foram realizados os rompimentos aos 7, 14 e 28 dias, sendo que aos 7 dias o concreto já atingiu uma resistência média de 22,8 MPa; aos 14 dias 25,9 MPa; e, aos 28 dias, uma resistência média de 30,9 MPa, com desvio padrão de 0,4 e coeficiente de variação de 1,29%.

Os ensaios ocorreram em conformidade com a ABNT NBR 5739:2018, sendo os corpos-de-prova em formato cilíndrico, com dimensões de 10x20 cm.

3.2 REFORÇO AO CISALHAMENTO

O reforço aplicado nas vigas foi fornecido pela empresa Quartzolit, consistindo do sistema com manta de fibra de carbono – Manta Fiber C, Adesivo Tix Fiber C e Adesivo Impregnante Fiber C -, com as seguintes expostas nas Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 – Propriedades e características Manta Fiber C

Propriedades Manta Fiber C	
<i>Tipo</i>	Alta resistência Fibra de carbono (98-99%) + fibra de vidro (1-2%)
<i>Composição</i>	
<i>Massa unitária</i>	300 g/m ²
<i>Massa específica</i>	1,80 g/cm ³
<i>Espessura do tecido</i>	0,166 mm
<i>Resistência à tração do projeto (ASTM D3039)</i>	4900 MPa
<i>Módulo de deformação à tração (ASTM D3039)</i>	230 GPa
<i>Alongamento na ruptura</i>	2,10%

Fonte: Quartzolit (2025).

Tabela 7 – Propriedades e características Adesivo Tix Fiber C

Propriedades Adesivo Tix Fiber C	
<i>Densidade de massa (NBR 5829)</i>	A: 1,420 - 1,480 g/cm ³ B: 1,220 - 1,300 g/cm ³ A+B: 1,384 g/cm ³
<i>Cor</i>	A+B: Cinza
<i>Vida útil da mistura (25°C)</i>	60 minutos
<i>Cura final</i>	7 dias
<i>Resistência de aderência à tração (EN1542)</i>	2,5 MPa (100% no concreto)
<i>Espessura de aplicação</i>	630 µm

Fonte: Quartzolit (2025).

Tabela 8 – Propriedades e características Adesivo Impregnante Fiber C

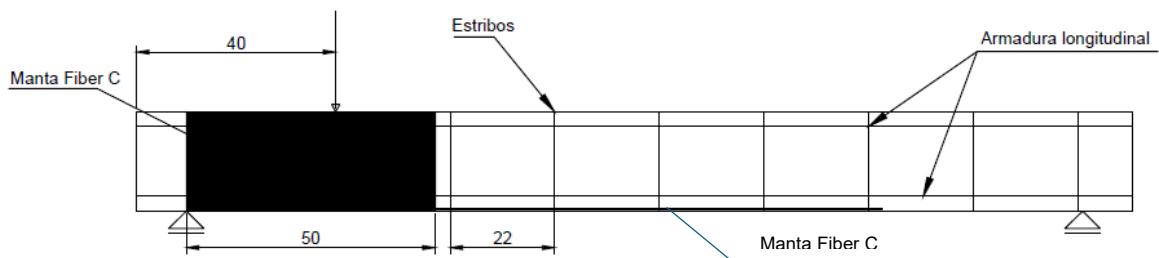
Propriedades Adesivo Impregnante Fiber C	
<i>Densidade de massa (NBR 5829)</i>	A: 1,000 - 1,300 g/cm ³ B: 1,000 - 1,100 g/cm ³ A+B: 1,050 - 1,200 g/cm ³
<i>Cor</i>	A+B: Alaranjado
<i>Viscosidade (NBR 5849, copo Ford 4)</i>	A: 65 a 120 segundos B: 20 a 60 segundos A+B: 60 a 110 segundos
<i>Vida útil da mistura</i>	90 minutos
<i>Tempo de secagem ao toque (25°C)</i>	4 horas
<i>Cura final</i>	7 dias
<i>Resistência de aderência à tração (EN1542)</i>	3,5 MPa (100% no concreto)
<i>Alongamento na ruptura</i>	0,2903%
<i>Ponto de fulgor</i>	72°C
<i>Espessura de aplicação</i>	35 µm

Fonte: Quartzolit (2025).

Os reforços foram aplicados 48 dias após a concretagem e os testes foram realizados após a cura final de 7 dias do sistema Fiber C.

O esquema de reforço e armadura nas vigas está demonstrado na Figura 21, sendo o reforço aplicado em U, de forma contínua, na largura do rolo da manta, para aplicação da carga a 40cm de distância do apoio:

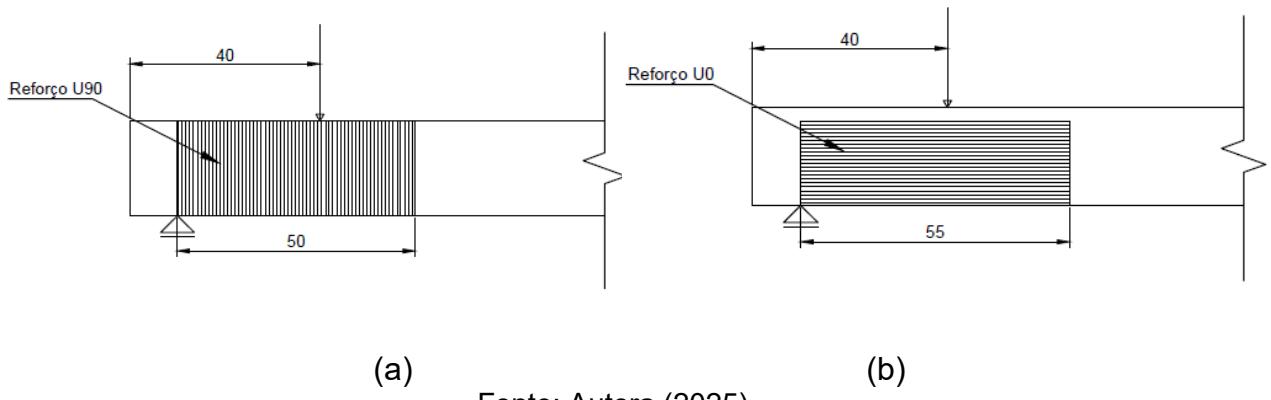
Figura 21 – Esquema de armadura e aplicação de reforço nas vigas.



Fonte: Autora (2025).

Durante a colagem do reforço nos lotes de viga, duas vigas do Lote 03 acidentalmente receberam o reforço com as fibras na direção horizontal, ou seja, a 0° em relação ao eixo longitudinal das vigas, conforme esquematizado na Figura 22.

Figura 22 – Esquema de reforço U90 (a) e U0 (b)



Fonte: Autora (2025).

Para as vigas do Lote 02, o preparo foi feito com lixamento mecânico através de esmerilhadeira, promovendo o arredondamento dos cantos. Como a superfície estava irregular na parte inferior da viga, na ausência de massa epóxi, foi aplicada uma camada regularizadora com cimento e areia, aguardando para posterior aplicação do reforço.

O reforço para essas vigas foi aplicado pelo profissional Wagner Costa, que é instrutor técnico da Quartzolit, para fins de garantir que todas as premissas do fabricante fossem seguidas na aplicação.

Conforme Figura 23, primeiramente foi delimitada a área de reforço, o pó foi novamente removido com uso de escova e o adesivo foi misturado com uso de misturador mecânico, seguido da aplicação do adesivo Tix Fiber C uniformemente no substrato:

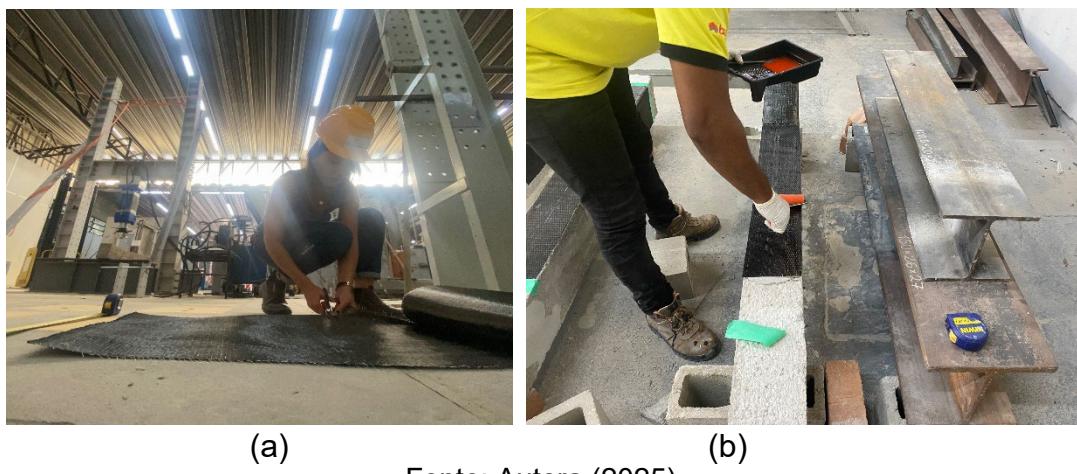
Figura 23 – Delimitação e preparo do Adesivo Tix (a) e aplicação no substrato com uso de desempenadeira (b).



Fonte: Autora (2025).

Imediatamente após aplicar o adesivo Tix Fiber C, a Manta Fiber C, previamente cortada na medida desejada, foi aplicada com pressão manual e rolo liso para melhorar aderência, para então receber o adesivo impregnante, conforme Figura 24:

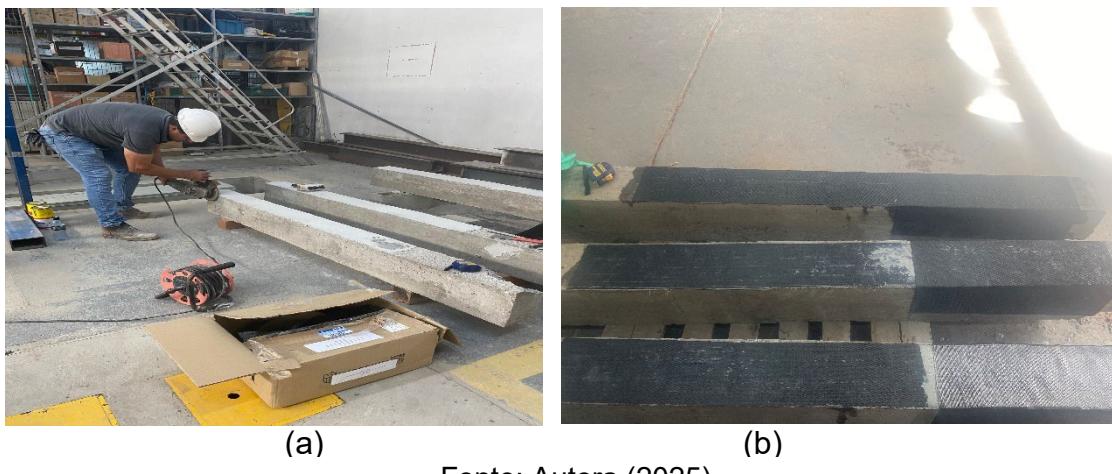
Figura 24 – Corte da manta na dimensão desejada (a) e aplicação do impregnante após colagem do reforço (b).



Fonte: Autora (2025).

As vigas do Lote 03 também foram lixadas com esmerilhadeira, o pó foi removido com escova e o adesivo Tix foi espalhado no local de aplicação para posteriormente os reforços serem colados e impregnados com adesivo em faixas, demonstrado na Figura 25:

Figura 25 – Lixamento das vigas (a) e reforço à flexão e cisalhamento colados (b).

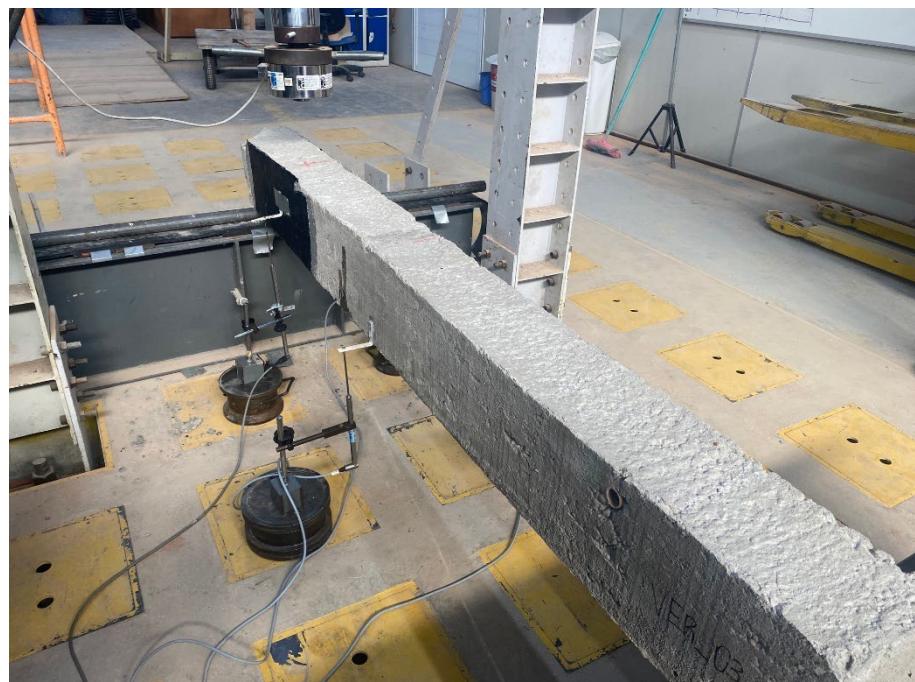


Fonte: Autora (2025).

Por fim, as vigas do Lote 04 não receberam preparo do substrato, sendo o reforço colado diretamente nas vigas com utilização do adesivo Tix e do impregnante.

Todas as vigas foram instrumentadas com LVDT's (*linear variation displacement transducer*), transdutores de deslocamento de variação linear, posicionados de cada lado da viga no meio do vão e no centro do reforço de PRFC. A Figura 26 mostra um exemplo de viga instrumentada.

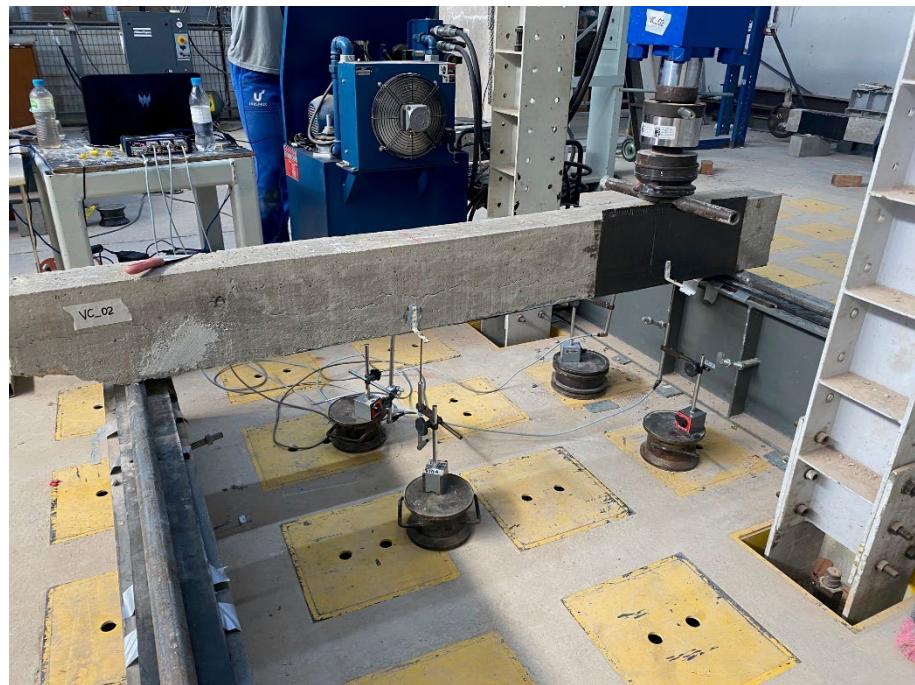
Figura 26 – Exemplo de uma das vigas instrumentadas com os LVDT's.



Fonte: Autora (2025).

Foi realizado o ensaio de resistência ao cisalhamento, conforme Figura 27, com carga aplicada a 40 cm da borda da viga. Os apoios foram posicionados a 10 cm a partir da extremidade das vigas, sendo posicionadas sobre roletes e a carga aplicada no êmbolo foi com deslocamento fixo na taxa de 1mm/min.

Figura 27 – Ensaio de resistência ao cisalhamento.



Fonte: Autora (2025).

Sendo assim, de forma resumida, as etapas de preparação consistiram em:

- Demarcação da área de reforço (largura de 50cm – igual a largura do rolo da manta, cobrindo todos os lados da viga para o reforço em “U”) e lixamento da superfície;
- Medição e corte das mantas tanto para o reforço em “U” quanto as tiras de reforço utilizadas na flexão, com 1,00m de comprimento pela largura da base da viga que era de 15cm;
- Preparo do Adesivo Tix misturando os componentes A e B até obter uma mistura homogênea e aplicação com desempenadeira lisa, respeitando o tempo em aberto do produto;
- Aplicação da manta com pressão manual, seguida por pressão mediante rolo liso;
- Preparo e aplicação do adesivo impregnante, para endurecer a manta.

Essas etapas foram seguidas em todos os lotes reforçados, com exceção do último, em que o reforço foi aplicado sem preparo do substrato. Uma vez que o objetivo era avaliar possíveis erros de aplicação, considerou-se a probabilidade de, em uma

situação de obra, sem mão de obra qualificada, ocorrer a aplicação direta do reforço sem a observação dos cuidados com o substrato.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios que fizeram parte do programa experimental. Com o propósito de avaliar o desempenho das vigas reforçadas ao cisalhamento com manta de PRFC, considerando erros de colagem que podem ocorrer em uma situação com mão de obra sem especialização, é comparado os resultados obtidos e verificadas as implicações estruturais conforme lotes de ensaio e suas configurações de reforço.

4.1 AVALIAÇÃO DE CARGAS, DESLOCAMENTOS OBTIDOS E MODOS DE RUPTURA

Após a realização dos ensaios, todos os dados obtidos foram agrupados em uma tabela para facilitar a visualização. As vigas foram separadas em lotes, conforme mencionado, sendo cada um composto por 03 vigas, sendo avaliados comparativamente: a carga de ruptura, o incremento na resistência proporcionado pela aplicação do reforço, o sistema de reforço empregado, o deslocamento e o modo de ruptura.

Apesar de todas as vigas terem sido reforçadas com emprego da manta em “U”, cada lote teve um sistema de colagem diferente, o que implica na necessidade de não apenas avaliar o incremento, mas a eficiência com relação aos parâmetros de rigidez. Além disso, considerando que o reforço com materiais compósitos pode alterar o modo de ruptura do elemento reforçado, foi avaliado o comportamento da viga ao longo do ensaio, conforme evolução do carregamento.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de flexão em três pontos, com a carga aplicada a 40cm da face externa do apoio:

Tabela 9 – Resultado dos ensaios de resistência ao cisalhamento

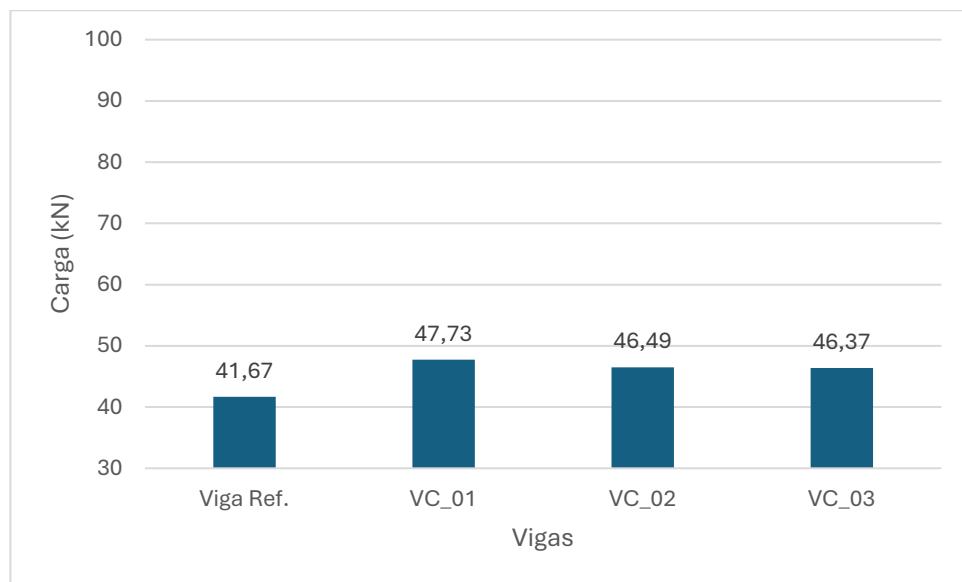
Viga	Lot e	Reforço PRFC	Carga de Ruptura (kN)	Deslocamento máx. (mm)	Modo de Ruptura	Incremento (%)
V1	1	-	45,32	87,83	Cisalhamento (tração diagonal)	-
V2	1	-	33,66	80,93	Cisalhamento (tração diagonal)	-
V3	1	-	46,02	87,34	Cisalhamento (tração diagonal)	-
VC_01	2	"U"	47,73	70,21	Cisalhamento	14,55%
VC_02	2	"U"	46,49	65,61	Cisalhamento	11,58%
VC_03	2	"U"	46,37	67,53	Cisalhamento	11,29%
VER_01 *	3	"U0"	83,98	75,93	Flexão (Rompimento barra longitudinal)	101,55%
VER_02 *	3	"U0"	81,38	70,95	Cisalhamento (descolamento da manta)	95,31%
VER_03	3	"U"	45,92	70,97	Cisalhamento (tração diagonal)	10,21%
VER_04	4	"U"	43,52	68,51	Cisalhamento (descolamento da manta)	4,45%
VER_05	4	"U"	46,85	71,88	Cisalhamento (descolamento da manta)	12,44%
VER_06	4	"U"	45,34	74,45	Cisalhamento (descolamento da manta)	8,82%

Fonte: Autora.

*VER_01 e VER_02 com a manta colada com as fibras na direção horizontal.

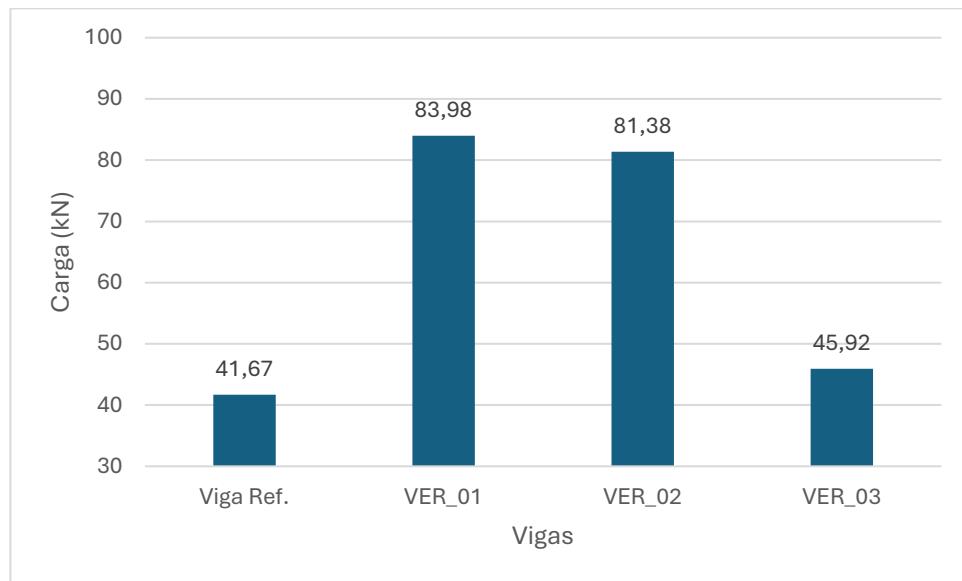
Analizando comparativamente cada lote com a média das vigas de referência, os gráficos 1, 2 e 3 demonstram o aumento na carga última de ruptura:

Gráfico 1 – Carga máxima nas vigas do Lote 02 (coladas pelo fabricante) em comparação às vigas referência.



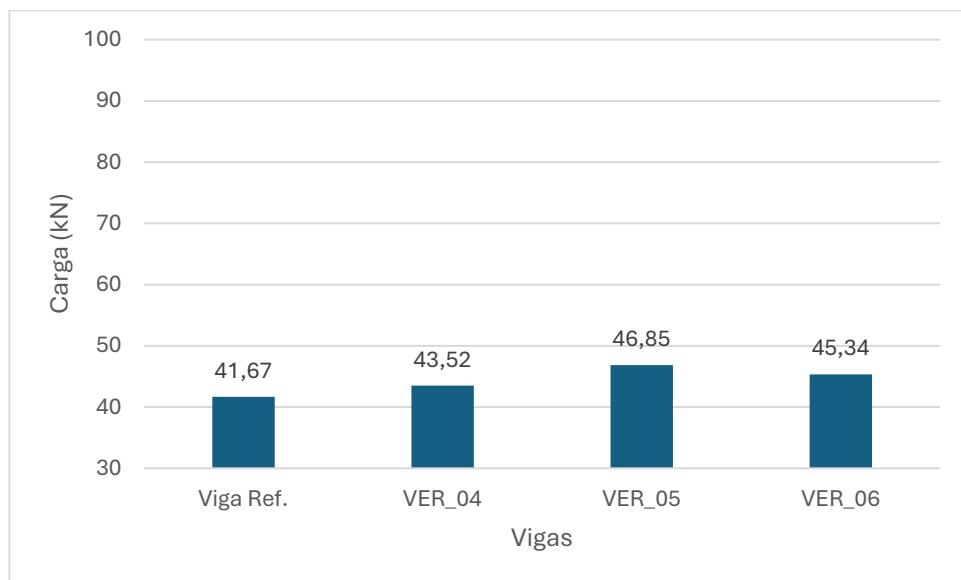
Fonte: Autora (2025).

Gráfico 2 – Carga máxima nas vigas do Lote 03 (com menor quantidade de adesivo impregnante) em comparação às vigas referência.



Fonte: Autora (2025).

Gráfico 3 – Carga máxima nas vigas do Lote 04 (sem preparo do substrato) em comparação às vigas referência.



Fonte: Autora (2025).

4.1.1 Cargas e modo de ruptura

As vigas de referência romperam por cisalhamento, com uma carga média de ruptura de 41,67 kN, sendo que a viga V2 girou durante o ensaio, desestabilizando do apoio. Ao atingir a carga de 29,46 kN, houve um aumento na abertura da fissura de cisalhamento e da deformação na peça, momento em que o ensaio precisou ser pausado para reposicionar a viga, que não conseguiu atingir a mesma carga que as demais vigas do lote. A Figura 28 mostra a ruptura da V2.

Figura 28 – Ruptura da viga V2 por cisalhamento.



Fonte: Autora (2025).

Com a aplicação dos reforços nos demais lotes, observou-se que não apenas houve incremento de capacidade resistente como a forma de ruptura foi alterada em algumas das vigas. Ainda, o deslocamento máximo diminui, mostrando uma maior rigidez dos sistemas de reforço.

Observando os dados dispostos na Tabela 8, observa-se que os maiores incrementos em capacidade resistente foram obtidos em duas vigas do lote 03, com acréscimo de 101,55% na Viga VER_01 e 95,31% na Viga VER_02, justamente as vigas que, além do erro forçado de colagem com aplicação de adesivo impregnante em faixas, tiveram as mantas coladas acidentalmente com as fibras na horizontal, paralelas ao eixo longitudinal da viga.

Sendo assim, as vigas VER_01 e VER_02 apresentaram uma capacidade resistente bastante superior aos demais lotes, contrariando alguns resultados obtidos em trabalhos anteriores. Triantafillou (1998) apontava que, quando o ângulo β , que representa o ângulo de inclinação das fibras de PRF em relação ao eixo longitudinal do elemento reforçado é igual a 0° , a contribuição prevista do PRF para a resistência ao cisalhamento seria igualmente zero. Todavia, no caso da viga VER_02, a ruptura se deu por cisalhamento com o descolamento da manta em conjunto com o destacamento de uma camada de concreto, sendo que a fissura se propagou

descolando a região da manta que não apresentava adesivo impregnante, conforme Figura 29 (a) e (b).

Figura 29 – Detalhe da ruptura da VER_02 e o descolamento da manta.



Fonte: Autora (2025).

Arduini et al. (1997) realizaram um estudo comparativo de vigas pré-fissuradas e perceberam que a combinação entre uma camada de manta de PRFC posicionada nas laterais da viga, com as fibras a 0° em relação ao eixo longitudinal, com uma camada em sequência com as fibras a 90° , permitiu que a carga aumentasse até que a resistência ao cisalhamento da viga fosse atingida.

Na situação analisada, percebe-se que a falha na ancoragem do reforço em sua extremidade pode ter favorecido esse arrancamento do concreto uma vez que, de acordo com Beber (2003), os adesivos utilizados no sistema de reforço apresentam uma resistência à tração muito maior do que a do concreto, consequentemente sendo o concreto o elo frágil responsável pela ruptura – pela Figura 29 (a) e (b) percebe-se que o destacamento do cobrimento se deu justamente na faixa com adesivo impregnante aplicado.

No caso da VER_01, a ruptura ocorreu por flexão, inicialmente descolando o reforço aplicado no meio do vão, quando a viga atingiu 80 kN de carga. Até esse momento, outras fissuras de flexão surgiram, e, dado o aumento da abertura da fissura de flexão que se estendeu até o ponto de aplicação da carga, o reforço aplicado ao cisalhamento também começou a se destacar, levando à ruptura de uma das barras da armadura longitudinal da viga. Observa-se, portanto, que houve uma modificação no modo de ruptura previsto para essa viga.

A região sem adesivo impregnante foi na parte superior de um lado da viga (Figura 30a) e na parte inferior do outro lado, onde o descolamento do PRFC foi maior e acompanhou a evolução da abertura da fissura. Na Figura 30b é possível visualizar a face inferior da viga com a barra metálica de Ø8mm rompida.

Figura 30 – Detalhe da ruptura da VER_01 e o rompimento da armadura.



Fonte: Autora (2025).

A última viga do Lote 03, a VER_03, teve seu reforço colado com as fibras a 90° com relação ao eixo longitudinal da viga, apresentando acréscimo na resistência de 10,21% em relação à média das vigas de referência, distanciando-se das demais vigas do lote devido à forma de colagem.

A faixa sem aplicação de adesivo impregnante foi apenas próximo à quina na mudança de direção para a parte inferior da viga, onde houve o descolamento da manta com a aplicação da carga. As fissuras começaram na parte de baixo da viga, estendendo-se em direção ao ponto de aplicação da carga quase sem inclinação. Foram duas fissuras mais críticas sendo que a fissura que apresentou maior abertura foi imediatamente abaixo do ponto de aplicação da carga, conforme demonstrado na Figura 31.

Figura 31 – Detalhe da ruptura da VER_03.



Fonte: Autora (2025).

No caso desta viga, entende-se que o baixo acréscimo à capacidade resistente se deu justamente pela área sem adesivo impregnante estar localizada em uma região de concentração de tensões como é o caso das quinas. Chen e Teng (2003) destacam que, havendo áreas parcialmente descoladas nessas regiões, o PRFC se rompe antes de atingir sua resistência última, sendo que, uma vez iniciado o descolamento, a falha ocorre rapidamente, resultando em um comportamento de baixa ductilidade.

As vigas do Lote 04 apresentaram incrementos de capacidade na ordem de 4,45% a 12,44%, sendo que todas elas foram reforçadas sem preparo do substrato. Considerando a viga VER_04, que obteve o menor acréscimo em relação à viga de referência, a ruptura no reforço começou na parte inferior da manta, à medida que a fissura de cisalhamento se prolongou até a região da aplicação da carga, com menor inclinação do que a fissura da viga de referência, levando ao destacamento do reforço em uma faixa, conforme Figura 32:

Figura 32 – Detalhe da ruptura da VER_04.



Fonte: Autora (2025).

As vigas do Lote 02 foram coladas pelo fabricante da manta, a empresa Quartzolit, para que o procedimento de preparo do substrato, aplicação de adesivo e impregnante fossem de acordo com o que seu manual prescreve. Porém, o resultado dessas vigas foi influenciado pela camada de regularização aplicada na viga, antes da execução do reforço pela empresa, com argamassa de cimento e areia. Devido à baixa resistência da argamassa de regularização, houve o deslocamento parcial dessa camada no momento em que a viga atingia uma carga de 25 kN. Com isso, o incremento se manteve na média de 12,47%, sendo que a maior capacidade obtida foi na viga VC_01 que rompeu com uma carga de 47,73 kN. Apesar disso, as vigas demonstraram um aumento da rigidez e ductilidade, suportando a deformação por maior tempo antes do rompimento.

Como se pode observar na Figura 33, antes da ruptura, houve um aumento das fissuras de flexão antes do reforço (destacadas na foto) e não houve descolamento da manta:

Figura 33 – Detalhe da ruptura da VC_01.



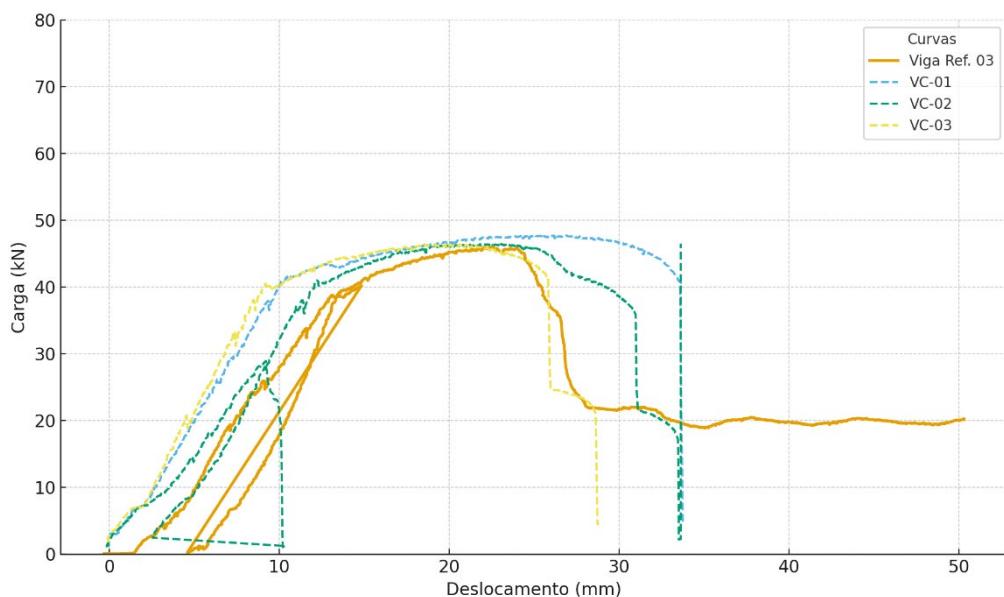
Fonte: Autora (2025).

4.1.2 Deslocamentos e deformações das vigas

A seguir, apresentam-se os comparativos de cada lote com uma das vigas de referência para fins de facilitar a análise. Uma vez que a viga de referência 2 apresentou o comportamento mais destoante, devido ao movimento brusco que sofreu durante o ensaio, optou-se por realizar o comparativo de cada lote com a viga de referência 3, que se mostrou similar à primeira viga ensaiada. Ainda assim, cumpre mencionar que a leitura do ensaio da V03 teve um erro por volta dos 40kN, portanto o gráfico apresenta um ciclo, voltando a zero e tornando a atingir os 40kN nesse ponto.

Analizando inicialmente o Lote 2, que eram as vigas VC_01 a VC_03, cujo reforço foi colado pelo fabricante, observa-se que as vigas reforçadas apresentaram maior rigidez até a carga máxima, em comparação com a viga referência, apresentando ainda um certo ganho de resistência após a ruptura, até perder resistência bruscamente, com o rompimento do reforço por tração na costura entre as fibras onde a fissura se estendeu até o ponto de aplicação da carga. O gráfico 4 mostra as curvas de força versus deslocamento das vigas VC_01 a 03 em comparação com a Viga Referência 03.

Gráfico 4 – Carga x Deslocamento vigas VC_01 a 03 em comparação com a Viga Referência 03

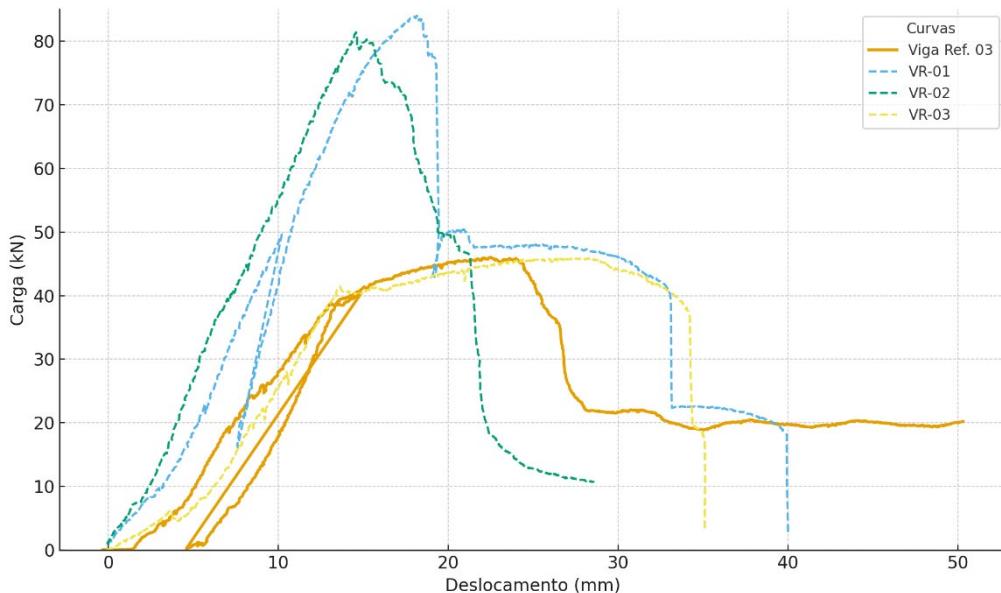


Fonte: Autora (2025).

A viga referência, por sua vez, apresentou um comportamento mais dúctil após uma considerável perda de resistência experimentada na carga de ruptura, aumentando progressivamente seu deslocamento até perder totalmente sua capacidade de carga.

As vigas do Lote 03, com aplicação do adesivo impregnante em faixas, considerando, ainda, a VER_01 e VER_02 com a manta colada em “U” com as fibras a 0°, obtiveram uma rigidez elevada com ruptura frágil após o descolamento da manta nas faixas sem impregnante. A VER_01, cuja ruptura foi por flexão, com rompimento de uma das barras da armadura longitudinal de tração, após a carga de ruptura sofreu uma perda brusca de resistência e se manteve aumentando progressivamente o deslocamento, com um comportamento mais dúctil que as demais vigas do lote devido ao rompimento por flexão. Já a VER_03, com a fibra colada em “U” a 90° com o eixo longitudinal da viga, apresentou maior rigidez inicial do que a viga de referência, sem atingir os mesmos patamares que as outras duas vigas, mantendo um comportamento mais dúctil a partir da carga de fissuração (39,50 kN) até atingir a carga de ruptura e perder resistência de forma frágil, conforme demonstra o gráfico 5.

Gráfico 5 – Carga x Deslocamento vigas VER_01 a 03 em comparação com a viga de referência

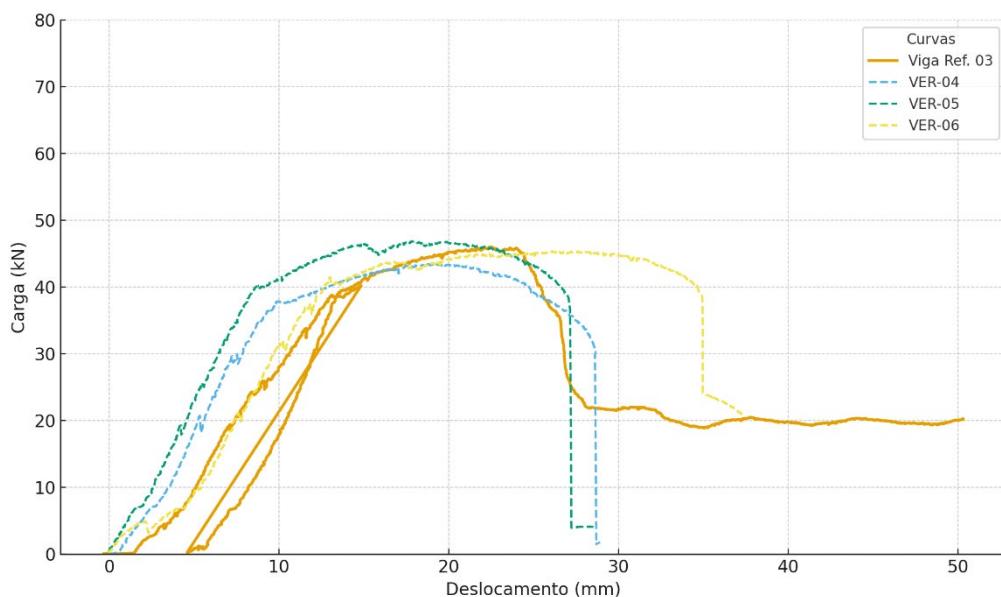


Fonte: Autora (2025).

Analizando o Lote 04, com as vigas que receberam reforço sem preparo do substrato, percebe-se que não houve acréscimo significativo na rigidez das vigas, em

comparação à viga de referência, com a VER_04 e a VER_05 apresentando deslocamentos iniciais maiores para as mesmas cargas que a referência. Todas as vigas desse lote apresentaram descolamentos parciais do PRFC quando a fissura de cisalhamento atingiu a zona comprimida da viga, além de terem apresentado os menores incrementos de capacidade resistente, o que demonstra a influência do preparo adequado do substrato no desempenho do reforço. Esse comportamento é ilustrado no gráfico 6:

Gráfico 6 – Carga x Deslocamento vigas VER_04 a 06 em comparação com a viga de referência



Fonte: Autora (2025).

4.1.3 Comportamento do reforço

Analizando comparativamente a viga com melhor desempenho de cada lote, com a viga referência 03, é possível verificar a contribuição do reforço verificando o início da fissuração, o deslocamento e a carga, conforme resumo na tabela 10.

Tabela 10 – Comparativo entre as vigas de melhor desempenho e a V3

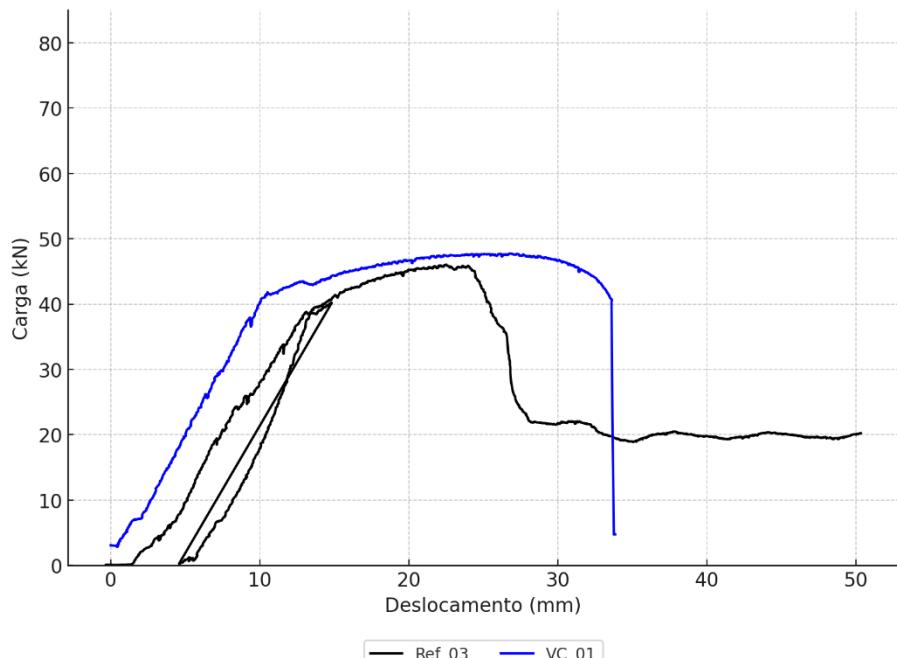
Viga	Lote	Carga de início da fissuração (kN)	Carga Ruptura (kN)	Comparativo ruptura	Deslocamento máximo (mm)
V3	Ref.	22,01	46,02		87,34
VC_01	2	32,0	47,73	3,72%	70,21
VER_01*	3	52,0	83,98	82,49%	75,93
VER_05	4	43,0	46,85	1,80%	71,88

*Manta colada com fibras na direção longitudinal da viga

Fonte: Autora (2025).

A viga VC_01, em comparação com a viga de referência 03, apresentou a carga de início de fissuração 45,39% superior à referência, apesar de ter um incremento na resistência de apenas 3,72%. Observando o gráfico 7 comparativo entre esses dois elementos, percebe-se que o reforço contribuiu para um aumento da rigidez inicial, com a curva mais inclinada do que a viga de referência:

Gráfico 7 – Carga x Deslocamento viga VC_01 em comparação com a viga de referência 03



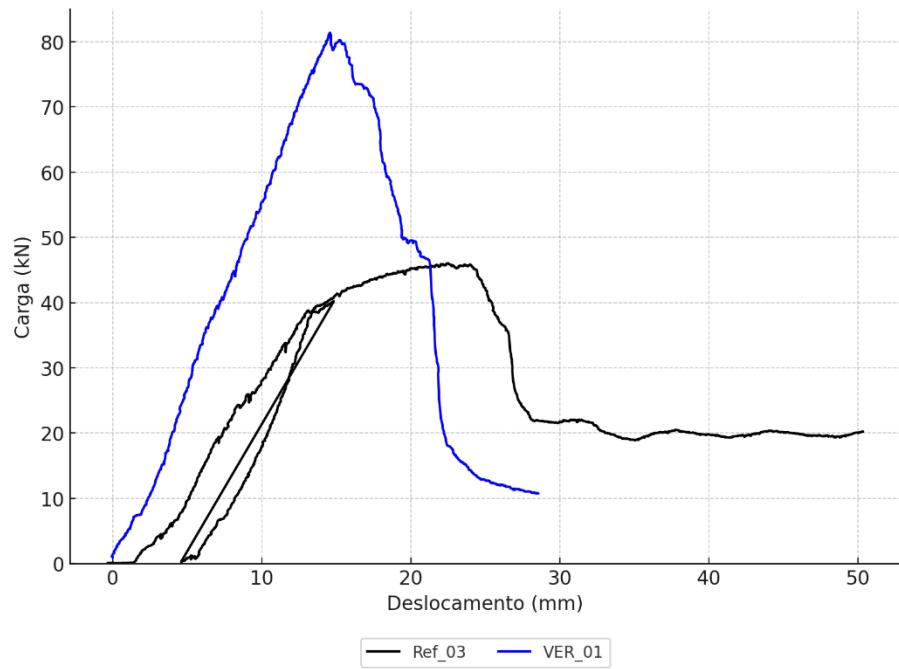
Fonte: Autora (2025).

O desempenho foi melhor na fase elástica, representando pouco acréscimo na resistência final, sem que houvesse, no entanto, um descolamento da manta de PRFC, apenas um destacamento da costura na região de abertura da fissura. A viga de referência rompeu com uma fissura típica de cisalhamento, inclinando-se a partir do apoio em direção ao ponto de aplicação da carga, enquanto a viga VC_01 apresentou uma fissura quase em pé, praticamente abaixo do ponto de aplicação da carga, contornando todo o elemento.

As primeiras fissuras visíveis que surgiram na VC_01 foram todas de flexão, com início aos 32 kN e apresentou um comportamento mais dúctil, com deslocamento na ordem de 63,12mm no momento da ruptura, inferior ao da viga de referência, indicando maior capacidade de deformação antes de uma falha abrupta.

Comparando a viga VER_01, a qual teve o reforço colado com as fibras à 0° em relação ao eixo longitudinal, o gráfico 8 se apresentou da seguinte forma:

Gráfico 8 – Carga x Deslocamento viga VER_01 em comparação com a viga de referência 03



Fonte: Autora (2025).

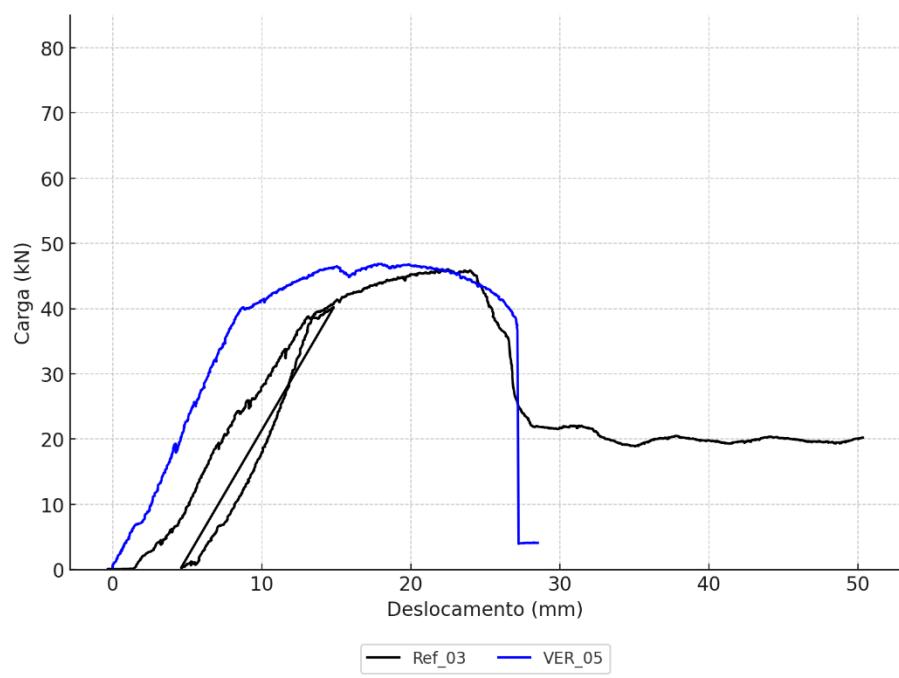
Neste caso o reforço também conferiu maior rigidez à viga antes da fissuração, a qual ocorreu com uma diferença de 136,26% em relação à viga de referência 03. Desse modo, percebe-se o ganho de resistência proporcionado pelo reforço, suportando praticamente o dobro de carga no ensaio.

Enquanto a viga de referência rompeu por cisalhamento, a VER_02 rompeu por flexão, com o rompimento da barra de armadura longitudinal e fissuração típica, com arrancamento de parte do concreto de cobrimento junto com a manta. Essa viga também foi colada com erro forçado, com menor quantidade de adesivo impregnante, o que dificultou a aderência na viga. Percebe-se, portanto, que se fosse utilizado um dispositivo de ancoragem nas bordas, o desempenho teria sido melhor, além, é claro, de contar com a aplicação adequada com adesivo impregnante em todo o sistema, e não em faixas.

Mesmo com a colagem inadequada, o desempenho foi muito similar às demais vigas reforçadas (exceto aquelas com as fibras a 0°), com deslocamentos maiores na ruptura do que a viga de referência, indicando maior capacidade de deformação até a falha total. Entretanto, devido à falta de dispositivo de ancoragem e do impregnante em toda a área de reforço, a ruptura foi brusca, com perda significativa de carga após a carga de ruptura, porém com um resíduo de resistência, sugerindo que parte da seção continuou resistindo após a falha principal, uma vez que a ruptura foi localizada.

O gráfico 9 apresenta, por fim, a comparação entre a viga VER_05 e a viga de referência 03:

Gráfico 9 – Carga x Deslocamento viga VER_05 em comparação com a viga de referência 03

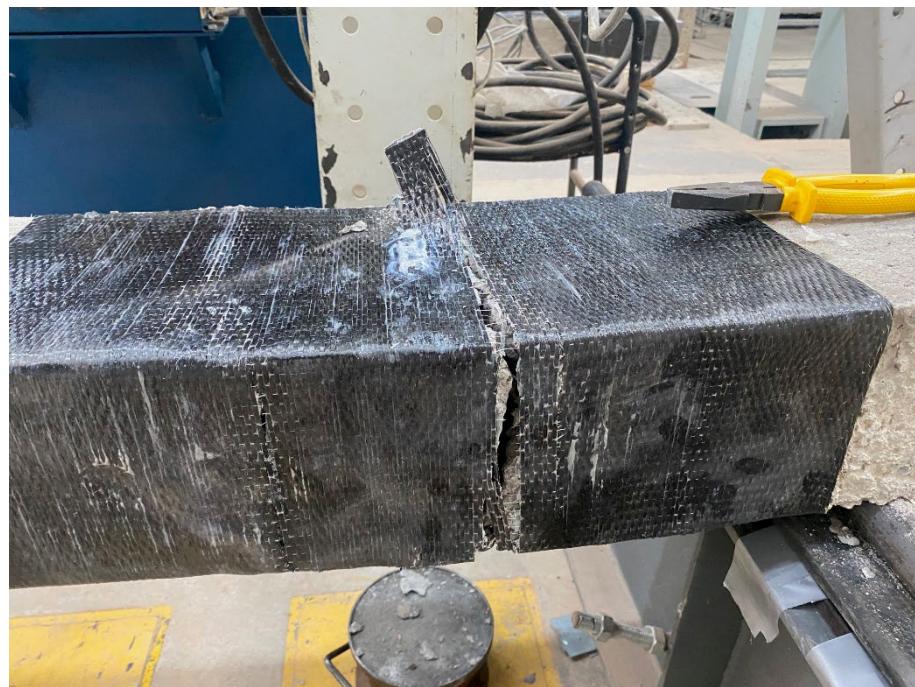


Fonte: Autora (2025).

Ao contrário das demais, nessa viga o reforço não apresentou impacto na rigidez da viga, apresentando inclinação parecida e até inferior à viga de referência até o início da fissuração. Ainda, percebe-se que o início da fissuração ocorreu pouco antes da carga de ruptura, o que indica que, apesar de representar um baixo incremento na resistência, o reforço aumentou a capacidade de absorção dos esforços antes da fissuração. Sendo assim, o reforço retardou a fissuração, apesar praticamente não proporcionar ganhos de carga última, o que indica a falha na interface adesiva do PRFC.

Esse lote de viga foi reforçado sem o preparo do substrato, o que demonstra a importância dessa etapa na eficácia do sistema. Sem o lixamento e remoção da poeira, a aderência do reforço foi prejudicada, com descolamento da manta em diversos pontos e a fissura de cisalhamento destacando a manta com uma fina camada do cobrimento junto dela, conforme Figura 34:

Figura 34 – Viga VER_05 após rompimento: observa-se a manta “enrugada”, com descolamento em vários pontos e o destacamento junto à fissura crítica.

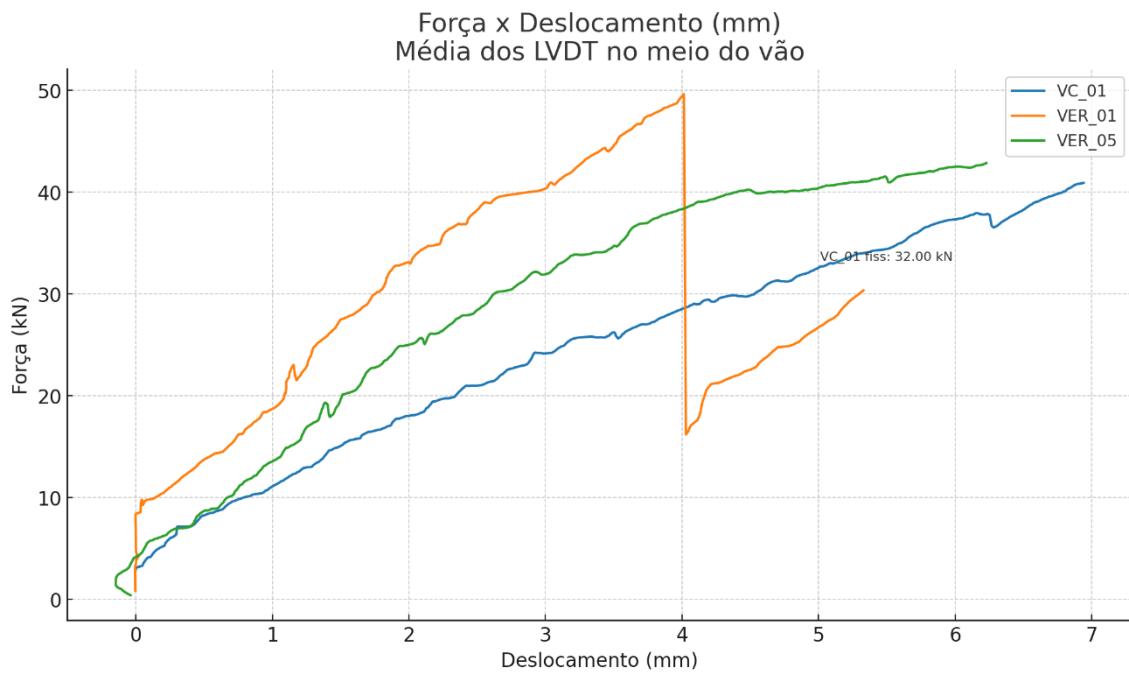


Fonte: Autora (2025).

Analizando o resultado obtido pelos LVDT's posicionados no meio do vão, é possível identificar o desempenho de cada lote de vigas quanto ao deslocamento na seção central, a partir da média da leitura em cada lado da viga neste ponto.

Tomando por base o resultado das vigas VC_01, VER_01 e VER_05, foi elaborado o gráfico 10 de modo a apresentar o comparativo de força e deslocamento na seção central:

Gráfico 10 – Carga x Deslocamento seção central das vigas VC_01, VER_01 e VER_05



Fonte: Autora (2025).

Pelo gráfico 10 se observa a diferença do comportamento entre as três vigas analisadas, onde a viga VER_01 se destaca pelo aumento na rigidez inicial, suportando maiores cargas com deslocamento inferior às demais, sendo que a queda brusca na força registrada no gráfico se deve à pausa que foi dada aos 52 kN por erro na leitura, tornando a ganhar força em seguida até a ruptura por flexão. Ressalta-se que os LVDT's foram removidos antes da ruptura das vigas ensaiadas para não danificar o equipamento.

Comparando agora a Viga VC_01 com a VER_05, que obtiveram resultados similares no incremento de resistência em comparação com a viga de referência, percebe-se que a VER_05 apresenta rigidez ligeiramente superior, porém essa viga rompeu pouco depois do início da fissuração, demonstrando ineficiência na transferência de esforços para a manta de fibra de carbono, indicando a sua ruptura governada pelo descolamento da manta.

A Viga VC_01 apresentou menor rigidez inicial porém, após a fissuração aos 32,0 kN, ainda demonstrou uma capacidade adicional de resistência até a ruptura, mesmo que com incremento final de apenas 3,72% em relação à viga de referência V3 e 14,5% em relação à média das três vigas de referência.

5 CONCLUSÕES

O desempenho em serviço das estruturas de concreto armado depende não apenas do projeto elaborado em conformidade com o uso previsto e da correta execução em campo, como também das manutenções preventivas, sendo essas últimas cruciais para a garantia da vida útil dos elementos estruturais.

Todavia, não é incomum que as edificações passem por alteração de uso ou que a inércia nas manutenções provoque a evolução de danos eventualmente existentes, sendo necessário intervir nessas construções de maneira a recuperar a capacidade resistente do elemento ou mesmo aumentar sua capacidade portante.

Na busca por alternativas menos invasivas, o reforço com utilização de compósitos se mostra relevante, alterando minimamente a dimensão dos elementos estruturais, além de diversos outros benefícios elencados nesta dissertação, porém é sabido que o mercado da construção civil enfrenta dificuldades na qualificação da mão-de-obra, principalmente quando se trata de atividades específicas como reforço estrutural.

Desse modo, o presente estudo procurou avaliar o comportamento de vigas reforçadas ao cisalhamento através de mantas de fibra de carbono coladas em "U", sem dispositivos de ancoragem, comparando os resultados das vigas de referência com três lotes de vigas reforçadas, sendo dois destes lotes com erros forçados na colagem das mantas.

Em todos os lotes foram observados incrementos na resistência ao cisalhamento, mesmo nas vigas com falha na preparação do substrato – ainda que em menor escala. A elevação da resistência foi ainda superior nas vigas em que, além do erro forçado com aplicação do adesivo impregnante em faixas, as mantas foram coladas com as fibras orientadas à 0° em relação ao eixo longitudinal das vigas que, segundo estudos, não contribuiria efetivamente ao cisalhamento. Para essas vigas, o incremento chegou a ordem de 101,55% em relação à média das vigas de referências, um resultado expressivo apesar da ruptura brusca sofrida pela viga.

As vigas com reforço colado pelo fabricante tiveram seu resultado comprometido pela regularização de superfície executada com nata de cimento e areia, ao invés da massa epóxi específica para essa situação. O material não foi previsto inicialmente pelo fato de que as vigas seriam produzidas, teoricamente, em local controlado, porém a falha na conferência das armaduras antes da concretagem

culminou com a necessidade de inverter as vigas, para que as barras de ferro Ø8mm se mantivessem na zona de tração da viga e não comprometessem o ensaio de resistência ao cisalhamento.

Sendo assim, apesar de ter obtido um incremento de resistência equivalente a 12,47%, em média, os resultados poderiam ter sido ainda melhores com a preparação adequada do substrato, visto que o comportamento dessas vigas foi superior às demais no ponto de vista de aderência do reforço ao substrato. Mesmo sem ancoragem, não houve destacamento da manta ou do cobrimento do concreto, o compósito rompeu a costura entre as fibras devido à tração no elemento, com uma fissura que seccionou a seção transversal, visto que acompanha o formato “U” do reforço, subindo praticamente à 90° em direção ao ponto de aplicação da carga.

Os resultados evidenciam a importância do preparo adequado da viga que irá receber o reforço como também da utilização de dispositivos de ancoragem, visto que algumas falhas ocorreram por destacamento da manta junto às bordas. Além disso, a quina das vigas devem ser objeto de atenção especial, com adoção de chanfros, por exemplo, para melhorar a aderência da manta na troca de direção, visto que, em algumas vigas ensaiadas, este foi o primeiro local a se observar um destacamento da manta devido às altas tensões concentradas nessa região.

Ressalta-se, porém, que mesmo com as falhas propositais foram atingidos resultados considerados positivos, que demonstram a eficiência da manta de fibra de carbono como reforço estrutural ao cisalhamento. As faixas de reforço adicionadas na zona de tração das vigas contribuíram para o aumento da rigidez desses elementos, sendo que este reforço foi adicionado para elevar a resistência à flexão das vigas e permitir a análise da contribuição do reforço aplicado ao cisalhamento.

Além disso, o padrão de fissuração também foi modificado nas vigas reforçadas. Enquanto as vigas de referência romperam com fissuras típicas de cisalhamento, com maior abertura junto à base e inclinando-se a partir do apoio em direção ao ponto de aplicação da carga, a maioria das vigas reforçadas apresentou significativa redução na abertura das fissuras, além da alteração da inclinação, com fissuras praticamente a 90° na viga, abaixo do ponto de aplicação da carga. Ainda, algumas vigas apresentaram um atraso no início da fissuração, retardando, com isso, o colapso e, em parte delas, melhorando o comportamento pós-fissuração.

Apesar de apresentar incremento de resistência, discreto em algumas vigas e mais relevante em outras, os resultados demonstram que as rupturas se deram por

mecanismos típicos de cisalhamento, seja por ruptura de tração diagonal, seja por descolamento prematuro da manta, o que evidencia que a eficácia do reforço está diretamente relacionada à aderência e aos dispositivos de ancoragem que poderiam ser utilizados.

Assim, percebe-se que numa situação normal de obra, sem a utilização de uma mão de obra especializada para reforços estruturais, poderiam ser obtidos resultados satisfatórios do ponto de vista de aumento da capacidade portante do elemento, porém, não se afasta a necessidade de uma análise minuciosa com o correto dimensionamento do reforço, além da aplicação das técnicas adequadas para o preparo do substrato, respeitando as recomendações do fabricante, principalmente em situações críticas de insuficiência estrutural do elemento.

Entende-se, portanto, que a presente dissertação contribui para confirmar o desempenho das mantas de fibra de carbono no reforço ao cisalhamento e na compreensão da relevância da utilização de técnicas adequadas para aplicação do reforço, demonstrando o impacto disso nos resultados obtidos em ensaios.

De modo a aprimorar estes resultados, como sugestão para estudos futuros e continuidade da pesquisa, podem ser complementados com ensaios adicionais, a exemplo do *pull-off*, que é um ensaio de arrancamento utilizado para verificar a qualidade do reforço aplicado, principalmente para continuar avaliando o fator “mão-de-obra” na execução do reforço.

Outro ponto importante seria avaliar o reforço com o acréscimo de dispositivos de ancoragem, verificando a diferença no comportamento das vigas ensaiadas, além de se utilizar de outras configurações de reforço que não apenas o formato “U”. Apesar de ser o mais usual para o cisalhamento, além de ser a técnica mais provável numa situação de obra, onde geralmente não será possível realizar o envolvimento total da viga, podem ser estudados os resultados combinados entre manta de fibra de carbono e laminados, viabilizando, ainda, uma análise combinada de reforço à flexão e ao cisalhamento.

Uma vez que a presente dissertação avaliou apenas o reforço aplicado de modo contínuo com manta de fibra de carbono, outra sugestão de estudo futuro pode incluir um comparativo com a utilização da manta em tiras espaçadas, além de realizar um modelo numérico para simular o comportamento dessas vigas e comparar com os resultados obtidos nos ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 440. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. American Concrete Institute, 2008.

ALEKSEENKO, V. V.; TYUKAVKIN, E. A.; KAUNOVA, A. S. **Reinforcement of concrete structures with external reinforcement system with composite materials**. In: IOP Publishing Ltd, 6 maio 2021.

ARCINE, Maicon De Freitas; MENON, Nara Villanova. Avanços no estudo experimental e analítico de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com PRF – um estudo na literatura. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 59, n. 3, p. 912, 30 set. 2022.

ARDUINI, Marco; NANNI, Antonio. Behavior od Precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets. **Journal Of Composites For Construction**, v. 1, n.2, maio 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, NBR 6118**. Rio de Janeiro, ABNT, 2024, 238p.

BEBER, Andriei José. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BENJEDDOU, Omrane; OUEZDOU, Mongi Ben; BEDDAY, Aouicha. Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 6, p. 1301–1310, jun. 2007.

BOLINA, Fabrício Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

CHEN, J. F.; TENG, J. G. Shear Capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams: Fiber Reinforced Polymer Rupture. **Journal of Structural Engineering**, v. 129, n. 5, p. 615–625, mai. 2003.

CHOI, Sungwon *et al.* Durability of Concrete Beams Externally Reinforced with CFRP Composites Exposed to Various Environments. **Journal of Composites for Construction**, v. 16, n. 1, fev. 2012.

DALFRÉ, Gláucia Maria. **Polímeros reforçados com fibras na construção civil**: dimensionamento de sistemas de reforço e armaduras não metálicas à flexão e ao cisalhamento segundo normas ACI. São Carlos: EdUFSCar, 2022.

DE LORENZIS, L.; TENG, J. G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. **Composites Part B: Engineering**, v. 38, n. 2, p. 119–143, mar. 2007.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bulletin 14: **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures : technical report on the design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures**. International Federation for Structural Concrete, 2001.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bulletin 35: **Retrofitting of concrete structures by externally bonded FRPs**: with emphasis on seismic applications. International Federation for Structural Concrete, 2006.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bulletin 90: **Externally Applied FRP reinforcement for concrete structures**. International Federation for Structural Concrete, 2019.

FORTES, Adriano Silva *et al.* **Reforço de elementos estruturais de concreto com sistemas de polímeros reforçados com fibra (FRP) aplicado externamente**. 1a ed. São Paulo: IBRACON, 2023.

GARCEZ, Mônica Regina. **Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GRIBNIAK, Viktor *et al.* Mechanical behavior of steel fiber-reinforced concrete beams bonded with external carbon fiber sheets. **Materials**, v. 10, n. 6, 2017.

HAWILEH, R. A. *et al.* Modeling of insulated CFRP-strengthened reinforced concrete T-beam exposed to fire. **Engineering Structures**, v. 31, n. 12, p. 3072–3079, dez. 2009.

HELENE, Paulo. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto.** 2a ed. São Paulo: Pini, 1992.

JI, Sang Won; YEON, Yeong Mo; HONG, Ki Nam. Predicting shear behavior of reinforced-concrete beams shear-strengthened using near-surface mounted fiber-reinforced polymer method. **Composite Structures**, v. 311, 1 maio 2023.

KARBHARI, Vistasp M.; ZHAO, Lei. Use of composites for 21st century civil infrastructure. **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.**, v. 185, p. 433-454, 2000. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/cma>. Acesso em: 14 abr. 2024.

KODUR, V. K. R.; BHATT, P. P. A numerical approach for modeling response of fiber reinforced polymer strengthened concrete slabs exposed to fire. **Composite Structures**, v. 187, p. 226–240, 1 mar. 2018.

LIU, Fangbiao *et al.* Reviews on Interfacial Properties of the Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. *In: IOP Publishing Ltd*, 17 out. 2020.

MENON, Nara Villanova. **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC).** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração Estruturas. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MHANNA, Haya H.; HAWILEH, Rami A.; ABDALLA, Jamal A. Shear behavior of RC T-beams externally strengthened with anchored high modulus carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates. **Composite Structures**, v. 272, 15 set. 2021.

RASHEED, Hayder A. **Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP**. CRC Press: 2014. ISBN 13:978-1-4822-3559-3.

REZENDE, Mirabel C. O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, 2000.

SANTO, Jayana Naila Silva do Espírito; DOS SANTOS, Luiz Henrique Rocha; TAPAJÓS, Luamim Sales. Resistência ao cisalhamento direto de elementos em concreto armado pelo método de push-off. **Brazilian Journal of Development**, p. 55039–55049, 2 ago. 2022.

SANTOS, Daniel dos. **Análise de vigas de concreto armado utilizando modelos de bielas e tirantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

SARTI JÚNIOR, Luiz Antônio. **Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas a degradação acelerada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, 2020.

SHARMA, Mohit et al. Carbon fiber surfaces and composite interphases. **Composites Science and Technology**, v. 102, p. 35-50, out. 2014.

ŠIMŮNEK, Petr et al. Effect of an acidic environment on a glass fibre reinforced polymer grid. **MATEC Web of Conferences**, v. 310, 2020.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TÄLJSTEN, Bjorn; ELFREN, L. Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods. **Composites: Part B**, v. 31, p. 87-96, 2000.

TÄLJSTEN, Bjorn. Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. **Construction and Building Materials**, v. 17, p. 15-26, 2003.

TENG, J. G.; CHEN, J. F. Debonding Failures Of Rc Beams Strengthened With Externally Bonded Frp Reinforcement: Behaviour And Modelling. **Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007)**, International Institute for FRP in Construction, 2007.

TRIANTAFILLOU, Thanasis C. Shear Strengthening Of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites. **ACI Structural Journal**, 1998.

WU, Hwai-Chung; EAMON, Christopher D. **Strengthening of Concrete Structures Using Fiber Reinforced Polymers (FRP)**. Elsevier: 2017. ISBN 978-0-08-100636-8.

ZHANG, Xiaoqing et al. Interfacial microstructure and properties of carbon fiber composites modified with graphene oxide. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 4, n. 3, p. 1543–1552, 28 mar. 2012.

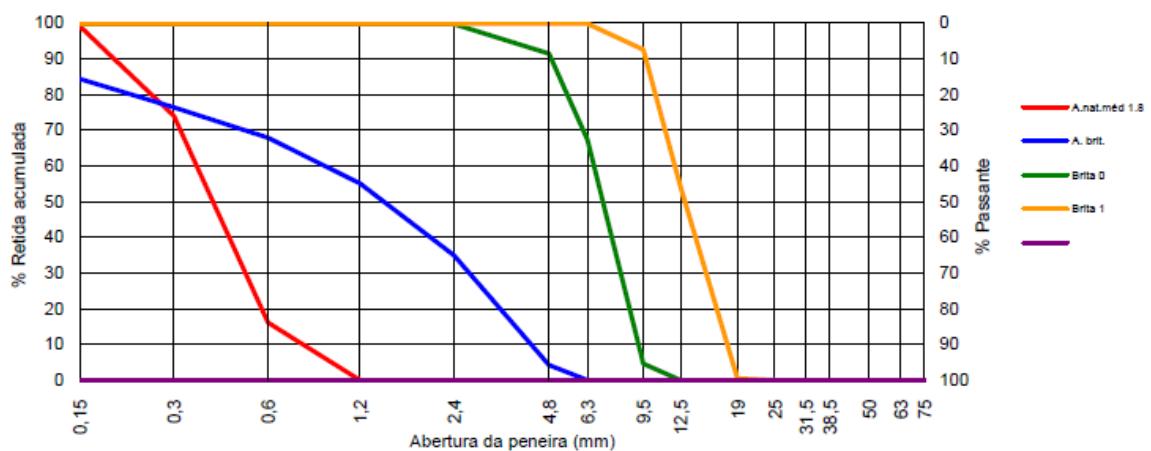
ZHENG, Hao et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review. **Composites Part B**, 15 mar. 2022.

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DAS VIGAS

Figura 35 – Granulometria dos materiais utilizados no concreto das vigas

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	16	24				4	91	100		
2,4	58	9				35	100	100		
1,2	25	8				55	100	100		
0,6					16	68	100	100		
0,3					74	76	100	100		
0,15					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 Concre sul.