

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Douglas William Bohnen

**ANÁLISE DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM REFORÇO DE COMPÓSITO
DE FIBRA DE CARBONO**

Santa Cruz do Sul

2025

Douglas William Bohnen

**ANÁLISE DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM REFORÇO DE COMPÓSITO
DE FIBRA DE CARBONO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Christian Donin.

Santa Cruz do Sul

2025

RESUMO

A reabilitação de estruturas de concreto armado pode ser procedida de diversas formas e uma delas é com o uso de polímeros reforçados com fibra de carbono. O método de uso de fibras de carbono reforçadas com resina, formando o compósito, é atraente para situação em que as intervenções civis são mais limitadas, pois permitem um ganho na execução frente a outros sistemas. A fibra também se destaca pelas suas características como alta resistência a tração, baixo peso específico e resistência a corrosão. O desenvolvimento desse sistema para utilização na construção civil exige dimensionamento conforme é estabelecido em norma. Neste âmbito, o referido trabalho teve como objetivo analisar o desempenho de vigas reforçadas com PRFC colados externamente na face inferior onde estão submetidos os esforços de flexão do elemento. A partir do manual de reforços para fibra de carbono, elaborado por Machado (2010), e da norma norte americana ACI 440, foram realizados cálculos de pré-dimensionamento e verificação dos mesmos a partir de ensaios. Para tal, confeccionou-se em laboratório quatro vigas, sendo uma de referência e três com aplicação do polímero. Após a aplicação do sistema de acordo com as instruções da norma e do manual, os elementos foram submetidos a testes e os resultados de momento máximo e força de ruptura foram obtidos. Por fim, foi realizado a comparação dos resultados, entre os cálculos de estimativa de resistência e as resistências reais que as vigas suportaram durante os ensaios. Ao fim, foi verificado a eficiência do compósito reforçado com fibra de carbono, demonstrando que o sistema possui validade na utilização em reparos estruturais e que o pré-dimensionamento através dos cálculos se deu de forma satisfatória. Os modelos teóricos de cálculo apresentaram um ganho de 45,39% na resistência com a aplicação do sistema de CFC, e após os ensaios foi possível perceber que os valores experimentais obtiveram um ganho real de 46,09%. Apesar de duas amostras apresentarem valor abaixo do estimado, essa variação representou uma média de 1,88%. O que não se torna significativo para o experimento.

Palavras-chave: Reforço. PRFC. Vigas. Flexão. Ensaio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do reforço através do aumento da seção.....	17
Figura 2 - Representação do reforço através de aplicação de chapa metálica	18
Figura 3 - Sistema de camadas do reforço com CFC	19
Figura 4 - Esquema de um sistema de fibra de carbono	20
Figura 5 - Curva tensão X deformação do aço e compósitos.....	22
Figura 6 - Representação do esmagamento do concreto	23
Figura 7 - Representação do deslocamento do concreto.....	24
Figura 8 - Determinação do valor de (ϵ_{bi}) pela análise elástica de carregamento	29
Figura 9 - Bloco de tensões de Whitney.....	30
Figura 10 - Forças Atuantes na seção da viga	31
Figura 11 - Deformações específicas da seção	34
Figura 12 - Gráfico do Fator de Redução para ductibilidade	38
Figura 13 - Injeção de resina sob pressão nas fissuras do concreto.....	43
Figura 14 - Limpeza da superfície com politriz ou jato de areia	44
Figura 15 - Utilização de politriz com aspirador para limpeza da superfície.....	44
Figura 16 - Comparação de arredondamento de canto em elemento	45
Figura 17 - Aplicação de imprimador primário com uso pincel ou rolo.	45
Figura 18 - Corte da fibra no sentido longitudinal e transversal	46
Figura 19 e 20 – Abatimento concreto da primeira dosagem	51
Figuras 21 e 22 – Teste de tronco cone, segunda dosagem	52
Figura 23 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico	53
Figura 24 – Ensaio de compressão em corpos cilíndricos	55
Figura 25 – Detalhe construtivo da armadura usada para viga modelo	56
Figura 26 – Armadura das vigas modelo montadas	57
Figura 27 – Armadura com os espaçadores dentro da forma.....	58
Figura 28 – Elementos após desforma, visualização da integridade.....	61
Figura 29 – Presença de orifícios na face do concreto	62
Figura 30 – Orifícios fechados com resina epóxi.....	62
Figura 31 – Corte das fibras de carbono na dimensão de 25cm x 240cm	63
Figura 32 – Vigas com reforço aplicado	65
Figura 33 e 34 – Prensa de ensaio do Laboratório Unisc com data da calibração....	66
Figura 35 – Representação do Ensaio de Stuttgart.....	67

Figura 36 – Viga posicionada no apoio para ensaio de carga.....	67
Figura 37 – Esquema de esforços seção da viga com reforço.....	68
Figura 38 – Representação do diagrama de momento fletor viga com reforço	70
Figura 39 – Esquema de esforços seção de viga sem reforço.....	71
Figura 40 – Gráfico deslocamento X carga, viga V1	73
Figura 41 – Gráfico deslocamento X carga, viga V2	74
Figura 42 – Gráfico deslocamento X carga, viga V3	74
Figura 43 – Gráfico deslocamento X carga, viga V4 testemunha.....	75
Figura 44 – Deslocamento X Carga	75
Figura 45 – Momento máximo resistido	76
Figura 46 – Viga 1 após ruptura da fibra e do concreto	78
Figura 47 – Viga 2 após ruptura da fibra e do concreto	78
Figura 48 – Viga 2, ruptura com deslocamento do concreto	79
Figura 49 – Viga 3 após ruptura da fibra e do concreto	79
Figura 50 – Viga 3, ruptura do concreto por esmagamento	80
Figura 51 – Viga 4 testemunha após ruptura do concreto.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas das fibras.....	20
Tabela 2 - Fatores de redução devidos à exposição ambiental (ACI440)	27
Tabela 3 - Coeficiente β_1 conforme resistência a compressão do concreto.....	30
Tabela 4 – Consumo de materiais para concreto	51
Tabela 5 – Resultados módulo de elasticidade dinâmico.	53
Tabela 6 – Resultados resistência a tração do concreto	54
Tabela 7 – Resultados resistência a compressão do concreto.....	55
Tabela 8 – Tensão de escoamento do aço CA50	56
Tabela 9 – Resultados de força de ruptura e momento máximo	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ	Fator de redução da resistência
R_n	Resistência nominal do elemento a ser reforçado
S_{DL}	Ações de cargas permanentes
S_{LL}	Ações de cargas acidentais
C_E	Fator de redução do reforço devido ao ambiente
f_{fu}	Resistência última de tração do projeto
f_{fu}^*	Resistência última de tração do fabricante de fibra
ϵ_{fu}	Deformação específica de ruptura do projeto
ϵ_{fu}^*	Deformação específica de ruptura do fabricante de fibra
$M_{maj.max}$	Momento fletor máximo majorado
M_{resist}	Momento fletor resistente
ϵ_b	Deformação na fibra
ϵ_b	Deformação existente na aplicação da fibra
α_1	Coefficiente de correção da tensão do concreto.
ϵ_c	Deformação de compressão do concreto
ϵ'_c	Deformação do concreto no início da reta do diagrama
γ_1	Coefficiente de correção da linha neutra
β_1	Coefficiente de resistência a compressão do concreto
b	largura da seção transversal
x	profundidade linha neutra
A_{s1}	Área de aço tracionada
A_{s2}	Área de aço comprimida
α_s	coeficiente de equivalência entre modo de elasticidade do concreto e do
aço	
E_s	Módulo de elasticidade do aço
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
d_2	Distância à face mais próxima da armadura de compressão
d	Distância da armadura de tração
M_k	Momento característico
M_r	Momento de fissuração
f_{ctm}	Tensão média de tração do concreto
I	Momento de inércia da seção transversal

I_{eq}	Momento de inércia da seção fissurada
ϵ_0	Deformação inicial do concreto
ϵ_{C0}	Deformação inicial do concreto comprimido
ϵ_{fd}	Deformação de descolamento do PRF
f'_c	Resistência mínima especificada em projeto
n	Número de camadas
E_f	Módulo de elasticidade do reforço
t_f	Espessura da camada de reforço
ϵ_{cu}	Deformação específica máxima do concreto
d_f	Altura da seção transversal
c	Distância da fibra comprimida mais distante
ϵ_{bi}	Deformação inicial do concreto
f_s	Tensão de escoamento do aço
f_{fe}	Tensão de escoamento da fibra
F_c	Força resultante compressão do concreto
F'_s	Força resultante compressão do aço
F_s	Força resultante tração do aço
F_f	Força resultante tração da fibra
M_n	Momento fletor resistente do elemento reforçado
Ψ	Coeficiente de redução da resistência do PFR
K_m	Fator de minoração da tensão no reforço
E_{fc}	Módulo de elasticidade do CFC
t_{fc}	Espessura de uma camada de CFC
ϵ_{fc}	Deformação de ruptura do reforço de CFC
ϵ_{sy}	Deformação de escoamento do aço
$F_{fc,s}$	Tensão de fluência
T_0	Tensão de cisalhamento da resina
$\varnothing$	Diâmetro
M_{rup}	Momento de ruptura
F_{rup}	Força de ruptura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Área de pesquisa	13
1.2 Questão da pesquisa	13
2 OBJETIVO	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivo específico	14
3 JUSTIFICATIVA	15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1 Patologia das estruturas	16
4.2 Reforço de estruturas de concreto armado.....	16
4.2.1 Reforço através do aumento da seção	16
4.2.2 Reforço de viga com fixação de chapa metálica.....	17
4.2.3 Reforço com uso de polímeros de carbono reforçado.....	18
4.3 Histórico	19
4.4 Compósito de fibra de carbono	19
4.5 Modos de ruptura.....	22
4.5.1 Ruptura por esmagamento do concreto (compressão)	23
4.5.2 Ruptura pelo escoamento da armadura seguida de ruptura do compósito.....	23
4.5.3 Ruptura por escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto.....	23
4.5.4 Delaminação da camada de concreto próximo ao PRFC	24
4.5.5 Descolamento do substrato de PRFC do concreto	24
4.5.6 Descolamento interlaminar do compósito de PRFC.....	24
4.6 Norma americana (ACI-440)	24
4.6.1 Reforço a flexão	26
4.6.2 Critérios para dimensionamento do reforço a flexão	27
4.6.3 Deformações	28
4.6.3.1 Deformação inicial.....	28
4.6.3.2 Linha neutra	33
4.6.3.3 Momento fletor resistente	35

4.6.3.4 Deformação máxima permitida em reforço a flexão em função do número de camadas do compósito	36
4.6.3.5 Limite de ductibilidade.....	37
4.6.3.6 Tensão limite para ruptura por fluência e fadiga	38
4.6.3.7 Tensão de cisalhamento na resina.....	39
5 PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÃO E APLICAÇÃO DO REFORÇO DE CFC	
.....	42
5.1 Recuperação do concreto	42
5.2 Fissuras (ou trincas) e recuperação.....	43
5.3 Preparação da superfície para receber o compósito	43
5.4 Imprimador primário	45
5.5 Corte e imprimação das fibras.....	46
5.5.1 Saturação via úmida	46
5.5.2 Saturação via seco	46
5.6 Aplicação da lâmina e ferramentas	47
5.7 Segunda camada de saturante	47
5.8 Revestimento estética e protetiva	47
6 METODOLOGIA	49
6.1 Considerações iniciais	49
6.2 Materiais	50
6.2.1 Concreto	50
6.2.1.1 Resultados concreto	52
6.2.1.2 Ensaio módulo de elasticidade	53
6.2.1.3 Ensaio de tração no concreto	54
6.2.1.4 Ensaio de compressão.....	54
6.2.2 Armadura	55
6.2.3 Forma.....	58
6.2.4 Compósito de fibra de carbono (CFC)	59
6.3 Serviços preliminares.....	60
6.3.1 Desforma	60
6.3.2 Preparativo da superfície	61
6.3.3 Aplicação do reforço	63
6.4 Realização do ensaio.....	65
6.5 Momento estimado de ruptura para vigas reforçadas	68

6.6 Momento estimado de ruptura para viga testemunha	70
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
7.1 Deslocamentos.....	73
7.2 Momento máximo e força de ruptura	76
7.3 Ruptura do corpo de prova	77
8 CONCLUSÃO	82
8.1 Sugestão de trabalhos.....	83
REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

Desde muito tempo o homem já se preocupa com a construção das estruturas sejam elas para residir, trabalhar ou para auxiliar no seu dia a dia. Conforme citado por De Souza e Ripper (1998), o aumento na demanda por obras também resultou na necessidade de avanços tecnológicos, que tiveram uma aceitação implícita, visto que o desenvolvimento de pesquisas na área não cresceu no mesmo ritmo. Neste conjunto de fatores temos o surgimento dos danos as estruturas (patologias).

Ainda que seja empregado um alto controle durante a execução, com objetivo de diminuir manifestações patológicas, outras causas podem influenciar no seu surgimento. De acordo com o autor Silva Filho (2007), outros fatores podem desencadear o surgimento de patologias na estrutura e levar ao processo de recuperação e reforço estrutural são: mudanças no uso da estrutura, refletindo no aumento de cargas solicitantes e redistribuição delas, acidentes e sinistros como choques mecânicos, ou incêndio também podem alavancar o aparecimento de patologias na estrutura.

Com o objetivo de aumentar e prolongar a vida útil da estrutura de concreto que apresenta alguma perda de sua capacidade resistiva, os reforços em estruturas se apresentam como uma solução viável para que a estrutura volte a suportar as cargas que lhe são solicitadas. Conforme apresentado por Beber (2003), existem disponíveis opções e técnicas para a execução de reforços em uma estrutura deteriorada, sendo que esta escolha leva em conta a durabilidade do reforço, capacidade de resistência e custos de aquisição e aplicação.

Dessa forma uma opção recente de recuperação das estruturas é a utilização de materiais compósitos, mais especificamente, compósitos reforçados com fibra de carbono (CRFC). Beber (2003), relata que este material se destaca devido as suas características como alta resistência mecânica, peso próprio baixo, flexibilidade, podendo moldar-se na estrutura e durabilidade contra corrosão.

Dessa forma, considerando o que foi anteriormente descrito, a necessidade de recuperação das estruturas que apresentam patologias é imprescindível. Sendo assim, o estudo mais aprofundado sobre o desempenho de compósitos reforçados com fibra de carbono se faz importante, para poder garantir o uso correto e eficiente do sistema de recuperação das estruturas, sem comprometer aspectos físicos.

1.1 Área de pesquisa

Este trabalho foi desenvolvido na área de reforços em estruturas de concreto armado e com ênfase no método de aplicação de compósito de fibra de carbono (CFC), analisando seu desempenho em vigas submetidas a flexão.

1.2 Questão da pesquisa

Analisar o desempenho de uma viga reforçada com compósito de fibra de carbono quando submetida a flexão.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Analisar experimentalmente em laboratório o desempenho de vigas de concreto armado utilizando reforços de compósito de fibra e carbono (CFC) no esforço à flexão.

2.2 Objetivo específico

- Estudar as características e o método de empregabilidade de compósito de fibra de carbono (CFC) para reforços de vigas de concreto armado à flexão;
- Executar um programa experimental com a modelagem de vigas reforçadas com CFC através da norma ACI 440 e do Manual de Reforço das Estruturas de concreto Armado com Fibras de Carbono;
- Calcular o momento resistente da viga com e sem uso de reforço CFC;
- Realizar ensaio de flexão para obtenção dos momentos resistidos pelas vigas de concreto armado reforçadas e não reforçadas pelo CFC;
- Comparar os valores obtidos através dos cálculos de estimativa de resistência com os obtidos no ensaio laboratorial.

3 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa busca demonstrar e avaliar o comportamento de estruturas de concreto com uso de reforços de polímeros de fibra de carbono. Essas são alternativas modernas para melhoria do desempenho de estruturas, pois segundo Beber (2003), apresentam uma melhor relação entre desempenho estrutural e peso específico.

A crescente demanda no campo da construção civil tem impulsionado a utilização de estruturas em concreto armado, mas a sua execução requer atenção e cautela. Neste sentido, é necessário seguir durante a operação e recomendações de projeto, que indicam os cobrimentos mínimos e a quantidade de aço necessária para suporte das ações solicitantes. Quando o elemento estrutural não atinge o desempenho desejado, este começa a apresentar patologias que demonstram sua fragilidade.

O uso de reforços com fibra de carbono em estruturas que apresentam patologias tem sido uma ótima opção de recuperação. De acordo com Silva Filho (2007), as fibras de carbono apresentam uma maior resistência mecânica, ótimo comportamento a fadiga, resistência elevada a ataques químicos e um peso específico menor que o aço convencional.

Apesar do emprego das fibras de carbono na construção civil não serem recente, ainda não se encontram normas brasileiras para a utilização deste tipo de material. O seguimento das normas oferece uma padronização em processos de forma a garantir segurança e qualidade. Assim, é de fundamental importância compreender e buscar conhecimento técnico sobre aplicação e normatização das fibras de carbono como alternativa de reforços em estruturas de concreto.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Patologia das estruturas

A definição de patologia segundo De Souza e Ripper (1998), é dada de forma genérica como um novo campo da engenharia civil e das construções que se ocupa de estudar e abordar as formas de manifestações, consequências e os mecanismos de ocorrência de falhas, bem como a deterioração das estruturas. Assim, a patologia nas estruturas está relacionada diretamente ao seu desempenho, vida útil e ao seu serviço. Para Mancini *et al.* (2023), a patologia é uma área de estudo importante, pois está ligado a qualidade de vida das pessoas, uma vez que as construções fazem parte do cotidiano delas.

O surgimento das patologias em estruturas provém de muito tempo, junto com o surgimento das construções. O crescimento da construção civil resultou no aumento significativo na ocorrência das patologias, isso porque surgiu uma demanda por estruturas mais esbeltas, fabricação em menor tempo e racionalização de materiais.

4.2 Reforço de estruturas de concreto armado

O processo de reforço em estruturas de concreto armado não é algo simples que possa ser executado sem prévia análise. Conforme mencionado por De Souza e Ripper (1998), os reforços ou recuperações em estruturas de concreto armado, precisam de uma análise prévia realizada por profissional capacitado. Este irá realizar um estudo da estrutura quanto as suas características atuais e o que levou a estrutura a apresentar alguma falha. Com o levantamento preliminar, o responsável técnico poderá estabelecer o tipo de reforço e determinar as técnicas construtivas a serem usadas para realizar a recuperação ou reforço da estrutura.

De Souza e Ripper (1998), ainda afirmam ser fundamentável que, todo o serviço de reforço ou recuperação seja precedido de uma memória de cálculo. Esta etapa consegue determinar a capacidade de carga residual da estrutura bem como orientar sobre o quanto de reforço será necessário para intervir.

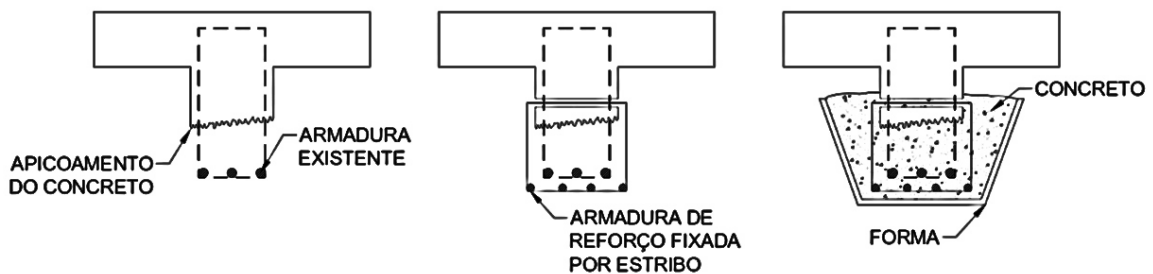
4.2.1 Reforço através do aumento da seção

Este tipo de reforço consiste em aumentar a capacidade de carga ou reforçar a estrutura já existente com o aumento da seção do elemento em relação ao seu

tamanho original. O acréscimo de área na seção transversal consiste na disposição de barras de aço ou armaduras com preenchimento de concreto ou graute.

Reis (2001) destaca que esse método de recuperação interfere na arquitetura, e para que a mudança não seja tão significativa, o concreto usado deve possuir resistência superior ao do concreto já existente. Ademais, para que a ligação entre eles seja satisfatória, é necessário a realização de procedimentos preliminares no local. A limpeza e o desbaste são fundamentais, criando uma superfície ideal de aderência entre os elementos.

Figura 1 - Representação do reforço através do aumento da seção



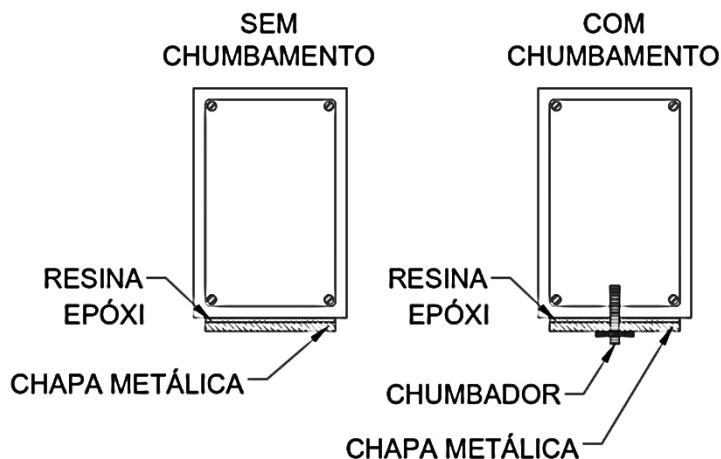
Fonte: Autor (2025) adaptado de Cánovas (1988).

4.2.2 Reforço de viga com fixação de chapa metálica

A técnica de reforço com uso de chapas ou perfis metálicos, consiste na fixação de elementos junto a superfície de concreto ao qual se deseja reforçar. Essa técnica consiste em aumentar a área de aço da seção que pode estar sob efeito de compressão ou flexão. Conforme Helene (1992), é preciso verificar todos os esforços atuantes para garantir que os reforços metálicos desempenhem de forma satisfatória o reforço. Ainda, é preciso garantir em zonas de esforços tangenciais, o chumbamento com uso de elementos metálicos. Somente o uso de resinas pode acarretar no desprendimento das peças metálicas.

Apesar de ser um excelente tipo de reforço, estudos já demonstraram que após decorrido algum tempo da aplicação das chapas e perfis metálicos, eles demonstraram oxidação e corrosão (CALDER, 1979). A ocorrência de oxidação nos elementos gera a diminuição da área de aço que atua no reforço, podendo tornar o elemento frágil novamente.

Figura 2 - Representação do reforço através de aplicação de chapa metálica



Fonte: Autor, adaptado de De Souza (2020), apud Appleton e Gomes (1997).

4.2.3 Reforço com uso de polímeros de carbono reforçado

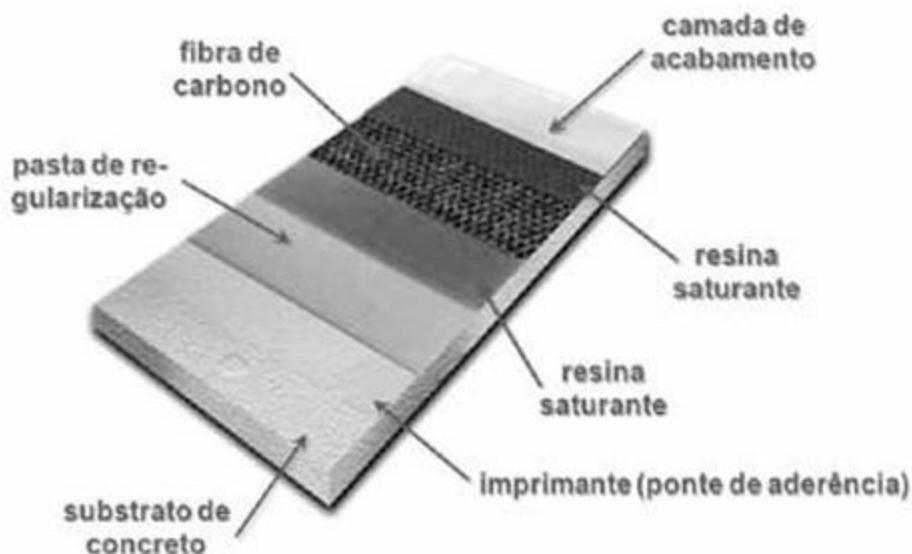
Os polímeros reforçados com aço vêm ganhando espaço na construção civil como alternativa para reforços em estruturas fragilizadas. Seu baixo peso, alta resistência mecânica e baixa interferência arquitetônica tornam o compósito uma solução mais atrativa e eficiente perante outras soluções.

De acordo com Tomaz *et al.* (2014), em estruturas de concreto que apresentam boa integridade e ausência de corrosão de armaduras, o polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC), possibilita o aumento da resistência a flexão e cisalhamento. Assim, seu uso não se limita apenas a vigas, mas pode ser empregado também em lajes e pilares.

O processo de reforço com aplicação da fibra de carbono consiste no preparo da superfície, utilizando um sistema abrasivo e posteriormente a limpeza do material particulado residual. Após, é realizado a aplicação de resina epóxi, responsável pela aderência entre a estrutura e o polímero de fibra de carbono. Com a superfície preparada, é realizado a colocação das lâminas de reforço de aço com auxílio de ferramentas que irão garantir a total aderência do compósito ACI 440.

Com a aplicação do reforço na estrutura, é recomendado a aplicação de nova camada de resina sobre ela para garantir sua integridade de aderência. Machado (2010) ressalta que para cada aplicação de reforço é realizado teste de arrancamento do elemento. Desta forma, se garante a boa aderência do sistema ao concreto.

Figura 3 - Sistema de camadas do reforço com CFC



Fonte: Machado (2010).

4.3 Histórico

Os compósitos de fibra de carbono (CFC) já tinham sua aplicação em setores como automobilística, aeronáutica e aeroespacial, mas somente por meados dos anos 70, no Japão, o seu uso no setor da construção civil começou a tomar espaço. Com a ocorrência de grandes atividades sísmicas, o país começou a investigar alternativas para preparar e recuperar as estruturas de concreto de forma rápida e viável (DE SOUZA E RIPPIER, 1998). Paralelo a este período, um estudo de Meier e Kaiser (1991), sugeriu a substituição de placas de aço aderidas ao concreto por compósitos de fibra de aço, por apresentarem características de desempenho melhores (HOLLAWAY E LEEMING, 1999).

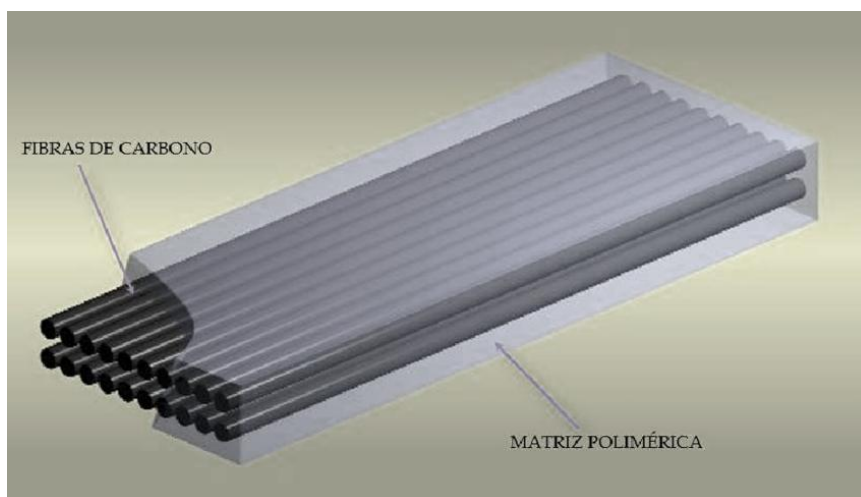
No Brasil, o uso do compósito de fibra de carbono teve sua primeira utilização para reforço da estrutura do viaduto Santa Tereza em Belo Horizonte, em 1998. Conforme Machado (2010), a escolha na utilização do CFC é devida as suas características, mais leve, sua aplicação requer menos interferência civil e não modifica a arquitetura da estrutura, que no caso do viaduto era datado de 1927.

4.4 Compósito de fibra de carbono

Os polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), é um composto feito através da combinação de dois materiais: uma matriz polimérica e as fibras de

carbono. Quando juntos, os dois formam um sistema que apresenta excelente desempenho mecânico, superior aos próprios quando separados (FIGUEIREDO, 2014).

Figura 4 - Esquema de um sistema de fibra de carbono



Fonte: Machado (2010).

As fibras de carbono podem ser apresentadas em diferentes tipos como fios, tecido uni ou bidirecionais, chapas, barras e perfis, sendo cada um deles apropriado a um tipo de aplicação. Machado (2010) salienta que a produção das fibras de carbono é resultado do tratamento térmico de fibras orgânicas precursoras, um exemplo são as poliacrilonitril (PAN) ou carvão (PITCH). O processo ocorre com a oxidação das fibras durante a elevação da temperatura, que variam entre 1.000°C e 1.500°C. Essa alta temperatura garante um maior módulo de elasticidade ao material podendo ser entre 100 GPa a 300 GPa.

Para o reforço de estruturas em concreto armado, segundo Silva Filho (2007), os compósitos com fibra de carbono são os mais recomendados. Eles apresentam um desempenho mecânico superior sem o acréscimo da seção transversal.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas das fibras

Tipo de fibra	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Específica Última (%)	Densidade Específica
Carbono de alta resistência	4300 – 4900	230 – 240	1,9 – 2,1	1,8

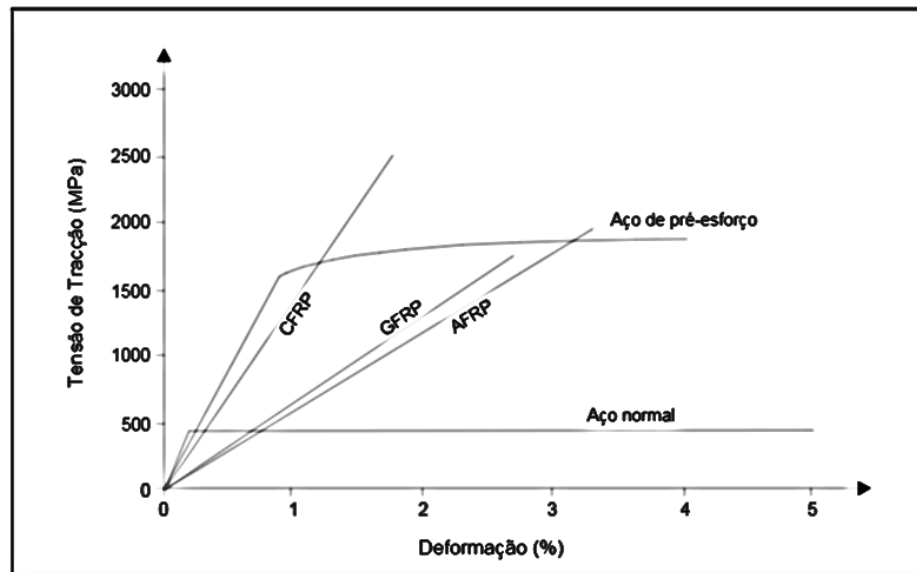
Carbono de alto módulo	2740 – 5490	294 – 329	0,7 – 1,9	1,78 – 1,81
Carbono de alta resistência e alto módulo	2600 – 4020	540 – 640	0,4 – 0,8	1,91 – 2,12
Aramida de alta resistência e alto módulo	3200 – 3600	124 – 130	2,4	1,44
Vidro	2400 – 3500	70 – 85	3,5 – 4,7	2,6

Fonte: Silva Filho (2007).

As resinas epóxi são utilizadas para a impregnação das fibras de carbono aos elementos, pois apresentam em suas características boa resistência a tração, ótima resistência a agentes químicos e solventes, e ainda baixa retração durante a cura bem como um bom comportamento à fluência (MACHADO, 2010). A boa qualidade da resina epóxi é fundamental, pois é ela quem irá garantir a transferência de esforços da estrutura para as fibras de carbono sem que ocorra o deslocamento da estrutura.

Ainda, segundo o autor Figueiredo (2014), o sistema formado pela resina epóxi e fibras de carbono é apropriado na aplicação de reforços de estrutura de concreto, pois se modela a estrutura mesmo ela apresentando algum tipo de curvatura. Suas características de resistência, alta rigidez e boa relação tensão deformação, com uma massa específica menor, garante o desempenho sem alteração na seção transversal do elemento estrutural.

Figura 5 - Curva tensão X deformação do aço e compósitos



Fonte: Juvandes (2002).

Como desvantagem do compósito está sua incompatibilidade em superfícies irregulares, pouca resistência a radiação ultravioleta (UVB), e baixa resistência a fogo. A baixa resistência ao calor do polímero se dá devido a sua transição vítrea (T_g), que ocorre na faixa de temperatura de 80°C à 100°C. Nessa etapa, o polímero começa a enfraquecer e perder sua estrutura rígida, passando do estado vítreo para um mais elástico e dúctil, em consequência seu módulo de elasticidade sofre uma diminuição significativa (MACHADO, 2010).

4.5 Modos de ruptura

O estudo e entendimento do comportamento da estrutura é fundamental para se compreender os tipos de ruptura que podem ocorrer nos elementos, e delimitam o acréscimo de resistência. As vigas de concreto armado quando solicitadas a flexão podem apresentar as seguintes formas de ruptura (FIGUEIREDO, 2014):

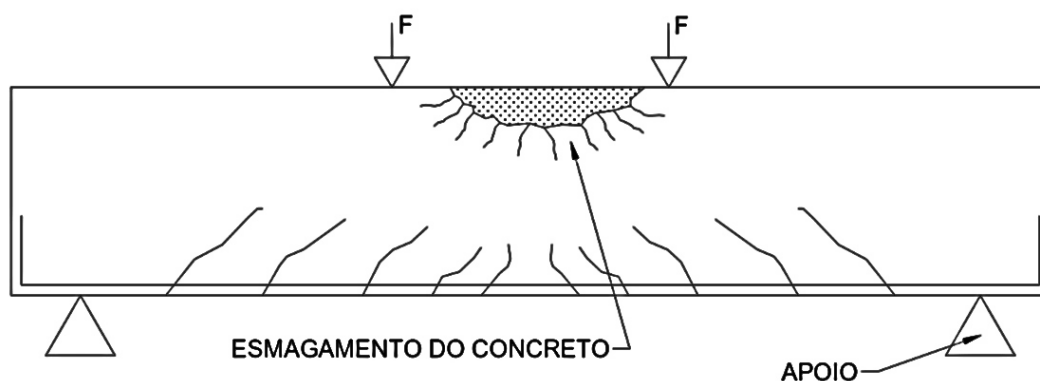
- Esmagamento do concreto por compressão antes do escoamento do aço;
- Escoamento do aço seguido por ruptura da lâmina de PRFC;
- Escoamento do aço seguido por esmagamento do concreto;
- Delaminação da camada de concreto próximo ao PRFC por tensão e ou cisalhamento;
- Descolamento do PRFC do substrato de concreto (descolamento da lâmina de PRFC);

f) Descolamento interlaminar do compósito de PRFC.

4.5.1 Ruptura por esmagamento do concreto (compressão)

A ruptura por esmagamento do concreto é uma falha que ocorre de forma abrupta no elemento estrutural e é característico de elementos que possuem uma concentração maior de armaduras. Como descrito por Figueiredo (2014), a força gerada pela flexão na viga de concreto, ocasiona um aumento de tensões, que na face de compressão, ocasiona sua falha.

Figura 6 - Representação do esmagamento do concreto



Fonte: Autor (2025) adaptado de De Souza (2020).

4.5.2 Ruptura pelo escoamento da armadura seguida de ruptura do compósito

Este tipo de ruptura ocorre de forma mais lenta apresentando fissuras na face tracionada da viga, até atingir a tensão de escoamento do aço, em seguida ocorre a fratura do compósito de reforço. De Melo (2024), cita que este modelo de ruptura é teoricamente possível, mas a probabilidade de ocorrência muito baixa, visto que ocorrerá o descolamento do compósito da superfície da viga.

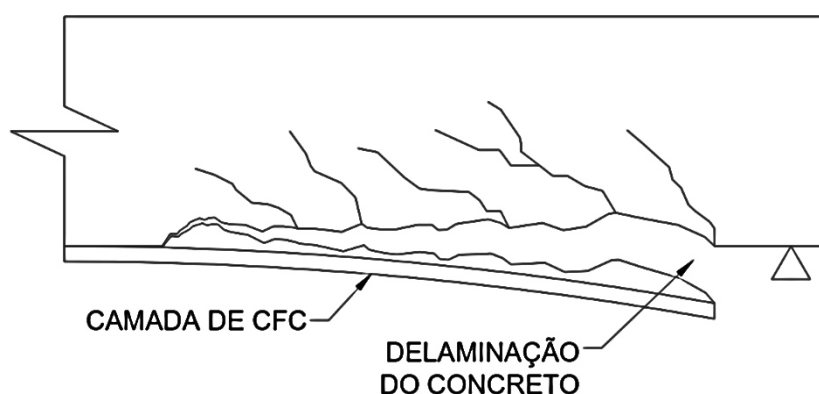
4.5.3 Ruptura por escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto

Esse tipo de ruptura ocorrer quando se atinge a tensão de escoamento do aço na região tracionada, logo em seguida o concreto na região comprimida também atinge seu valor limite suportado. Após os dois elementos terem seus valores de resistências ultrapassados é visto que neste caso o compósito de fibra de carbono não sofre danos (SOUZA, 2020).

4.5.4 Delaminação da camada de concreto próximo ao PRFC

Neste caso, como a resistência do compósito ao cisalhamento e à tração é muito maior do que a resistência do concreto a essas solicitações, a falha ocorre no concreto. Assim, uma camada de concreto se desprende da viga, mas permanece presa e fixada junto ao reforço de PRFC (MELO, 2024).

Figura 7 - Representação do deslocamento do concreto



Fonte: Autor (2025) adaptado de Hollaway e Leeming (1999).

4.5.5 Descolamento do substrato de PRFC do concreto

De acordo com Melo, (2024), as falhas por descolamento do reforço de PRFC ocorrem devido a problemas de ligação nas faces do concreto com o compósito. Essa falha pode ocorrer quando não for executado o preparo suficiente e correto da superfície de concreto, bem como a má execução da aplicação da resina epóxi e da fibra de carbono.

4.5.6 Descolamento interlaminar do compósito de PRFC

Como mencionado no item 4.4, o reforço de fibra de carbono é um material compósito, e sua falha também pode ocorrer. Este tipo de falha ocorrerá quando a energia das fissuras no compósito for maior do que no concreto. Esse mecanismo de ruptura indica que a área de seção transversal do reforço é insuficiente na resistência as ações solicitantes (FIGUEIREDO, 2014).

4.6 Norma americana (ACI-440)

A American Concrete Institute (ACI), em tradução Instituto Americano do Concreto, é uma sociedade técnica que desenvolve padrões e normas construtivas

americanas. A ACI-440 é a norma referente a polímeros reforçados com fibra, onde traz relatórios de materiais de PRF, especificações, orientações e práticas construtivas e todo o processo de cálculo para a determinação do PRF nas estruturas de concreto.

Antes de proceder com as etapas de determinação do reforço, a ACI-440 pede para observar a resistência limite que a estrutura pode suportar, tanto para ações de flexão quanto de cortante. Essa força pode ser determinada pela equação a seguir:

$$(\Phi R_n)_{existente} \geq (1,2.S_{DL} + 0,85.S_{LL})_{novo} \quad (01)$$

Sendo:

Φ – fator de redução da resistência

R_n – resistência nominal do elemento

S_{DL} – ações de cargas permanentes (longa duração)

S_{LL} – ações de cargas acidentais (curta duração)

Esse limite é necessário para garantir que caso haja dano ao reforço, a estrutura mantenha sua capacidade até que o reforço possa ser reparado ou substituído. Em locais que exigem maior resistência ao fogo é necessário seguir outras orientações presentes na ACI 440. Tanto as resinas que compõe o sistema compósito quanto as usadas na aderência ao concreto sofrem com as temperaturas mais elevadas. Seu limite está associado à sua transição vítrea (T_g), variando entre 60°C e 82°C.

Machado (2010) enfatiza que uma estrutura de concreto armado convencional também sofre com exposição a altas temperaturas, sendo que o aço tem sua resistência de escoamento reduzida e a resistência a compressão do concreto também é afetada. Sendo assim, o conjunto todo sofre uma diminuição de sua resistência.

Os conceitos de estruturas de concreto armado também podem ser usados em estruturas com reforço de compósito de fibra de carbono, onde limites são impostos para garantir que a estrutura não entre em colapso sob ações de fogo. A resistência do elemento pode ser calculada considerando a minoração da resistência do concreto, do aço e desconsiderando a resistência do reforço. A então resistência residual pode

ser comparada a demanda de cargas, para garantir que a estrutura não entrará em colapso (MACHADO, 2010).

Para garantir isso a seguinte equação deve ser satisfeita, onde as ações S_{DL} e S_{LL} são determinados conforme as recomendações da norma estrutural, sendo considerado o tempo de ação do fogo, sem considerar a resistência do reforço.

$$(R_n\Phi)_{existente} \geq S_{DL} + S_{LL} \quad (02)$$

4.6.1 Reforço a flexão

O reforço para ações de flexão consiste na colagem de camadas de reforço nas faces inferiores ou superiores, onde ocorre a solicitação da flexão. Conforme exposto por Machado (2010), para o dimensionamento do reforço é preciso levar alguns itens em consideração:

- Para os cálculos do reforço são considerados as propriedades dos elementos já existentes, como características do concreto, dimensões do elemento, armaduras já existentes e sua posição;
- O aço e concreto possuem deformações específicas que são diretamente proporcionais às suas distâncias da linha neutra;
- Não há escorregamento entre o reforço e o concreto;
- A deformação gerada no adesivo é desconsiderada por ele ser muito fino;
- A deformação específica por compressão do concreto é de 3‰, quando dimensionado pela ABNT 6118:2023, e 3‰ quando pela ACI 318:2019;
- É desprezado a resistência à tração do concreto;
- O reforço segue um regime elástico linear até o seu colapso.

Também deve-se analisar as deformações já presentes no concreto e no aço para o dimensionamento.

AACI 440 (2017), traz uma tabela com fatores de redução para cada tipo de fibra e o seu ambiente de agressividade, uma vez que os fabricantes não consideram uma exposição prolongada a ambientes de grande agressividade.

Tabela 2 - Fatores de redução devidos à exposição ambiental (ACI440)

Condição de exposição	Tipo de fibra	Fator de redução ambiental (C_E)
Ambiente interno	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
Ambiente externo (Pontes, píeres, garagens abertas)	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
Ambiente agressivo (usina química e estação de água)	Carbono	0,85
	Vidro	0,50
	Aramida	0,70

Fonte: Autor (2025) adaptado da ACI 440 (2017).

Com isso chegamos nas seguintes equações:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (03)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (04)$$

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (05)$$

Sendo:

f_{fu} – resistência última de tração de projeto;

f_{fu}^* - resistência última de tração fornecida pelo fabricante;

ε_{fu} – deformação específica de ruptura de projeto;

ε_{fu}^* - deformação específica de ruptura fornecido pelo fabricante.

As deformações iniciais do concreto devem ser calculadas a menos que todas as forças sejam removidas antes da instalação e aplicação do reforço de CFC. As deformações específicas devem ser calculadas como deformações específicas iniciais e devem ser excluídas das deformações específicas do CFC (MACHADO, 2010).

4.6.2 Critérios para dimensionamento do reforço a flexão

Algumas verificações devem ser realizadas para o dimensionamento do reforço na flexão de uma estrutura (MACHADO, 2010).

- Determinação do momento fletor máximo majorado que atuará na viga, $M_{maj.max}$;
- Determinação do momento resistente à flexão presente na viga, através das características geométricas e dos compósitos, M_{resist} ;
- Comparar os momentos. Se $M_{resist} > M_{maj.max}$, a viga não necessita de reforço a flexão, mas se $M_{resist} < M_{maj.max}$, a viga necessita de reforço;
- Se a viga necessitar de reforço determinar o modo de ruptura. Se $c/d < 0,26$, a condição é de viga sub-armada, se $c/d > 0,26$ o reforço será para uma viga super-armada.

4.6.3 Deformações

4.6.3.1 Deformação inicial

De acordo com Machado (2010), para sabermos o nível de tensão ao qual o reforço será submetido na superfície de aplicação, é necessário saber o nível de tensão existente na superfície do elemento. Ao sabermos o nível de tensão atuante na superfície, sabemos exatamente qual a deformação na superfície da fibra. Assim, a deformação máxima permitida pela fibra de carbono será dada pela equação:

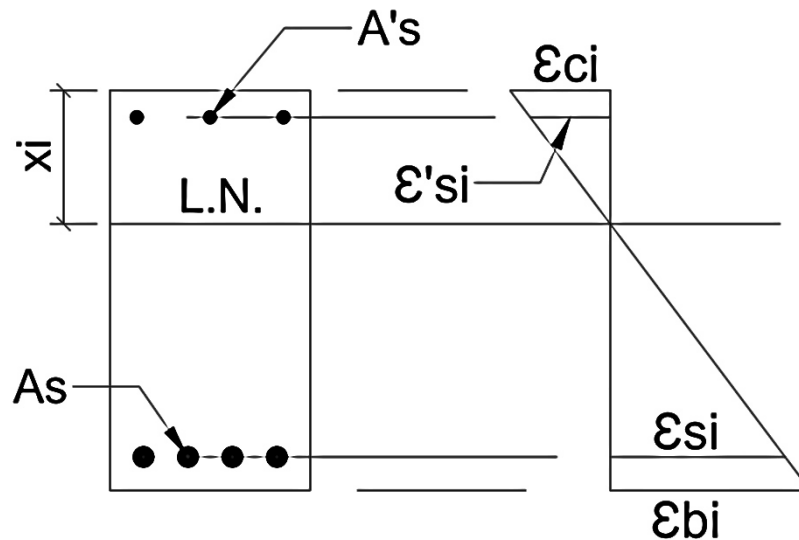
$$\varepsilon_{fc} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad (06)$$

Onde:

ε_b – deformação na fibra considerando no reforço para carregamento máximo;

ε_{bi} – deformação existente na aplicação do reforço.

Figura 8 - Determinação do valor de (ϵ_{bi}) pela análise elástica de carregamento



Fonte: Autor, 2025

A figura demonstra que a deformação ϵ_{bi} , é considerada como inicial, não fazendo parte da deformação final do composto.

A norma ACI 440 (2017), recomenda que o sistema de reforço, para flexão, deve ser dimensionado para o estado limite último. Assim, a análise considera a resistência da seção pela combinação de equilíbrio das deformações, compatibilidade de deformações e o comportamento do concreto e demais materiais.

Conforme apresentado por Machado (2010), existe quatro formas de ocorrer a ruptura das peças de concreto armado, sendo:

- Ocorre o escoamento do aço antes do esmagamento do concreto;
- Escoamento do aço antes da ruptura do reforço de CFC;
- Ruptura pelo esmagamento do concreto antes do escoamento do aço;
- Ruptura do sistema de CFC antes da ruptura do aço pelo escoamento.

Os dois primeiros caracterizam uma estrutura mais dúctil, o que é favorável. Já as duas últimas demonstram uma estrutura mais frágil, o que não é muito desejável. Caso a ruptura seja controlada pelo esmagamento do concreto, o bloco proposto por Whitney pode ser usado sem modificações com profundidade de $0,85c$ para concretos de até $27,5\text{MPa}$. Caso os valores forem superiores, pode ser realizado um desconto de β_1 conforme tabela 3.

Se a ruptura for determinada pela delaminação do concreto ou ruptura do composto, o bloco de tensões de Whitney fornece valores acurados se utilizarmos α_1 , conforme equação a seguir:

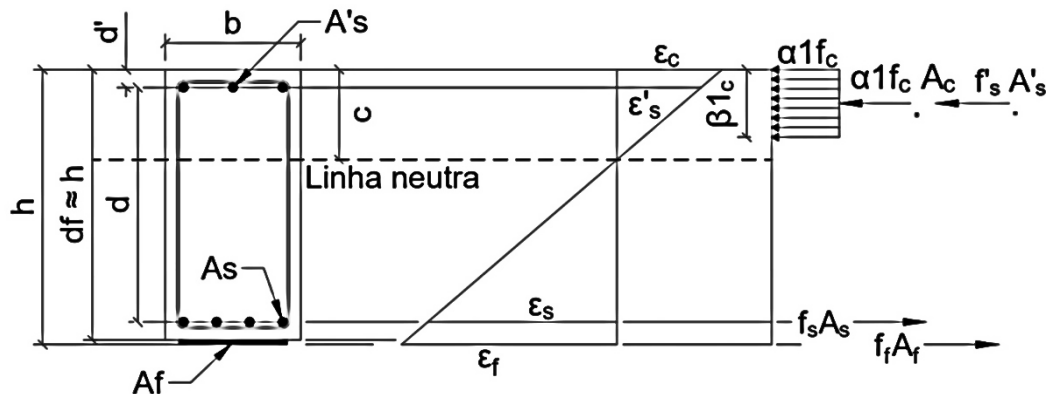
$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot (\varepsilon_c')^2 \cdot \gamma_1} \quad (07)$$

Onde:

$$\varepsilon_c' = 1,71 \frac{f_c'}{E_c} \quad (08)$$

$$\gamma_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon_c' - 2 \cdot \varepsilon_c} \quad (09)$$

Figura 9 - Bloco de tensões de Whitney



Fonte: Autor, 2025, adaptado de ACI 440 (2017).

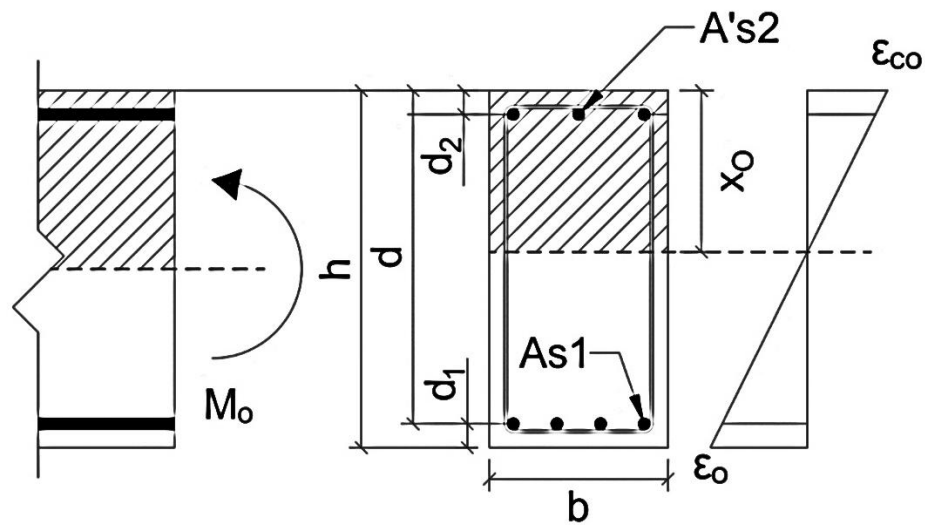
Tabela 3 - Coeficiente β_1 conforme resistência a compressão do concreto

f_c' (MPa)	β_1
$17,2 \leq f_c' \leq 27,6$	0,85
$27,6 \leq f_c' \leq 55,2$	$0,85 - \frac{0,05 - (f_c' - 27,6)}{6,9}$
$f_c' \geq 55,2$	0,65

Fonte: Adaptado de Machado (2010).

Para conhecer a tensão e as deformações existentes devemos analisar as forças atuantes na estrutura e a posição da linha neutra. Com o uso do método de equilíbrio das forças podemos determinar o equilíbrio da linha neutra.

Figura 10 - Forças Atuantes na seção da viga



Fonte: Autor, 2025.

A equação a seguir mostra como encontrar:

$$\frac{1}{2} b \cdot x^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x) \quad (10)$$

Sendo:

b – Largura da seção transversal;

x – Profundidade da linha neutra;

α_s – E_s/E_c ;

A_{s1}/A_{s2} – Área das armaduras de tração e compressão, respectivamente;

d_2 – Distância à face mais próxima da armadura de compressão;

d – Distância da armadura de tração ao topo da seção.

Faz-se importante realizar a análise entre o momento atuante M_k , não majorado, e o momento de fissuração M_r , obtido pela equação:

$$M_r = \frac{f_{ctm} \cdot (h - x)}{I} \quad (11)$$

Sendo:

f_{ctm} – tensão média de tração do concreto;

I – momento de inércia da seção transversal.

$$M_k = M_r$$

Se a relação acima for válida, temos a estrutura no estágio I, não havendo modificação no momento de inércia. Mas se ela não for válida calcula-se o momento de inércia da seção fissurada com as seguintes fórmulas:

$$I_2 = \frac{b \cdot x^3}{3} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2)^2 + \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x)^2 \quad (12)$$

$$I_{eq} = \left(\frac{M_r}{M_k}\right)^3 \cdot I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_k}\right)^3\right] \cdot I_2 \quad (13)$$

Sendo:

I_2 – momento de inércia da seção transversal no estágio 2;

I_{eq} – momento de inércia da seção fissurada.

Com isso é possível calcular a deformação da fibra superior e depois, usando a compatibilidade de deformações específicas, chegamos no valor da deformação específica do concreto e da tração na fibra inferior, sendo acrescido da deformação específica do compósito.

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_k \cdot x}{E_c \cdot I_{eq}} \quad (14)$$

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co} \frac{h - x}{x} \quad (15)$$

Com as deformações iniciais definidas pode-se passar para a etapa de identificar o modo de ruptura, podendo ser com o esmagamento do concreto, descolamento do reforço ou ruptura dele. Para identificar o modo de ruptura, realiza-se uma comparação entre duas equações. A primeira equação tem um limite de deformação para o reforço, para evitar o descolamento na superfície causado pela fissuração do concreto. Assim, a equação a seguir delimita a deformação específica:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu} \quad (16)$$

Sendo:

ε_{fd} – deformação de descolamento do PRF;

f'_c – resistência a compressão mínima especificada em projeto (equivale ao f_{ck});

n – número de camada de reforço;

E_f – módulo de elasticidade do reforço;

t_f – espessura da camada de reforço.

Se o primeiro termo da equação for menor, tem-se o descolamento do reforço. Caso contrário, a ruptura do reforço ocorrerá. A equação define como é o modo de ruptura em relação ao reforço, mas é preciso verificar se ele se dará no PRF ou no concreto, para isso temos a seguinte equação:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (17)$$

Sendo:

ε_{cu} – deformação específica máxima do concreto;

d_f – altura de seção transversal;

c – distância da fibra comprimida mais distante;

ε_{bi} – deformação inicial do concreto.

Com o cálculo é verificado então: se o primeiro valor da equação for menor, teremos a falha pelo esmagamento do concreto. Caso seja maior, a falha será pelo descolamento e ou ruptura do PRF. O cálculo exige o conhecimento da linha neutra c , que será determinado a seguir.

4.6.3.2 Linha neutra

A ACI 440 (2017) indica que a estrutura para estar em equilíbrio necessita ter os somatórios de momentos em torno da linha neutra igual a zero. Nesse intuito, diversos métodos podem ser usados, mas a ACI traz o modo iterativo.

Neste método, é assumido um valor para “ c ” e então calculado a deformação específica para cada elemento e verificado o equilíbrio de forças. Se as forças estiverem em equilíbrio, este então é o valor de “ c ”. Caso não se atinja o equilíbrio, assume-se outro valor e recalcula-se. Para que o método iterativo seja mais assertivo

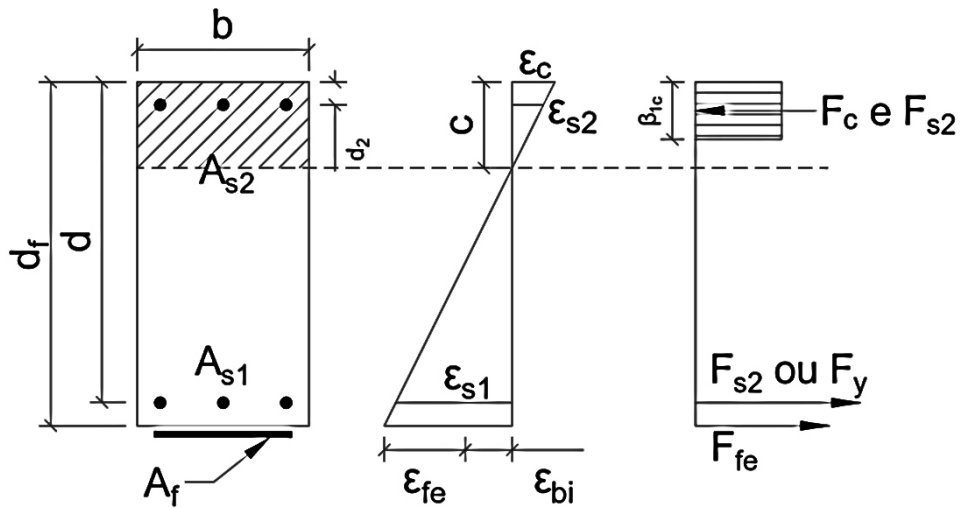
e rápido é recomendável começar usando 20% do valor de “d”, valor da distância entre armadura de tração e face superior da seção transversal.

Assim, utilizando a estimativa inicial pode-se calcular a deformação específica do reforço. Se o modo de ruptura que dominar for do concreto, é assumido uma deformação específica de 3‰, se não pode ser usado a seguinte equação para cálculo de deformação do concreto:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right) \quad (18)$$

As deformações específicas das armaduras de tração e compressão podem ser encontradas usando as semelhanças de triângulos nas equações a seguir:

Figura 11 - Deformações específicas da seção



Fonte: Autor (2025), adaptado de ACI 440.

$$\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (19)$$

$$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c - d_2}{d_f - c} \right) \quad (20)$$

Em seguida, é realizada a determinação das tensões nas armaduras e no reforço de PRF:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (21)$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (22)$$

Recalcula se o valor de c com a seguinte equação:

$$\alpha_1 f'_c \beta_1 b c = A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe} \quad (23)$$

4.6.3.3 Momento fletor resistente

De acordo com Machado (2010), os seguintes esforços estão presentes em uma viga de concreto armada reforçada com compósito de fibra de carbono:

- F_c – resultante da seção comprimida do concreto;
- F'_s – força resultante da seção comprimida da armadura;
- F_s – força resultante da seção tracionada da armadura;
- F_f – força resultante da seção tracionada de fibra de carbono.

Assim o momento fletor resistente de um elemento reforçado com compósito de fibra de carbono é expresso na equação a seguir:

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + A'_s \cdot f'_s \left(\frac{\beta_1 \cdot c}{2} - d' \right) \quad (24)$$

Onde:

$$\begin{aligned} f_s &= E_s \cdot \varepsilon_s < f_y \\ f'_s &= E_s \cdot \varepsilon'_s < f_y \\ f_{fe} &= E_f \cdot \varepsilon_{cf} \leq E_f \cdot \varepsilon_{fe} \\ \psi &= 0,85 \\ F_s &= A_s \cdot f_s \\ F'_s &= A'_s \cdot f'_s \\ F_f &= A_f \cdot f_{fe} \\ F_c &= \alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \end{aligned}$$

Foi utilizado um coeficiente adicional para redução ψ_f , com valor recomendado de 0,85. Pode-se reescrever a equação anterior adaptando-a da seguinte forma:

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + F'_s \left(\frac{\beta_1 \cdot c}{2} - d' \right) \quad (25)$$

Se for admitido que não há presença de armadura de compressão podemos simplificar a equação para:

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (26)$$

Ou ainda:

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (27)$$

Sendo que:

$$F_f = A_f f_{fe}$$

$$f_{fe} = \varepsilon_f E_f = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) E_f$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \left(\frac{h - c}{c} \right)$$

$$f_{fe} = \left[\varepsilon_c \left(\frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right] E_f$$

$$F_f = A_f E_f \left[\varepsilon_c \left(\frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \right] \quad (28)$$

- a) O equilíbrio das forças é obtido através das tensões dos materiais que compõe o elemento. Sendo assim o equilíbrio interno das forças é satisfeito se a expressão a seguir for obedecida:

$$c = \frac{F_s + F_f}{F_c + F_s'} \quad (29)$$

- b) Então a profundidade da linha neutra é encontrada ao atender a equação (a) através das equações (b).

4.6.3.4 Deformação máxima permitida em reforço a flexão em função do número de camadas do compósito

O descolamento das fibras de carbono e a sua delaminação podem ocorrer se o sistema não conseguir absorver os esforços através do substrato de concreto (MACHADO, 2010). A fim de prevenir a ocorrência da delaminação na face do elemento reforçado, é introduzido mais uma limitação ao nível de deformação.

Abaixo as equações demonstram o coeficiente k_m , que é fornecido em detrimento da cola.

$$k_m = \frac{1}{60 \xi_{fcu}} \left(1 - \frac{n \cdot E_{fc} \cdot t_{fc}}{360.000} \right) \leq 0,90 \quad (30)$$

Para:

$$nE_{fc}t_{fc} \leq 180.000$$

$$k_m = \frac{1}{60\xi_{fcu}} \left(\frac{90.000}{nE_{fc}t_{fc}} \right) \leq 0,90$$

Para:

$$nE_{fc}t_{fc} > 180.000$$

Onde:

n – número de camadas de CFC;

E_{fc} – módulo de elasticidade do CFC, em MPa;

t_{fc} – espessura de uma camada do sistema CFC, em mm;

ξ_{fc} – deformação de ruptura do reforço com CFC, mm/mm.

O coeficiente (k_m) acima discriminado, possui seu valor inferior a 0,90, e deve ser multiplicado pela deformação de ruptura do sistema, para que assim seja definido o limite de deformação prevenindo o descolamento das lâminas de CFC.

O valor “ n ” representa o número de camadas dispostas ao longo do segmento reforçado. Como apontado por Machado (2010), os laminados com uma espessura maior possuem uma disposição maior a delaminação. Sendo assim, reforços mais espessos, a deformação máxima se torna mais rigorosa. Os laminados com espessura ($n.E_{fc}.t_{fc}$) maiores que 180.000 N/mm, o coeficiente limita a força aplicada no laminado em oposição ao nível de deformação. O coeficiente determina um limite para a força total que pode ser aplicada ao reforço levando em consideração o número de camadas que serão realizadas com o reforço.

4.6.3.5 Limite de ductibilidade

Ao se fazer o uso de reforço com compósito de fibra de carbono aderido externamente na face inferior da viga, ela terá sua resistência a flexão aumentada. Mas em contrapartida a ductibilidade que o elemento tinha será reduzida.

Na maioria dos casos, essa perda de ductibilidade pode ser desprezada. No entanto, para se prevenir que haja perda acentuada de ductibilidade, podemos

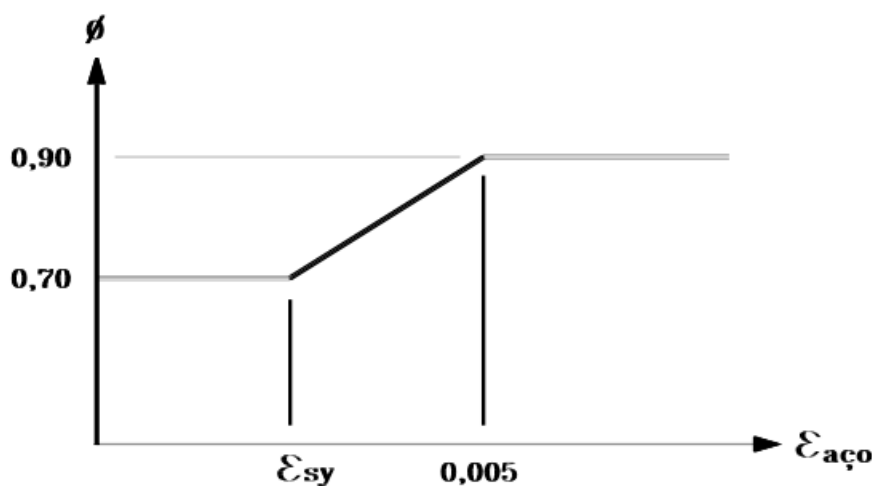
verificar através da deformação do aço no estado limite último. A ACI 318 traz no capítulo 2 que para uma boa ductibilidade ocorra, a deformação do aço sob esmagamento do concreto ou ruptura do sistema seja de 0,005.

Para uma maior segurança e resistência é aplicado um fator de redução de 0,70 a resistência do aço em seções frágeis, ao invés de 0,90 das seções dúcteis, conforme equações a seguir.

$$\begin{aligned}\phi &= 0,90 && \text{para } \xi_s \geq 0,005 \\ \phi &= 0,70 + \frac{0,20(\xi_s - \xi_{sy})}{0,005 - \xi_{sy}} && \text{para } \xi_{sy} < \xi_s < 0,005 \\ \phi &= 0,70 && \text{para } \xi_s \leq \xi_{sy}\end{aligned}$$

Onde ξ_{sy} é a deformação de escoamento do aço.

Figura 12 - Gráfico do Fator de Redução para ductibilidade



Fonte: Machado 2010.

4.6.3.6 Tensão limite para ruptura por fluência e fadiga

Mesmo os materiais de forma isolada, quanto suas composições, ao serem submetidos a carregamento constante e de longa duração, podem vir a sofrer falhas. Esse período é conhecido como período de capacidade de sustentação de tensões. O fenômeno é denominado de ruptura por fluência, semelhante as fadigas que ocorrem no aço (MACHADO, 2010).

Os reforços de fibra de carbono também possuem uma relação que conforme as tensões de longa e curta duração aumentam, a capacidade de resistência diminui.

A longevidade quanto a fluência do compósito de fibra de carbono também varia de acordo o ambiente. Conforme mencionado por Machado (2010), no manual sobre reforços de fibra de carbono, quando submetido a locais de muita variação térmica, exposição a raios ultravioleta, alcalinidade elevada e ciclos de humidade e secagem, tornam a resistência menor.

Conforme Machado (2010), as fibras de carbono não possuem sucessão a ruptura das fibras por fluência, e que a relação de tensão por ruptura a fluência e a resistência inicial, após 500.00 horas (50 anos), é de 0,90¹⁰. A fim de evitar problemas e possíveis rupturas pela fadiga, através da ciclagem de tensões e cargas de longa duração, ao longo do projeto estas duas condições devem ser verificadas. Deste modo, o controle desses eventos deve ser realizado com a imposição de um limite para as tensões atuantes no sistema composto, através da seguinte expressão fornecida pela ACI 440 (2017):

$$f_{fc,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_{fc}}{E_s} \right) \cdot \frac{h - k_d}{d - k_d} - \xi_{bi} \cdot E_{fc} \quad (31)$$

A equação mostra o nível de tensão do sistema composto de CFC, provindo de um momento M_s , consequente das cargas de longa duração. Assim as cargas de longa duração, devem ser limitadas para garantir o coeficiente de segurança.

$$F_{fc,s} \geq f_{fc,s}$$

O ACI 440 (2017) recomenda que para se manter a segurança com tensões de longa duração e estruturas em estado de fadiga, o limite das tensões de fluência seja igual a:

$$F_{fc,s} = 0,55 f_{fcu}$$

4.6.3.7 Tensão de cisalhamento na resina

Machado (2010) traz um questionamento sobre a tensão tangencial atuante entre a superfície do concreto e a matriz polimérica presente no composto do reforço de fibra de carbono. A tensão que atua na resina, essa que é responsável pela colagem do sistema, pode ser dita como tensão atuante na cola. A figura mostra as tensões que são solicitadas em um elemento de dimensão dx . Assim, podemos determinar os valores de cisalhamento atuantes na resina epoxídica.

Começamos determinando o valor de τ_0 ,

$$\Sigma H_{LN} = 0$$

$$C + \tau_0 \cdot b_w \cdot dx = C + dC \quad (32)$$

$$\tau_0 = \frac{C + dC - C}{b_w \cdot dx} = \frac{dC}{b_w \cdot dx} \quad (33)$$

Sabendo que ($M = C \cdot z$) onde,

$$z = \frac{T \cdot z_t + S \cdot z_s}{T + S} \quad (34)$$

$$\frac{dM}{dx} = \frac{dC}{dx} z \rightarrow Q = \frac{dC}{dx} z \rightarrow \frac{dC}{dx} = \frac{Q}{z} \quad (35)$$

ou seja,

$$\tau_0 = \frac{1}{b_w} \cdot \frac{Q}{z} = \frac{Q}{b_w \cdot z} \quad (36)$$

Determinação de τ_s :

$$\Sigma M = 0 \rightarrow C - T + \tau_s \cdot b_w \cdot dx = C + dC - (T + dT) = C + dC - T - dT \quad (37)$$

$$\tau_s = \frac{1}{b_w \cdot dx} (dC - dT) = \frac{1}{b_w} \left(\frac{dC}{dx} - \frac{dT}{dx} \right) \quad (38)$$

$$\tau_s = \frac{1}{b_w} \left(\frac{dC}{dx} - \frac{dT}{dx} \right) \quad (39)$$

Para a ΣM temos:

$$M_s = C \cdot z_s - T(z_s - z_t) \quad (40)$$

$$\frac{dM}{dx} = \frac{dC}{dx} z_s - \frac{dT}{dx} (z_s - z_t) \quad (41)$$

$$\frac{dM}{dx} = Q$$

$$\frac{dC}{dx} = \frac{Q}{z} \frac{dT}{dx} = \frac{\frac{Q}{z} z_s - Q}{(z_s - z_t)} \quad (42)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{Q \left(\frac{z_s}{z} - 1 \right)}{(z_s - z_t)} \quad (43)$$

Substituindo as fórmulas:

$$\tau_s = \frac{1}{b_w} \left(\frac{Q}{z} - \frac{Q - \left(\frac{z_s}{z} - 1 \right)}{(z_s - z_t)} \right) \quad (44)$$

$$\tau_s = \frac{1}{b_w} \left(\frac{Q}{z} - \frac{\frac{Q}{z} (z_s - z)}{(z_s - z_t)} \right) \quad (45)$$

$$\tau_s = \frac{Q}{b_w \cdot z} \left(1 - \frac{(z_s - z)}{(z_s - z_t)} \right) \quad (46)$$

$$z = \frac{T \cdot z_t + S \cdot z_s}{T + S} \quad (47)$$

Aproximando os valores podemos usar τ_s com a seguinte expressão:

$$\tau_s = \tau_0 \left(\frac{S}{S + T} \right) \quad (48)$$

5 PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÃO E APLICAÇÃO DO REFORÇO DE CFC

A forma executiva de aplicação dos compósitos reforçados com fibra de carbono pode sofrer algumas alterações conforme o fabricante. A Norma Americana ACI 440 (2017), enfatiza que é importante sempre verificar junto ao fabricante as recomendações específicas de aplicação do produto, para que ele possa ter o máximo de desempenho desejado no local de aplicação.

Para que o compósito reforçado com carbono funcione de forma adequada na estrutura a ser reforçada, é de extrema importância que, além de ser dimensionado corretamente, seja executado de forma satisfatória (MACHADO, 2010). Uma aplicação desuniforme ou sem a sequência correta, pode implicar na perda da eficiência do compósito, configurando uma estrutura frágil e sem capacidade de suporte a carga.

Conforme apresentado por Machado (2010) no Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono, há uma sequência de procedimentos que devem ser executados que irão garantir a fixação e funcionalidade do reforço de fibra de carbono.

5.1 Recuperação do concreto

Para garantir que as tensões presentes no substrato de concreto armado, sejam transferidas para o composto de fibra de carbono, é necessário que a interface de contato entre os dois esteja íntegra (MACHADO, 2010). A superfície que receberá o agente adesivo para aderência do CFC, deve ser preparada, com a remoção de poeiras, graxas e contaminantes que interferem no processo de adesão. Pequenas irregularidades também devem ser tratadas e remediadas antes da aplicação da resina de colagem do compósito. Segundo Hollaway e Leeming (1999), esse processo de recuperação da superfície garante desempenho superior e uma durabilidade maior a longo prazo.

Para realizar a recuperação do concreto na superfície que receberá o CFC, deve ser realizado os seguintes procedimentos:

- Remoção do concreto que se encontra desagregado próximo as armaduras;
- Regularização da face que receberá a camada de CFC, para que não apresente erupções ou sulcos na superfície;

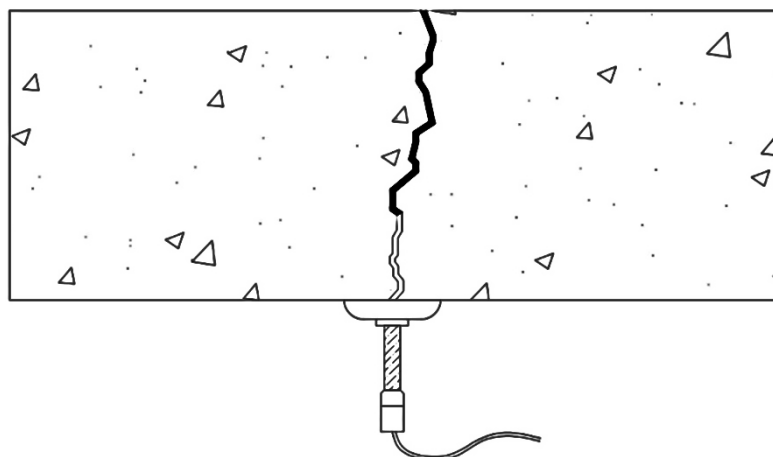
- Limpeza e remoção da corrosão das barras de aço e posterior passivação das mesmas;
- Por fim, recomposição do concreto.

Assim como Machado (2010) e De Souza e Ripper (1998), é imprescindível que as causas que induzem a corrosão das armaduras sejam investigadas e remediadas, para que novas manifestações não venham comprometer a peça estrutural.

5.2 Fissuras (ou trincas) e recuperação

As superfícies que receberam a aplicação de reforço, apresentarem alguma forma de fissura ou trinca, devem ser tratadas. O tratamento nessa situação pode ser feito com a utilização de injeção em alta pressão de resinas. Em aberturas superiores a 0,25mm e que estiveram expostas ao meio ambiente agressivo. Pode ser necessário a utilização de resinas ou seladores que inibam a corrosão das armaduras.

Figura 13 - Injeção de resina sob pressão nas fissuras do concreto



Fonte: Autor (2025), adaptado de Machado (2010).

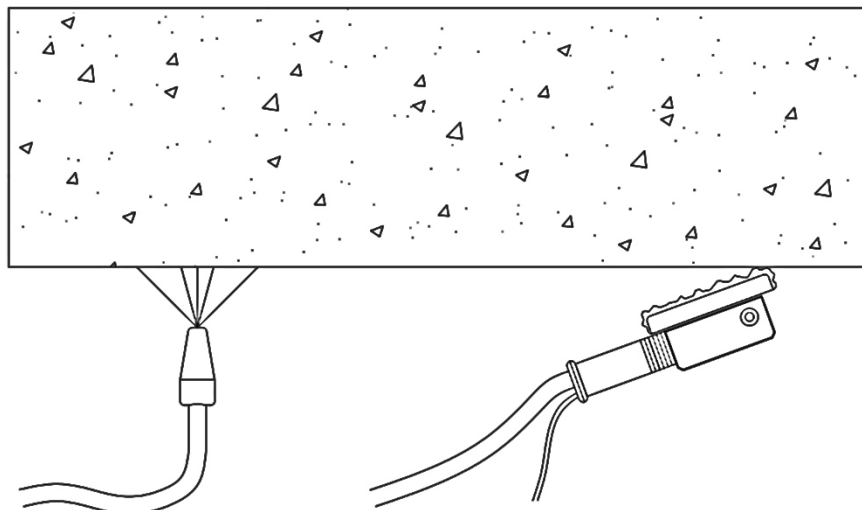
5.3 Preparação da superfície para receber o compósito

Os compostos aplicados com o propósito de reforçar a estrutura quanto a flexão, cisalhamento e compressão necessitam de uma ancoragem bem estabelecida, a fim de proporcionar uma transferência de esforços entre o composto e o elemento, caracterizada como condição crítica de colagem (MACHADO, 2010).

Para a colagem em situação crítica a superfície do concreto deve receber ação de algum elemento abrasivo, como jato de areia ou limalha. Quando a superfície é

pequena, se faz o uso de politriz com discos para desbaste. Estas acopladas muitas vezes a dutos de aspersão, evitando a contaminação do ambiente com a poeira. Neste procedimento, a limpeza deve contemplar a remoção de óleos, graxas, camadas de tintas, de argamassas e partículas sólidas que estão totalmente ou parcialmente aderidas.

Figura 14 - Limpeza da superfície com politriz ou jato de areia



Fonte: Autor (2025), adaptado machado (2010).

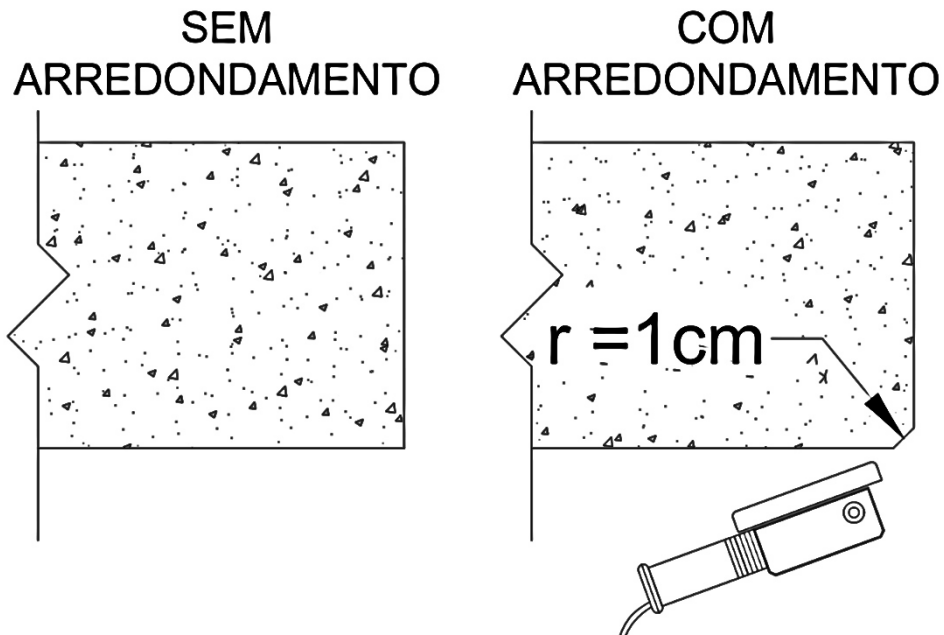
Figura 15 - Utilização de politriz com aspirador para limpeza da superfície



Fonte: Machado (2010).

Em locais que serão usados o sistema em mais de uma face para contemplar o reforço, é necessário realizar um arredondamento nas quinas para a colagem do compósito. Esse arredondamento no canto irá garantir que não ocorra uma concentração de tensões no compósito, ou presença de vazio entre a superfície e o sistema de reforço.

Figura 16 - Comparação de arredondamento de canto em elemento

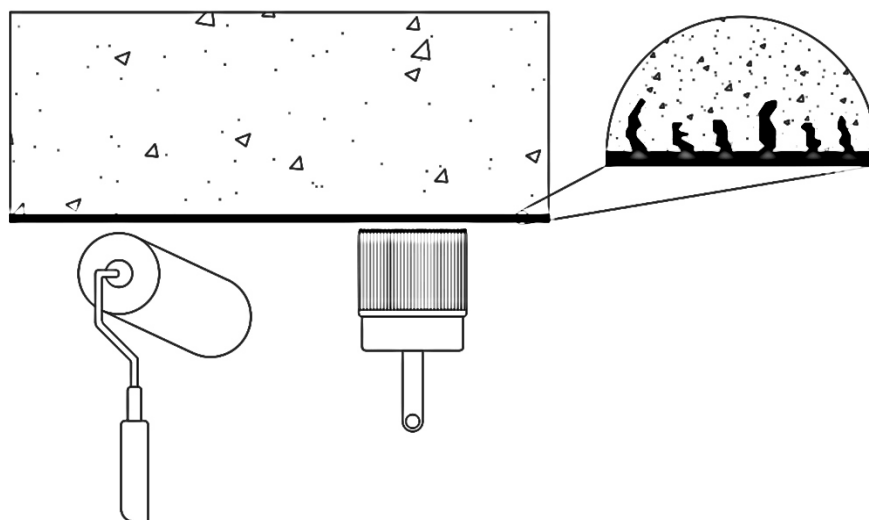


Fonte: Autor (2025).

5.4 Imprimador primário

Com a preparação da superfície e ela estando limpa, seca e sem a presença de umidade ou irregularidade, pode-se avançar para o processo de aplicação do imprimador. A função que o imprimador exerce, nesta primeira aplicação, é a de penetrar nos poros, criando a superfície regular, a fim de criar uma ponte de aderência entre o compósito e a face de concreto que receberá o reforço.

Figura 17 - Aplicação de imprimador primário com uso pincel ou rolo

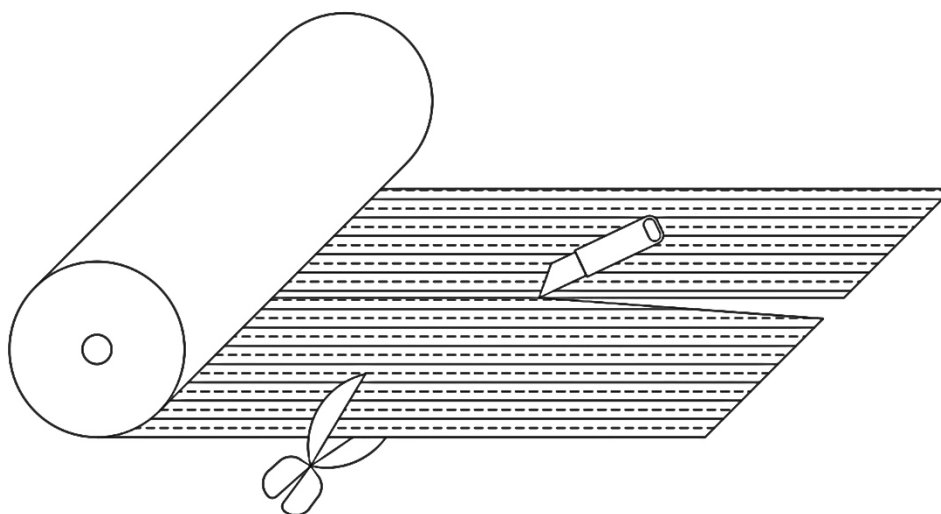


Fonte: Autor (2025)

5.5 Corte e imprimação das fibras

Para realizar o corte das lâminas de fibra de carbono, estas devem estar dispostas sobre uma superfície plana e limpa, para não gerar contaminações e erros na dimensão dos cortes. Para os cortes transversais é recomendado o uso de tesouras de aço, enquanto cortes longitudinais o uso de lâminas como estilete são mais recomendáveis. Após a definição e corte das peças de reforço, é realizado a saturação das peças podendo ser se de duas formas.

Figura 18 - Corte da fibra no sentido longitudinal e transversal



Fonte: Autor (2025).

5.5.1 Saturação via úmida

Neste método, a lâmina de fibra de carbono é saturada com resina epóxi sobre bancada antes de ser aplicada. Após a saturação da peça, esta é levada até o local de aplicação.

5.5.2 Saturação via seco

No sistema via seco, a lâmina de fibra de carbono é preparada diretamente no local onde será utilizada como reforço. Assim o corte e transporte é realizado de forma seca, sem nenhuma resina pré-aplicada ela.

Machado (2010), relata que existe duas vertentes quanto a estas duas metodologias de saturação das fibras. Para uma melhor trabalhabilidade e aplicação em locais de ponta cabeça, a saturação via húmida traz um ganho na execução e economia de resina, mas com uma condicionante no tamanho das lâminas. Peças

superiores a 4 metros, saturadas húmidas, são mais difíceis de serem aplicadas, neste caso a saturação via seca é mais recomendada.

5.6 Aplicação da lâmina e ferramentas

As ferramentas usadas para aplicação das fibras são simples e não possuem especificações técnicas. Para aplicação do imprimador e dos saturantes são utilizados pinceis ou rolos de espuma, pois estes ajudam a criar mais uniformidade nas camadas aplicadas. Outra ferramenta utilizada é o rolo metálico. Ele proporciona alinhamento das fibras, rolagem e extração das bolhas de ar que ficam presas junto ao compósito.

A colagem das lâminas de fibra de carbono possui um período curto para sua aplicação, indiferente o tipo de imprimador usado, isso se deve pelo fato de a resina saturante ter um post-life¹ pequeno (MACHADO, 2010). O tempo médio para realizar a aplicação das fibras é de 25 a 30 minutos, nesse período também é possível realizar o ajuste da colagem, para garantir o alinhamento adequado das fibras. A norma ACI 440 (2017), ressalta quanto ao alinhamento das fibras, possuindo um limite de no máximo 5° (cinco graus), 87mm/m.

5.7 Segunda camada de saturante

Após realizado a aplicação e ajuste da lâmina reforçada com fibra de carbono e remoção de todas as bolhas de ar, é seguido para a próxima etapa executiva. A fase subsequente é a aplicação de uma nova camada de saturante, de forma que a lâmina fique totalmente coberta. O tempo para a aplicação do saturante pode variar conforme o fabricante, sugere-se um tempo aproximado de 30 minutos.

Após seguido estas etapas, a peça encontra-se estruturalmente reforçada. Como pode ser necessário a aplicação de mais camadas de reforço, conforme projeto, é preciso repetir as etapas mencionadas, sendo necessário aplicar nova camada de saturante. Machado (2010), reforça que não pode ser usado a camada de saturante da lâmina anterior para aderência de nova camada. Para cada nova camada de reforço com lâmina de fibra de carbono, a aplicação de saturante deve ser individual.

5.8 Revestimento estética e protetiva

De acordo com o local de aplicação do reforço, se tem uma necessidade de esconder ou disfarçar o sistema composto. Para isso, alguns fabricantes

disponibilizam revestimentos especiais para serem aplicados sobre o reforço, com cores e texturas diferentes. Outro ponto positivo para a aplicação de um revestimento sobre o reforço é a melhora na proteção do sistema contra ações mecânicas e químicas.

6 METODOLOGIA

Para este trabalho, a metodologia foi baseada em revisão bibliográfica sobre o desempenho de compósitos reforçados com fibra de carbono (CRFC). Posteriormente, foi realizado a moldagem de corpos de prova onde receberam o compósito de fibra de carbono, para serem ensaiados no laboratório de estruturas da UNISC. Com a realização desse ensaio, foi possível verificar na prática o ganho de desempenho que a estrutura adquiriu ao ser reforçada com o uso de CRFC.

Para que o trabalho atingisse o objetivo final, ele seguiu todos os procedimentos de cálculos apresentados através da revisão bibliográfica, bem como passo a passo da execução de colagem do compósito de fibra de carbono nos corpos de prova.

6.1 Considerações iniciais

O trabalho experimental investigou o comportamento que as vigas de concreto reforçadas com CRFC obtiveram em comparação a viga modelo que não possui reforço, sendo ambas submetidas ao esforço de flexão.

Para a realização dos ensaios foram confeccionados 4 protótipos no formato e tamanho de vigas. A seção das vigas são de 12cm por 25cm, com comprimento de 240cm. Sendo que destes 4 corpos de prova, vigas 1 a 3 possuem a aplicação do compósito reforçado com fibra e viga 4 não havia nenhum reforço aplicado. Este, utilizado como testemunho.

O concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova, foi confeccionado em laboratório com a utilização de betoneira. A resistência característica do concreto é de classe C25. Resistência determinada para que fosse possível verificar com precisão a eficácia do reforço aplicado junto ao corpo de prova.

Os ensaios de determinação de resistência do concreto e da fibra seguiram os padrões e orientações das normas brasileira e americana.

6.2 Materiais

6.2.1 Concreto

A execução da concretagem das vigas foi realizada no dia 3 de outubro de 2025, com a utilização de concreto fabricado em loco junto ao laboratório de estruturas da UNISC. Para o concreto, foi utilizado um traço em massa seca que ao final de 28 dias o concreto apresentasse a resistência característica de 25 MPa.

A mistura do concreto iniciou-se no período da manhã, por volta das 8:00 horas, e o processo de concretagem se estendeu até as 13:00 horas, sendo necessário realizar duas dosagens de concreto para se atingir o volume de $0,3\text{m}^3$. A mistura do concreto foi realizada de forma mecânica com uso de betoneira de queda livre e eixo inclinado, com capacidade de 250 litros. O concreto dentro das formas foi despejado de forma manual, com uso de pá e o adensamento foi realizado com o uso de vibrador mecânico e haste metálica de forma manual.

O traço de concreto utilizado foi dado em unidade de massa seca dos materiais, sendo 1 : 2,5 : 3,5 (padrão do laboratório para classe de concreto C25), para cada quilo de cimento, 2,5 kg de areia e 3,5 kg de brita, com uma relação de água cimento de 0,6. O cimento adotado para a fabricação foi do tipo CPV ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial). O agregado miúdo (areia), foi utilizado do tipo grossa, onde o tamanho dos grãos varia entre 2 e 4 mm. E o agregado graúdo (brita), foi utilizado brita 0 (zero), onde o tamanho varia entre 4,8 a 9,5 mm. A água utilizada era limpa e potável, sem presença de nenhum tipo de contaminante que pudesse alterar as características do concreto tanto no estado fresco quanto do estado endurecido.

Para esse experimento, não foram utilizados aditivos que alterem as características do concreto, como plastificantes que alteram a trabalhabilidade ou aceleradores de pega. A utilização de aditivo do tipo plastificante aumenta a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, mas diminui a relação água cimento, o que acarreta um aumento na resistência final. Como o objetivo do trabalho é que seja verificado o ganho de resistência na viga com aplicação do CRFC, o concreto não deve influenciar nos resultados, sendo este possuir a resistência mínima que estabelece a norma de projeto, NBR6118:2023, 25 MPa. A tabela 4 apresenta a quantidade de material pesado para a confecção do concreto.

Tabela 4 – Consumo de materiais para concreto

Material	Consumo de 150 L (kg)	Consumo de 300L (kg)
Cimento CPV	49,35	98,7
Areia	120,43	240,86
Brita 0	165,15	330,30
Água	24,98	49,96

Fonte: Autor 2025.

Para o controle tecnológico do concreto utilizado na modelagem das vigas, foi realizado o ensaio de abatimento tronco cone, *slump test*, conforme orientações da NBR 16889:2020, que indica os procedimentos e etapas para a realização do teste.

Figura 19 e 20 – Abatimento concreto da primeira dosagem



Fonte: Autor, 2025.

Como visto nas figuras 19 e 20, o abatimento do concreto feito através do ensaio de *slump test* para a primeira dosagem ficou em 125mm.

Para a segunda dosagem do concreto, o valor obtido no teste de abatimento tronco cone foi de 130mm, dentro do valor esperado. O resultado pode ser conferido a seguir nas figuras 21 e 22.

Figuras 21 e 22 – Teste de tronco cone, segunda dosagem



Fonte: Autor, 2025.

Também foi realizado a moldagem de corpos de prova cilíndrico nas dimensões de 100mm de diâmetro e 200mm de altura (10 x 20cm), seguindo as orientações da NBR 5738:2015. Foram confeccionados 20 corpos de prova, sendo 10 para cada dosagem de concreto. A modelagem dos corpos foi realizada para que ao atingir a idade de cura de 28 dias, os moldes fossem ensaiados e obtidos os resultados referentes a sua resistência mecânica a compressão e tração.

6.2.1.1 Resultados concreto

O concreto dosado para a modelagem das vigas utilizadas como corpos de prova foi submetido a ensaios para determinação da sua resistência. Foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico em 4 corpos de prova cilíndricos, sendo 2 para cada dosagem do concreto. Para o ensaio de tração por compressão diametral foi utilizado 8 corpos de prova, sendo 4 de cada dosagem. E por fim, 12

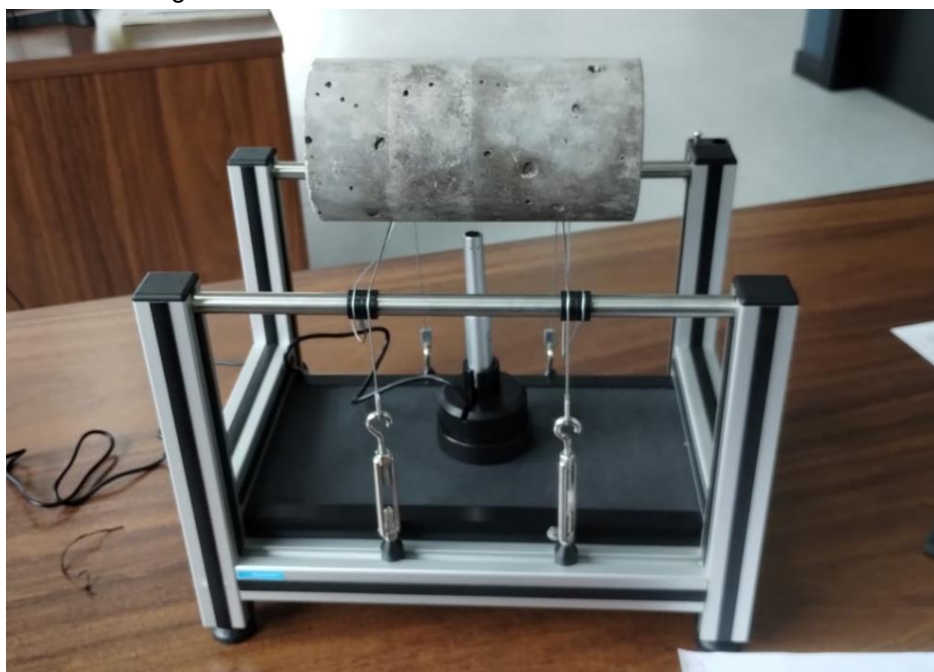
corpos de prova forma submetidos ao ensaio de compressão para determinar a resistência real, sendo 6 amostras de cada dosagem.

6.2.1.2 Ensaio módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto, foi utilizado o sistema Sonelastic HZ, que emprega Técnica de Excitação por Impulso. O ensaio foi realizado junto ao laboratório PRO Laboratório de Estruturas e Materiais, localizado na cidade de Santa Cruz do Sul.

Para o ensaio são determinados as dimensões e peso do corpo de prova, em seguida são marcadas as linhas nodais na face, essas localizadas a $0,224.h$. Em seguida o CP é posicionado no equipamento e seu alinhamento é feito através das marcações das linhas nodais. Com o uso de um pulsador, é aplicado o impacto sobre o concreto. A vibração gerada é coletada pelo equipamento e o *software* faz a interpretação e cálculo automático do módulo. A tabela 5 apresenta os valores obtidos no ensaio.

Figura 23 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 5 – Resultados módulo de elasticidade dinâmico

Amostra	Largura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	E (GPa)	Eci (GPa)
---------	--------------	---------------	-----------	---------	-----------

D1 CP1	196,75	99,76	3643,10	36,274	27,530
D1 CP2	198,00	99,78	3642,90	34,866	26,223
D2 CP1	197,00	99,81	3663,30	36,183	27,344
D2 CP2	197,25	99,60	3646,60	36,189	27,396

Fonte: Autor, 2025.

6.2.1.3 Ensaio de tração no concreto

Para o ensaio de tração no concreto, foi utilizado o método de tração por compressão diametral. O ensaio consiste na compressão do corpo de prova através do seu diâmetro, com o CP deitado na prensa. Este ensaio ocorreu no Laboratório de Estrutura da UNISC, onde o corpo de prova foi posicionado na prensa hidráulica através de um dispositivo que garante a aplicação da carga de forma distribuída na face lateral do CP. A tabela 6 apresenta os valores de resistência a tração do concreto. Os valores são obtidos através do *software* da prensa com a caracterização dimensional dos CPs.

Tabela 6 – Resultados resistência a tração do concreto

Amostras		Força Máxima (kgf)	Resistência (MPa)
Dosagem 1 (D1)	CP 1	7299,99	2,31
	CP 2	7248,84	2,30
	CP 3	8425,32	2,67
	CP 4	9367,96	2,97
Dosagem 2 (D2)	CP 1	9492,18	3,01
	CP 2	9974,46	3,16
	CP 3	9616,41	3,05
	CP 4	9031,82	2,86

Fonte: Autor, 2025.

6.2.1.4 Ensaio de compressão

Para determinação da resistência a compressão, os corpos de prova foram submetidos ao rompimento através da prensa hidráulica no Laboratório de Estruturas da UNISC. Para isso é realizado a retifica do topo do CP para garantir planicidade total e aplicação uniforme da carga. Em seguida, são posicionados na prensa e o ajuste é feito com uso de Neoprene®, que garante a aplicação uniforme da carga na superfície do corpo de prova. A seguir, tabela 7 apresenta os resultados de resistência a compressão para o concreto confeccionado.

Figura 24 – Ensaio de compressão em corpos cilíndricos



Fonte: Autor, 2025.

Tabela 7 – Resultados resistência a compressão do concreto

Amostras		Resistência (MPa)
Dosagem 1 (D1)	CP 1	36,09
	CP 2	33,76
	CP 3	33,86
	CP 4	34,41
	CP 5	34,84
	CP 6	34,36
Dosagem 2 (D2)	CP 1	35,55
	CP 2	33,44
	CP 3	27,50
	CP 4	30,99
	CP 5	30,91
	CP 6	30,15

Fonte: Autor, 2025.

6.2.2 Armadura

As armaduras utilizadas para a confecção das vigas foram o aço CA-60 para as barras de Ø5,0mm, e o aço CA-50 para as barras longitudinais de Ø10mm. A armadura da viga é constituída de 4 barras longitudinais com Ø10mm, sendo 2 barras na parte superior da viga, armadura negativa, e 2 barras na parte inferior, armadura positiva. As barras de Ø5,0mm foram utilizadas para confecção das armaduras transversais, os estribos, sendo utilizados 21 unidades de estribos por viga armada. A tabela a seguir apresenta os valores de tensão de escoamento do aço CA50, (barras

de Ø10mm), utilizadas como armaduras longitudinais. As barras foram submetidas ao ensaio de tração conforme indicado na NBR ISO 6892-1:2024.

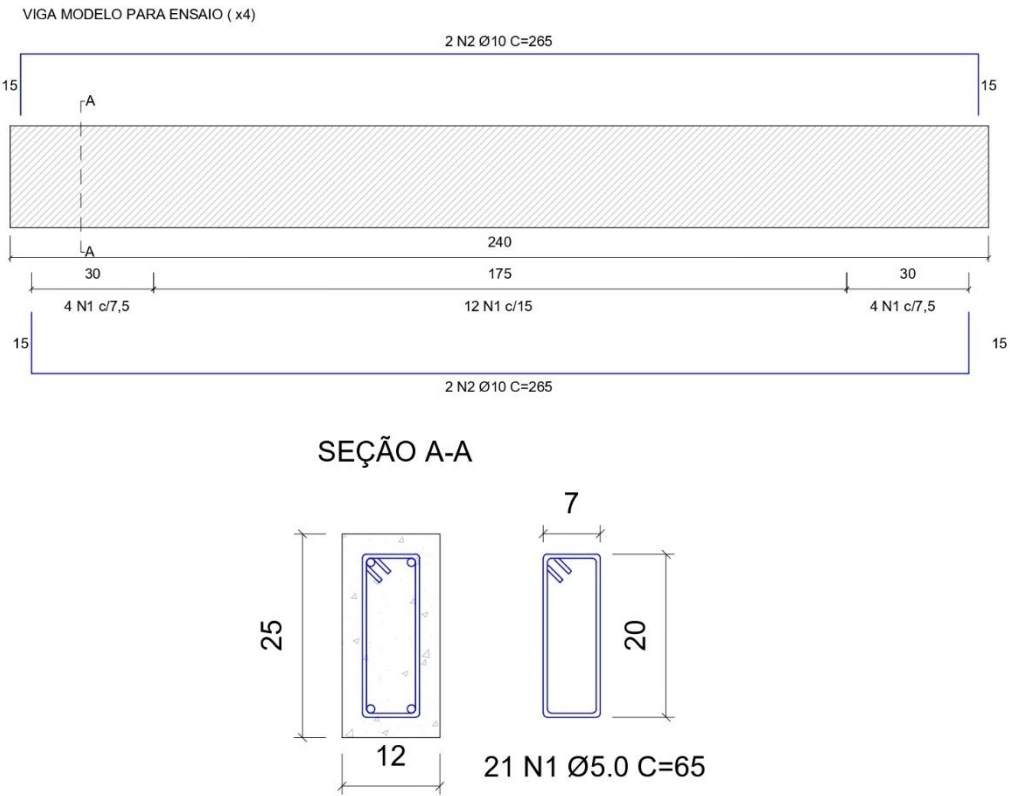
Tabela 8 – Tensão de escoamento do aço CA50

Amostra	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Tensão Escoamento (MPa)
A1	10	100	565,30
A2	10	100	569,58
A3	10	100	611,29

Fonte: Autor, 2025.

A figura 24 mostra a armadura utilizada nas vigas modelo, onde consta as barras longitudinais superior e inferior, ambas com ganchos de 15cm nas extremidades, bem como também a distribuição dos estribos, onde o espaçamento entre eles, nos primeiros 30cm do elemento, é utilizado 7,5cm. Já no corpo da viga, o espaçamento usado entre eles é de 15cm. O detalhe pode ser conferido junto a figura 25, que apresenta o projeto de armadura para a viga modelo.

Figura 25 – Detalhe construtivo da armadura usada para viga modelo



Fonte: Autor, 2025.

Para criar a armação das vigas juntando as barras longitudinais e transversais, foi utilizado arame recozido, seguindo os distanciamentos solicitados pelo projeto.

O cobrimento utilizado na armadura segue o pressuposto da NBR 6118:2023, onde em situações que há um controle rigoroso na montagem e execução, pode-se admitir o uso de cobrimento de 25mm dispensando o espaçamento de 30mm. Por se tratar de uma armadura montada em laboratório, o controle da montagem foi seguido de forma plena, admitindo-se assim o uso de 25mm como cobrimento das armaduras. Para garantir que o cobrimento da estrutura fosse atendido dentro da forma, foi utilizado espaçadores plásticos. Os espaçadores auxiliam no distanciamento entre as armaduras e a forma usada de molde para as vigas. O modelo do tipo roseta é preso junto as armaduras laterais, para garantir que a armadura não toque a forma lateralmente. O espaçador do tipo cadeirinha é utilizado para erguer a armadura do fundo da forma, para que o cobrimento inferior seja respeitado.

Figura 26 – Armadura das vigas modelo montadas



Fonte: Autor, 2025.

Figura 27 – Armadura com os espaçadores dentro da forma



Fonte: Autor, 2025.

6.2.3 Forma

O gabarito empregado para a modelagem das vigas foi confeccionado em ambiente laboratorial, constituindo-se um molde com dimensões superiores que apresentava divisões internas, as quais delimitavam o tamanho exato dos elementos a serem executados. A parte inferior da forma, as paredes laterais e as internas que fazem as repartições, foram confeccionadas em chapas de compensado plastificadas com 12mm de espessura. A utilização deste material para a modelagem das vigas se deve ao fato de que a superfície plana e uniforme e o acabamento plastificado, auxilia na desforma dos elementos pós cura do concreto.

Para a realização dos travamentos externos do molde, foram utilizados sarrafos de madeira do tipo eucalipto, nas dimensões de 7cm de largura e 2,5cm de espessura. O travamento do molde para as vigas é fundamental, ele garante a estabilidade e dimensão da forma durante o lançamento e adensamento de concreto. Sem a

presença destas peças, a movimentação das partes laterais causaria mudanças de seção nos elementos.

As dimensões internas da forma seguiram conforme o projeto da viga modelo, sendo sua seção de 12cm x 25cm, e um comprimento total de 240cm.

6.2.4 Compósito de fibra de carbono (CFC)

O sistema de reforço das vigas com compósito de fibra de carbono utilizado para o experimento, é fornecido pela empresa Haining ANJIE Composite Materials Co. Ltda, especializada na produção e manufatura de fibras em carbono, vidro, basalto e aramidas.

Com o objetivo de suporte de cargas de flexão na viga, o reforço de fibra de carbono escolhida é do tipo unidirecional, que como dito anteriormente, é quando a manta tem sua confecção da linha de fibras traçadas em apenas uma direção. O seu fornecimento foi dado através de rolo com largura de 50cm e comprimento de 500cm. Através deste, foi realizado o corte dos reforços conforme o tamanho necessitado de 25cm por 240cm. As características físicas da manta de fibra de carbono segundo a fabricante são de resistência a tração de $\geq 3400\text{MPa}$ (megapascal), módulo de elasticidade $\geq 240\text{GPa}$ (gigapascal), um alongamento de 1,7% em relação ao seu tamanho inicial, peso de 200 gramas por metro quadrado e espessura máxima de 0,111mm.

Para a criação do sistema de reforço, a resina epóxi utilizada para a fixação e impregnação da manta de fibra de carbono é a VIAPOL CARBON SATURANTE BR®, adesivo epóxi estrutural, tixotropico, bicomponente de uso destinado a colagem de fibras em estruturas de concreto que recebem reforço estrutural.

A resina epóxi bicomponente possui a proporção de 4:1 em peso, da mistura entre os componentes A e B. A cor dos componentes é azul claro para o A, e amarelo claro translúcido para o B. Conforme a fabricante VIAPOL®, o modulo de flexão possui valor de 3800MPa, resistência a tração de 30MPa, módulo de elasticidade de 4500MPa, todos atingidos aos 7 dias de cura e resistência adesiva à tração ao concreto superior a 4MPa.

6.3 Serviços preliminares

De acordo com o manual do fabricante de CFC e conforme descrito anteriormente no item 5 (PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÃO E APLICAÇÃO DO REFORÇO DE CFC), a superfície que receberá a aplicação do compósito reforçado de fibra de carbono, precisa estar em condições para que a aderência do sistema funcione de forma plena.

A preparação para aplicação do reforço nas vigas de concreto começou logo após a realização da desforma dos elementos, onde foi verificado a integridade da superfície. Durante a análise foi observado se houve presença de alguma segregação do concreto, fissura ao longo do elemento ou alguma superfície pontiaguda que pudesse ocasionar o rompimento do compósito.

De acordo com Machado (2010), quando o elemento que for receber o reforço estiver submetido a esforços de flexão, cisalhamento ou compressão, necessita de ancoragem bem estabelecida, pois se caracteriza como colagem crítica. Diante disso, a superfície inferior da viga, o qual recebeu a colagem do compósito passou por tratamento para garantir a aderência total e uniforme do sistema. O tratamento aplicado na superfície do concreto foi realizado juntamente as faces de colagem do CFC.

6.3.1 Desforma

A desforma das vigas foi realizada aos 30 dias após a concretagem. Neste período, foi mantido os elementos dentro da forma para garantir a integridade dos corpos de prova, sem que houvesse a danificação das arestas ou cantos devido ao manuseio incorreto. Para auxiliar a desforma, foi utilizado martelo na remoção dos pregos e pé de cabra para remoção de sarrafos de madeira, sempre tomando os devidos cuidados para não gerar esforços que ocasionassem fissuras ou danos aos elementos.

Figura 28 – Elementos após desforma, visualização da integridade



Fonte: Autor, 2025.

6.3.2 Preparativo da superfície

Para a aplicação do reforço sobre a superfície do concreto é necessário fazer uma preparação para que a aderência entre o substrato do concreto e o reforço atinja a ancoragem ideal, garantindo a transferência dos esforços solicitantes.

Na preparação da superfície foi utilizado esmerilhadeira com disco de desbaste para remover irregularidades de agregados com dimensões superiores a 5mm. Também foi utilizado no processo lixa manual nº 80 e 100 para complementar a limpeza removendo sujeiras e substâncias que podem dificultar a aderência da resina nos poros do concreto. Durante todo o processo de desbaste e regularização foi gerado poeiras do concreto, que se depositaram dentro das fissuras e orifícios presentes nas vigas. Para a remoção efetiva deste material, foi utilizado jato de ar comprimido e uma vassoura de mão, garantindo a remoção de partículas soltas. Após todo esse processo, foi realizado nova inspeção para verificação da integridade da superfície, garantindo que não haja locais com irregularidades superiores a 5mm.

Durante o processo de limpeza pode ser observado a presença de algumas irregularidades do tipo orifícios, com dimensão entre 4 a 8mm, como visto na figura 29. O que compromete a aplicação do reforço e ancoragem da resina. Para a correção destas pequenas aberturas na superfície do concreto, foi utilizado adesivo epóxi bicomponente SIKADUR®-32. A dosagem foi realizada seguindo as indicações da

fabricante, que foram na proporção 2:1 em peso dos componentes A e B. A aplicação da resina para fechamento das aberturas foi feita com o uso de espátula metálica, criando movimentos que preenchessem os orifícios, e removendo o excesso, garantindo que a resina esteja somente dentro das aberturas.

Figura 29 – Presença de orifícios na face do concreto



Fonte: Autor, 2025.

Figura 30 – Orifícios fechados com resina epóxi



Fonte: Autor, 2025.

6.3.3 Aplicação do reforço

A aplicação do compósito de fibra de carbono sobre a superfície ocorreu 2 dias após o reparo dos vazios, tempo necessário para que a resina epóxi aplicada estivesse com sua cura total, sem prejudicar na aplicação da resina de saturação da fibra.

O procedimento de aplicação da manta de fibra de carbono pode divergir em dois métodos, com a saturação via seco ou via húmido. Para o experimento foi definido a saturação via seca, pois melhora e facilita a manipulação da manta sobre a superfície da viga.

O procedimento iniciou com o corte da manta de fibra de carbono com o uso de tesoura e estilete, nas dimensões necessárias, sendo elas de 25 x 240cm. A seção da viga possui 12cm x 25cm, sendo assim toda a superfície inferior recebe a colagem do reforço e ele se estende para as duas laterais com o tamanho aproximado de 6,5cm.

Figura 31 – Corte das fibras de carbono na dimensão de 25cm x 240cm



Fonte: Autor, 2025.

A próxima etapa foi a preparação da resina epóxi VIAPOL CARBON SATURANTE BR®, utilizada na colagem e impregnação da manta. Como a resina é bicomponente, é necessário realizar a mistura e homogeneização na proporção correta para garantir o desempenho desejado. A preparação foi realizada com uso de haste metálica e recipiente plástico, seguindo as recomendações de tempo de mistura. A homogeneização da resina é fundamental para que o componente catalisador reaja quimicamente, criando a mistura que após cura atingirá a resistência desejada.

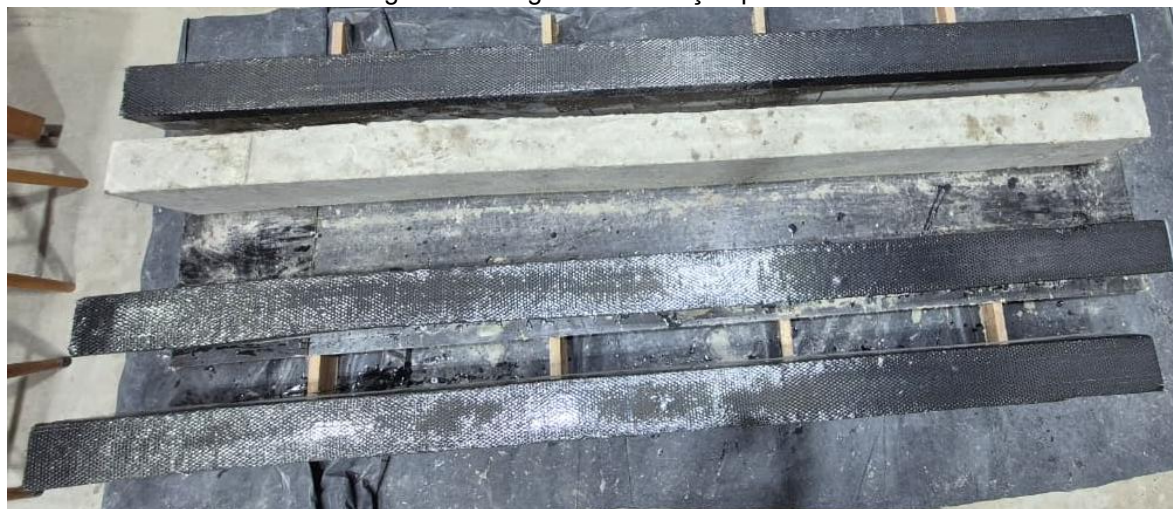
Com a resina preparada foi iniciado o processo de aplicação com o uso de rolo de espuma. A primeira camada sobre a superfície de concreto visa penetrar nos poros e criar a ponte de aderência do compósito com o substrato, desta forma ela precisa estar uniforme e sem a presença de materiais particulados. Logo em seguida foi realizado a aplicação de uma segunda camada de resina, sobre a primeira, ainda no estado fresco. O objetivo desta segunda camada foi a saturação da manta de fibra de carbono junto a face do concreto.

Com a resina aplicada foi realizado a disposição da manta sobre ela de forma uniforme e com a fibra no mesmo sentido longitudinal da viga a ser reforçada. A posição da fibra de carbono precisa estar alinhada com o sentido longitudinal, sem a criação de angulações que possam prejudicar o desempenho. Com o tecido disposto é utilizado um rolo fura bolhas, onde são aplicados pressões e movimentos no sentido da manta, com o intuito de remover espaços vazios entre a fibra e a superfície, assegurando a total aderência do sistema. Para finalizar a aplicação do reforço foi necessário executar uma nova camada de resina sobre a manta, criando a saturação total da fibra de carbono. A uniformização da resina foi feita com o uso de rolo de espuma, criando uma camada regular sem concentrações sobre o laminado.

O sistema de reforço com manta de fibra de carbono aceita que seja aplicado mais de uma camada, sendo assim os passos anteriores se repetiriam, mas para este programa experimental utilizou-se a aplicação de apenas uma camada de reforço.

Conforme a fabricante da resina, o tempo de cura pode variar de acordo com condições climáticas, se o tempo está úmido, quente, frio ou seco, no entanto em 48 horas se tem uma cura ótima para a continuidade de outros procedimentos, como reboco ou aplicação de revestimentos. A aplicação da resina em laboratório ocorreu em uma tarde com o clima seco e quente, o que proporcionou uma cura mais rápida do sistema.

Figura 32 – Vigas com reforço aplicado



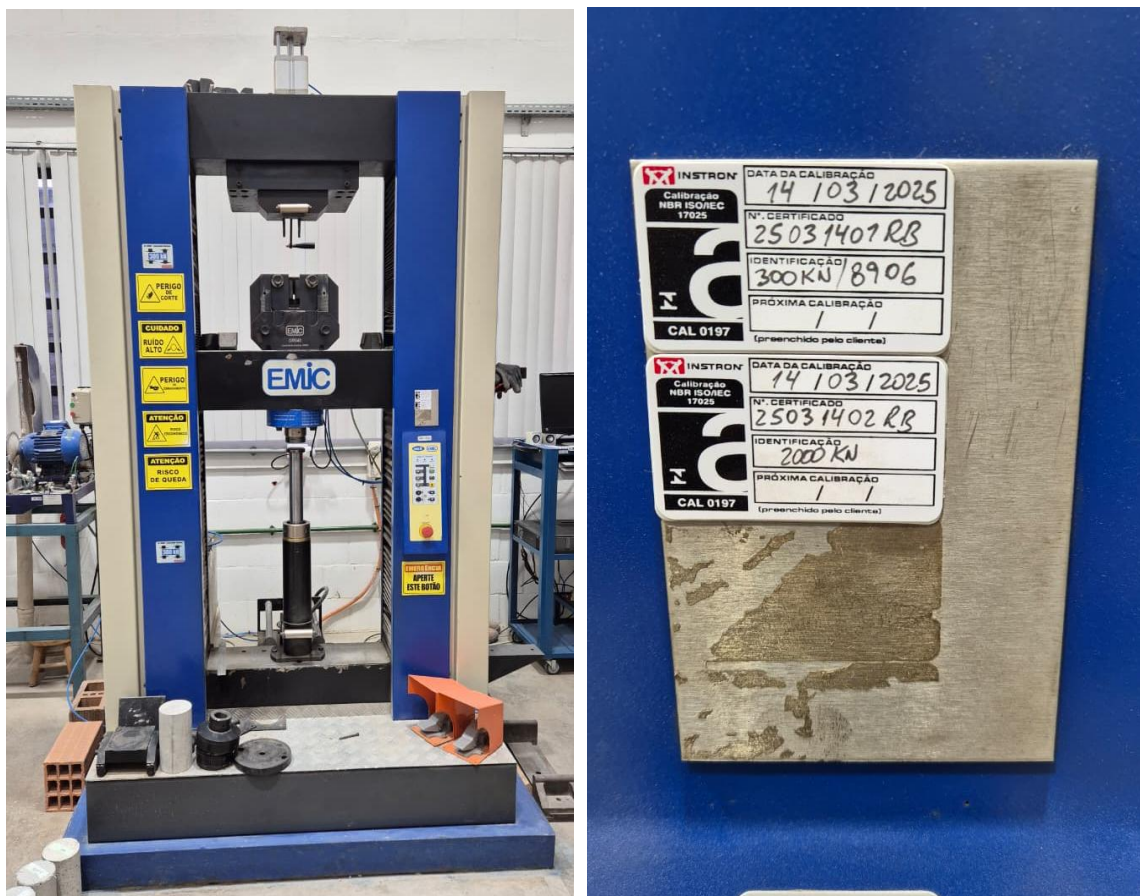
Fonte: Autor, 2025.

6.4 Realização do ensaio

A realização do ensaio ocorreu no Laboratório de Estruturas da Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, sob o qual foram confeccionados os corpos de prova para estudo, preparados e submetidos aos testes de carga. Os ensaios se sucederam no dia 17 de novembro de 2025, 7 dias após a aplicação do compósito de fibra de carbono.

Para a realização dos ensaios foi utilizado uma prensa hidráulica da marca EMIC®, modelo DL-30000 com capacidade de 300kN de tração e compressão. O equipamento possui certificado de calibração segundo a NBR ISO/IEC 17025, cujas certificações são datas do dia 14 de março de 2025, sob os registros 25031401RB e 25031402RB, estando em condições para os ensaios laboratoriais.

Figura 33 e 34 – Prensa de ensaio do Laboratório Unisc com data da calibração



Fonte: Autor, 2025.

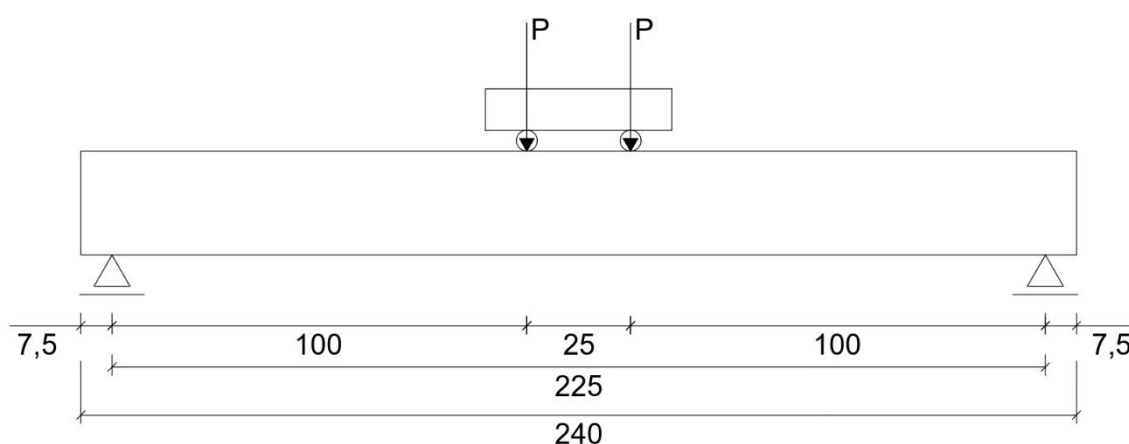
O modelo de ensaio utilizado na aplicação de cargas nas vigas é o Modelo de Ensaio de Stuttgart. Este ensaio consiste no carregamento gradativo em uma viga de seção retangular que está bi apoiada e com o ponto de aplicação de carga concentradas de forma simétricas, conforme o esquema na figura 35.

O posicionamento das vigas na prensa hidráulica se deu com auxílio de um guincho hidráulico do tipo girafa. O eixo central da viga foi posicionado paralelamente ao eixo da prensa, assegurando que a aplicação de carga ocorresse em paridade com a geometria dos corpos de prova. Através da figura 35 pode se verificar as dimensões que foram dispostos os pontos de apoio e os pontos de aplicação de carga. Os apoios inferiores são de aço e foram posicionados a uma distância de 7,5cm das faces externas em direção ao centro da viga, permanecendo um vão central entre os apoios de 225cm. No topo da viga, foi utilizado um perfil metálico do tipo I com 30cm de comprimento, que recebia o carregamento da prensa e distribuía diretamente para os dois pontos de aplicação de carga. Os dois pontos de carga no topo da viga eram

roletes de aço com 10cm de comprimento que estavam posicionados a uma distância de 25cm entre eixos, permanecendo a uma distância de 100cm dos apoios inferiores.

Para uma padronização dos ensaios, todas as vigas foram previamente marcadas com a posição dos eixos de apoio e pontos de carga. Na aplicação de carga foi adicionado um pedaço de Neoprene® entre a superfície do concreto e o rolete. Esse dispositivo ajuda na distribuição uniforme da carga sobre a superfície do concreto.

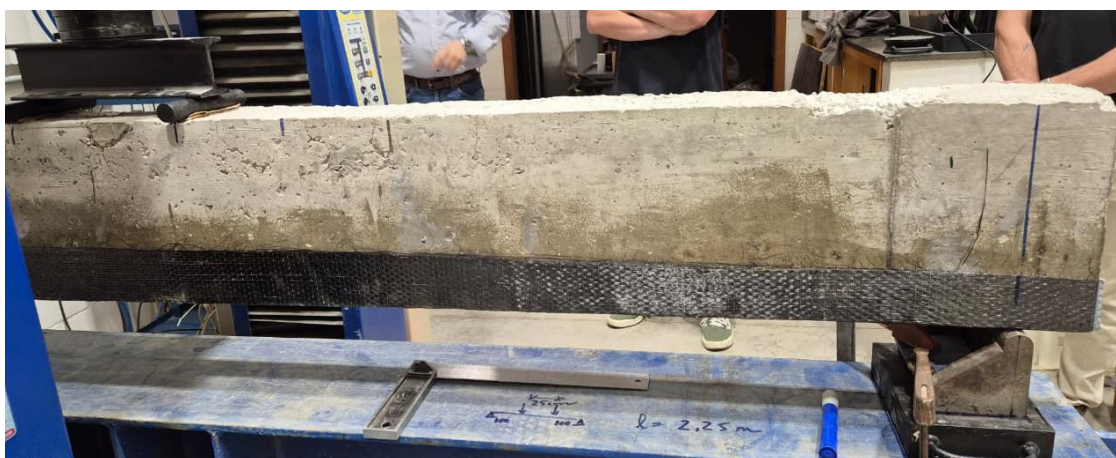
Figura 35 – Representação do Ensaio de Stuttgart



Fonte: Autor, 2025.

O carregamento da viga foi feito através do *software* da prensa EMIC®, onde a taxa de carregamento em relação ao tempo era constante, sendo realizado um acréscimo de 0,99MPa por segundo durante a realização dos ensaios.

Figura 36 – Viga posicionada no apoio para ensaio de carga



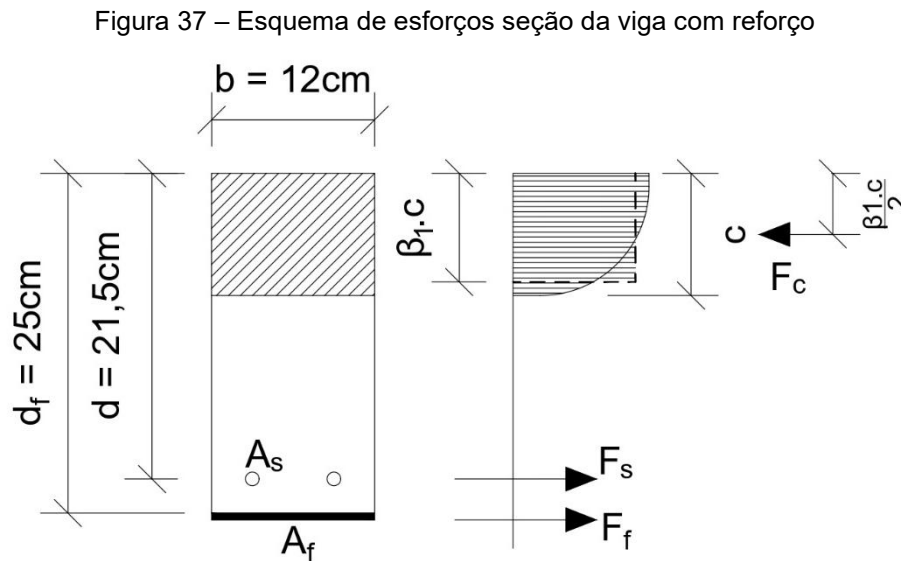
Fonte: Autor, 2025.

6.5 Momento estimado de ruptura para vigas reforçadas

Para o cálculo da resistência do reforço aplicado na viga, aplicamos as características dos materiais utilizados na confecção, como a resistência do concreto, a tensão de escoamento do aço e a tensão de escoamento da manta de fibra de carbono, está que foi fornecida pela fabricante.

Como disposto anteriormente, a resistência média a compressão do concreto é de 34,55MPa para a primeira dosagem que compreende as vigas V1 e V2, e 31,42MPa para a segunda dosagem que compreende as vigas V3 e V4. Utilizamos o valor médio de 32,99MPa. A tensão de escoamento do aço indicou uma média de 582,05MPa.

Para a determinação da resistência do reforço foi analisado os esforços atuantes na seção da viga, como a força de compressão do concreto e as forças de tração da área de aço e do reforço. A figura 37 mostra o esquema das forças atuantes na seção da viga experimental.



Fonte: Autor, 2025.

Determinamos os valores de β_1 , para isso converteremos os valores de compressão e tração do aço que se encontram em MPa para kN/cm².

$$f_c = f_{cm} = 32,99MPa = 3,3kN/cm^2 \quad (49)$$

$$f_y = f_{ym} = 582,06MPa = 58,2kN/cm^2 \quad (50)$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 \cdot (f_c - 27,6)}{6,9} \quad (51)$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 \cdot (32,99 - 27,6)}{6,9} = \beta_1 = 0,81 \quad (52)$$

Para continuidade dos cálculos consideraremos o equilíbrio da seção e desprezaremos a armadura de compressão, armadura positiva.

$$F_c = F_s + F_f \quad (53)$$

$$F_s = A_s \cdot f_y = 2 \cdot 0,785 \text{ cm}^2 \cdot \frac{58,2 \text{ kN}}{\text{cm}^2} = F_s = 91,39 \text{ kN} \quad (54)$$

$$F_f = A_f \cdot f_f = 12 \text{ cm} \cdot 0,0111 \text{ cm} \cdot \frac{340 \text{ kN}}{\text{cm}^2} = F_f = 45,29 \text{ kN} \quad (55)$$

$$F_c = b \cdot \beta_1 \cdot c \cdot f_c = 12 \text{ cm} \cdot 0,81 \cdot c \cdot 3,3 \text{ kN/cm}^2 \quad (56)$$

$$c = 4,26 \text{ cm e } \beta_1 \cdot c = 3,45 \text{ cm}$$

Com os valores da força de compressão e força de tração passamos para o cálculo de momento resistente através da fórmula. O valor de ψ para minoração da resistência será considerado 0,85.

$$M_{rup} = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi \cdot A_f \cdot f_f \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (57)$$

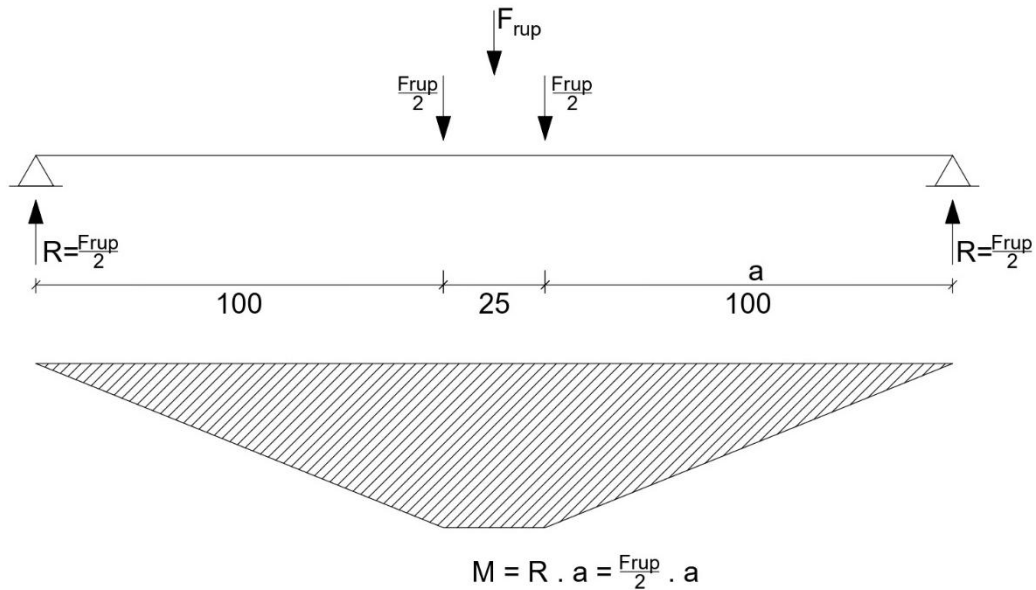
$$M_{rup} = F_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + 0,85 \cdot F_f \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (58)$$

$$M_{rup} = 91,39 \text{ kN} \cdot \left(21,5 \text{ cm} - \frac{3,45 \text{ cm}}{2} \right) + 0,85 \cdot 45,29 \text{ kN} \cdot \left(25 \text{ cm} - \frac{3,45 \text{ cm}}{2} \right) \quad (59)$$

$$M_{rup} = 2703,24 \text{ kN.cm}$$

Com o valor de momento de ruptura, M_{rup} , calculado anteriormente, podemos estimar o momento máximo que será resistido pela viga com o compósito aplicado. A figura 38 apresenta o diagrama de momento que a viga apresenta com os carregamentos.

Figura 38 – Representação do diagrama de momento fletor viga com reforço



Fonte: Autor, 2025.

Assim, podemos chegar até a força pontual que ocasionará a ruptura do sistema composto e da viga através da fórmula a seguir.

$$F_{rup,est} = \frac{M_{rup}}{a} \cdot 2 \quad (60)$$

$$F_{rup,est} = \frac{2703,24kN \cdot cm}{100cm} \cdot 2 = 54,07kN \quad (61)$$

Através dos cálculos apresentados chegamos ao valor de carga máxima pontual de 54,07kN, e momento máximo resistido pela viga com CFC de 2703,24kN.cm.

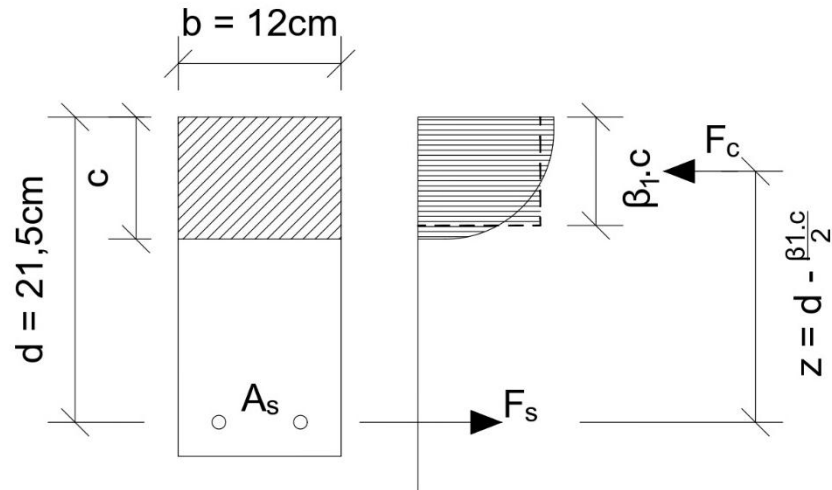
6.6 Momento estimado de ruptura para viga testemunha

Para determinar o valor de resistência da viga testemunha foram realizados os cálculos considerando apenas os esforços resistentes de compressão do concreto situados na face superior e os esforços de tração suportados pelas barras de aço na parte inferior da viga. Para a situação, foi desprezado a resistência de compressão do aço na parte superior da viga.

Abaixo na figura 39, mostra o esquema de esforços na seção da viga sem o reforço. Em seguida, são apresentados os cálculos de determinação do momento máximo suportado e da força máxima de ruptura. Para tal, foi utilizado as

características dos materiais ensaiados no laboratório, a resistência a compressão do concreto e a tensão de escoamento do aço.

Figura 39 – Esquema de esforços seção de viga sem reforço



Fonte: Autor, 2025.

Seguindo para os cálculos, consideramos o equilíbrio entre a solicitação de tração e a de compressão, determinamos os valores de c .

$$F_c = F_s$$

$$0,8 \cdot c \cdot b \cdot f_c = 2 \cdot A_s \cdot f_y \quad (62)$$

$$0,8 \cdot c \cdot 12\text{cm} \cdot 3,3\text{kN/cm}^2 = 2 \cdot 0,785\text{cm}^2 \cdot 58,2\text{kN/cm}^2 \quad (63)$$

$$c = 2,85\text{cm} \text{ e } \beta_1 \cdot c = 2,3\text{cm}$$

Sendo assim passamos para o cálculo de momento resistente onde o valor de z é o braço de alavanca.

$$z = d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \quad (64)$$

$$z = 21,5\text{cm} - \frac{2,3\text{cm}}{2} \quad (65)$$

$$z = 20,345\text{cm}$$

E o momento resistente fica conforme a fórmula seguir.

$$M_{rup} = F_s \cdot z \quad (66)$$

$$M_{rup} = 91,39\text{kN} \cdot 20,345\text{cm} = 1859,33\text{kN.cm}$$

Para encontrar a força de ruptura que irá gerar o momento máximo resistido, calculamos utilizando a posição da carga em relação ao ponto de apoio.

$$F_{rup.rest} = \frac{M_{rup}}{a} \cdot 2 \quad (67)$$

$$F_{rup.rest} = \frac{1859,33\text{kN.cm}}{100\text{cm}} \cdot 2 = 37,19\text{kN}$$

O valor obtido para o cálculo da viga de referência é de 37,19kN, força pontua que irá causar a ruptura, e um momento máximo resistido de 1859,33kN.cm.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

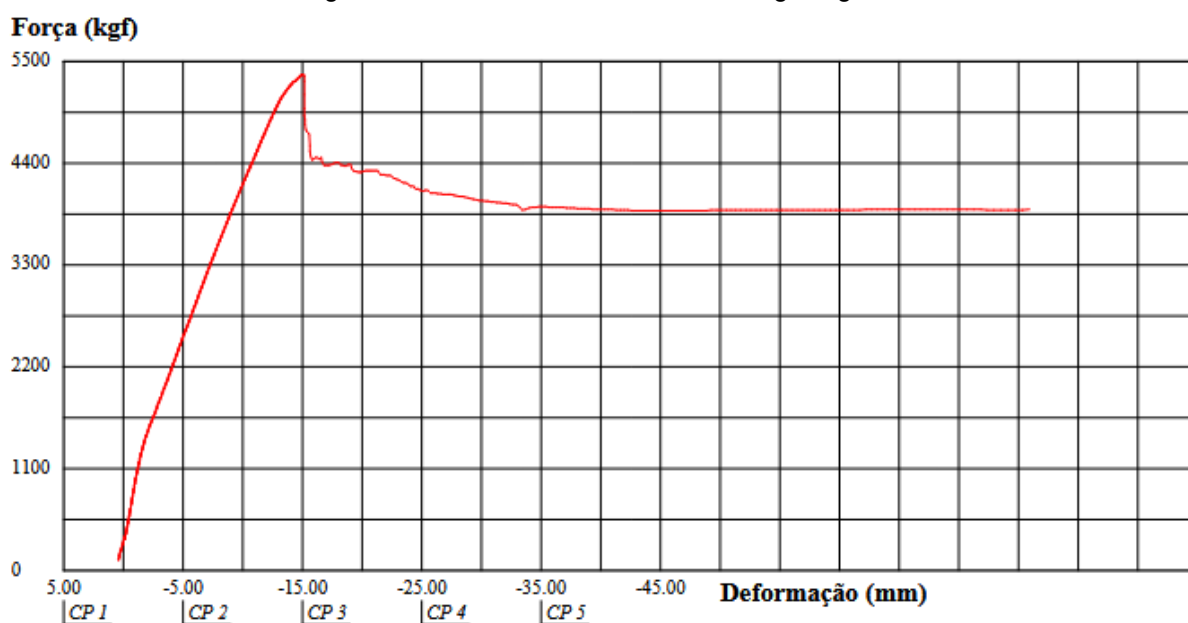
Neste capítulo, serão demonstrados e analisados os resultados obtidos durante o programa experimental realizado conforme o descrito no capítulo 6. Serão apresentados os resultados obtidos em laboratório para o ensaio de flexão nas 4 amostras de viga, sendo 3 com a aplicação do reforço de fibra de carbono e 1 como viga de referência, sem a aplicação do compósito.

7.1 Deslocamentos

Durante o carregamento das vigas foi possível observar que a progressão de carga gerava o aumento gradativo de deslocamentos. O deslocamento máximo foi atingido no instante antes do rompimento do sistema compósito. Os valores de deslocamentos sofridos em relação a carga aplicada, pode ser conferido através dos gráficos plotados pelo *software* da prensa de ensaio.

O primeiro gráfico é apresentado a viga V1, que possui reforço de CFC.

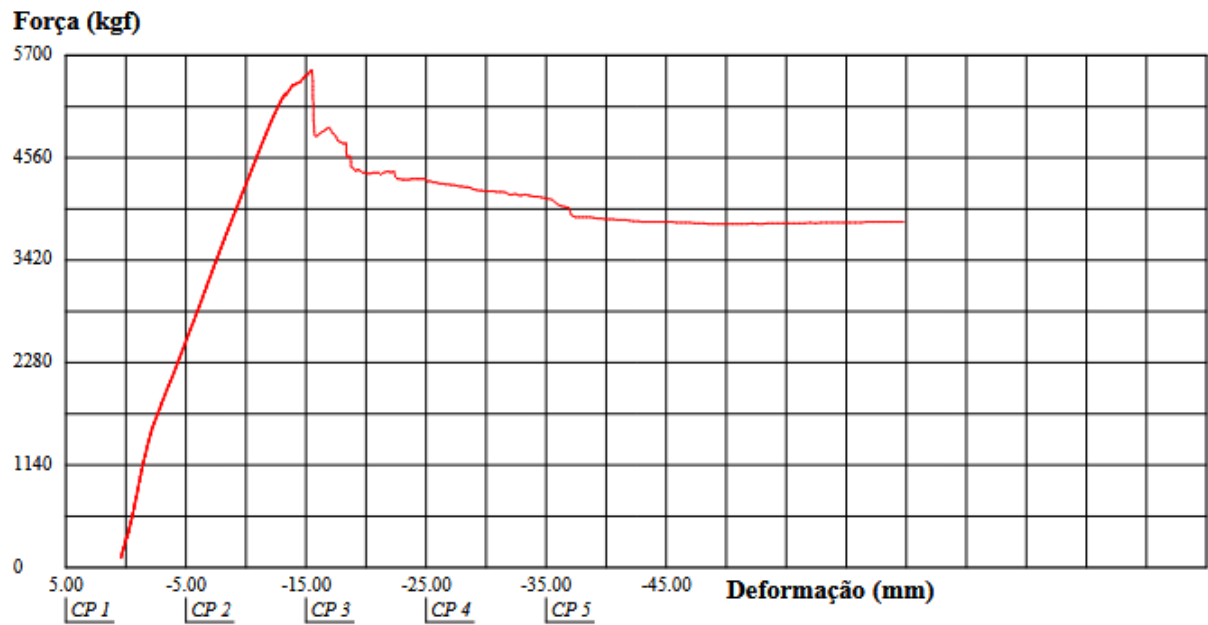
Figura 40 – Gráfico deslocamento X carga, viga V1



Fonte: Autor, 2025.

Em seguida, é trazido o gráfico da viga V2, que também possui o reforço.

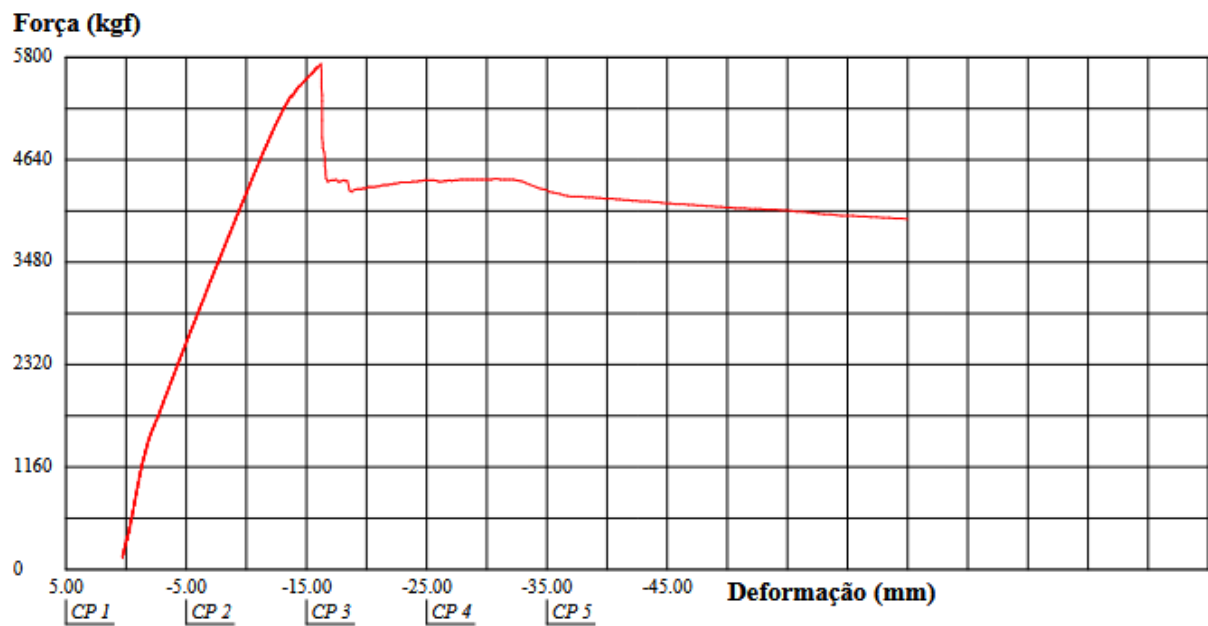
Figura 41 – Gráfico deslocamento X carga, viga V2



Fonte: Autor, 2025.

O próximo é o gráfico da viga V3, que possui reforço de CFC aplicado.

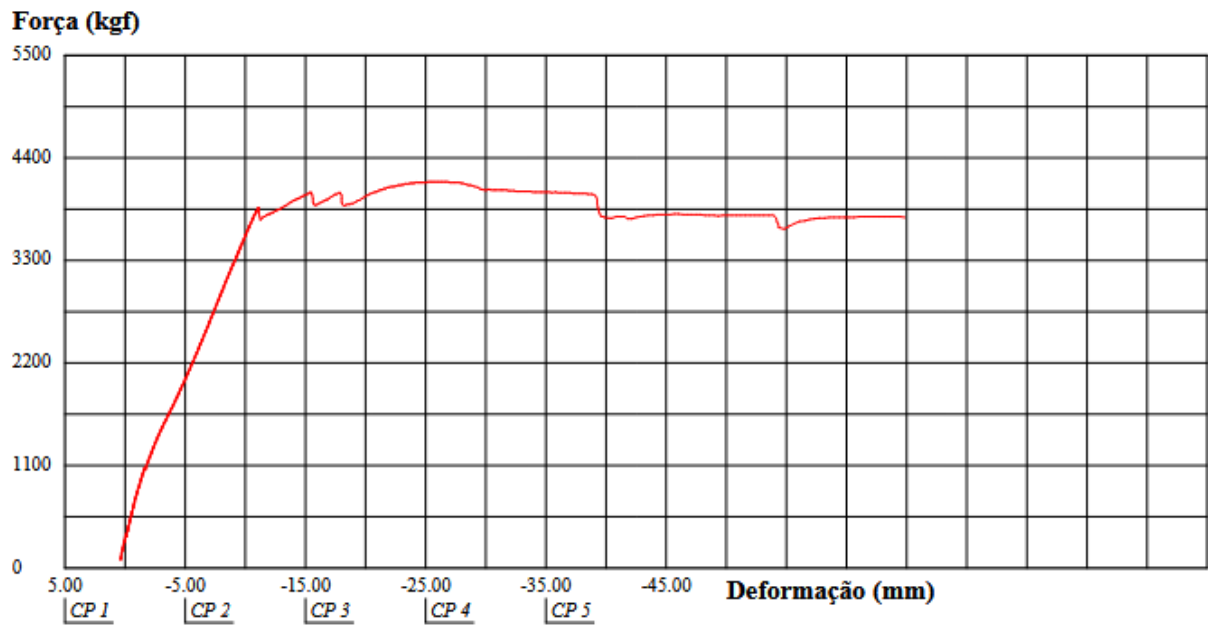
Figura 42 – Gráfico deslocamento X carga, viga V3



Fonte: Autor, 2025.

E por último, o gráfico da viga V4 que não possui reforço de fibra, usada como referência para as demais.

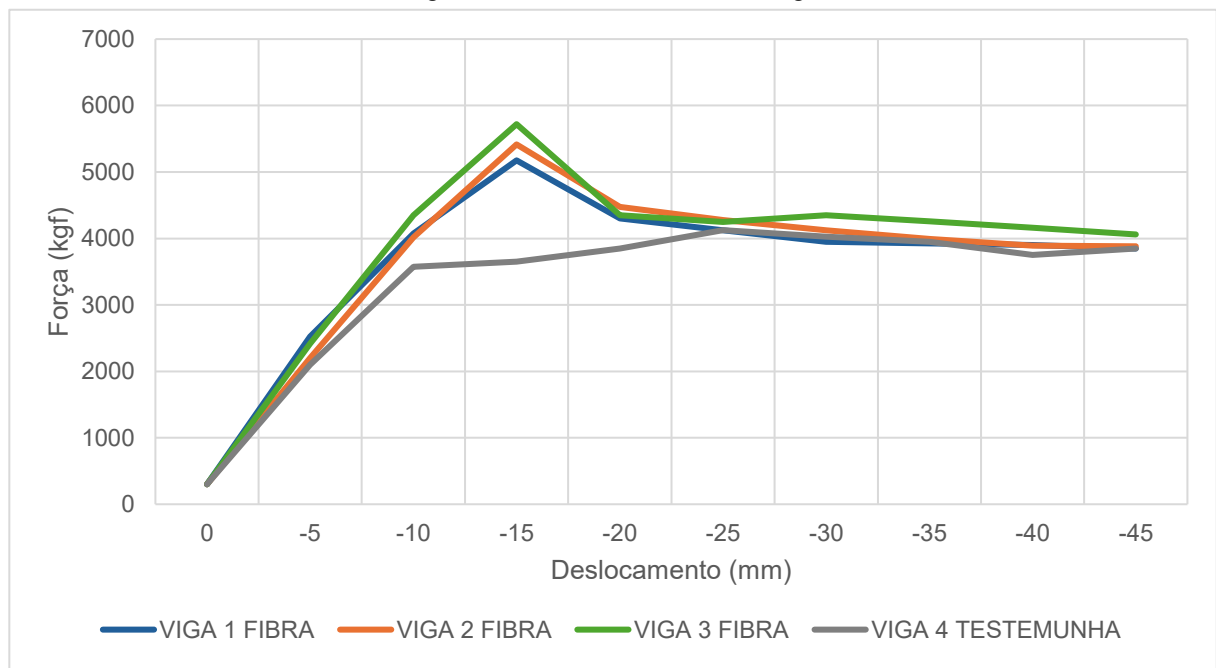
Figura 43 – Gráfico deslocamento X carga, viga V4 testemunha



Fonte: Autor, 2025.

Pode-se observar que as vigas V1, V2 e V3 com reforço apresentaram valores de deslocamentos próximos a 15mm, enquanto a viga testemunha, que não possuía nenhum reforço apresentou valor próximo de 10mm. A figura 44 permite comparar os resultados com a plotagem de um gráfico com os 4 resultados.

Figura 44 – Deslocamento X Carga



Fonte: Autor, 2025.

7.2 Momento máximo e força de ruptura

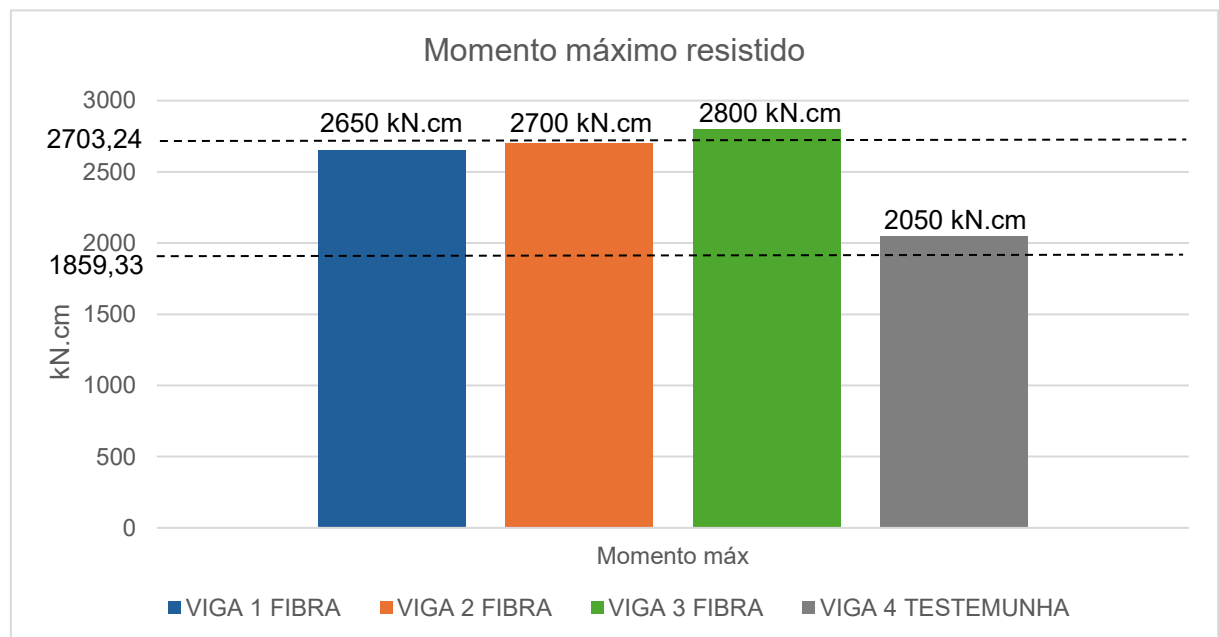
O momento máximo resistido pelas vigas foi obtido através da força de ruptura que cada uma apresentou durante os ensaios. Conforme apresentado abaixo na tabela 9, os valores de ruptura estimados e os valores obtidos. Também pode ser comparado os valores de momento máximo que cada viga suportou com o valor estimado em cálculo.

Tabela 9 – Resultados de força de ruptura e momento máximo

Viga	Força de ruptura		Momento máximo		Variação Experimento x Estimado (%)
	Estimada (kN)	Experimento (kN)	Estimado (kN.cm)	Experimento (kN.cm)	
V1	54,07	53,00	2703,24	2650,00	- 1,96
V2	54,07	54,00	2703,24	2700,00	- 0,12
V3	54,07	56,00	2703,24	2800,00	3,57
V4	37,19	41,00	1859,33	2050,00	10,25
Média vigas reforçadas	54,07	54,33	2703,24	2716,66	1,88

Fonte: Autor, 2025.

Figura 45 – Momento máximo resistido



Fonte: Autor, 2025.

Ao se observar os resultados, pode-se verificar que a viga V1 e V2 apresentaram uma resistência ao momento menor que a estimada em cálculo. Esse

resultado inferior é devido a falha do concreto. O substrato de concreto é solicitado a compressão na face superior da viga, e as duas amostras possuíam pequenas falhas de concretagem na face superior que passaram por reparos antes dos ensaios. A falta de uma limpeza mais profunda pode ter provocado a diminuição da ligação entre o concreto e o material utilizado no reparo.

Através dos cálculos foi estimado uma força de ruptura para as vigas com reforço de CFC de 54,07kN, e momento máximo resistido estimado em 2703,24kN.cm. Com os resultados obtidos nos ensaios, percebe-se que a média de resistência para a força de ruptura e momento máximo resistido ficou 0,50% maior que os valores estimados.

Quando comparados, os valores de resistência estimado da viga sem reforço para as vigas reforçadas com CFC, era esperado um aumento de resistência de 45,39%. Com a realização dos ensaios, os valores obtidos na resistência final demonstraram um ganho de 46,09%, ou seja, 0,7% a mais do que o esperado através dos cálculos de estimativa.

Ao verificar a variação de resistência de momento estimado e momento obtido nos ensaios, tem-se que a viga V1 teve uma variação de 1,96% para menos na resistência, a viga V2 ficou com 0,12% para menos também, enquanto a viga V3 ficou com 3,57% para mais. A média de variação ficou em 1,88%, o que não representa valor significativo para o experimento.

7.3 Ruptura do corpo de prova

Durante o carregamento das vigas com carga foram sendo realizados observações na estrutura dos elementos. Essas inspeções visuais ocorreram para identificar indícios de falhas do sistema como possível delaminação ou deslocamento do compósito. Também buscou-se averiguar as fissuras que estavam se formando devido as deformações que a viga sofria durante a aplicação de carga. Nas figuras a seguir, pode se observar os modos de ruptura que ocorreram nos corpos de prova.

Figura 46 – Viga 1 após ruptura da fibra e do concreto



Fonte: Autor, 2025

A viga V1 e viga V2 apresentaram esmagamento do concreto semelhantes próximos a região de aplicação de carga.

Figura 47 – Viga 2 após ruptura da fibra e do concreto



Fonte: Autor, 2025.

Figura 48 – Viga 2, ruptura com deslocamento do concreto



Fonte: Autor, 2025.

Como mencionado anteriormente, as vigas V1 e V2 obtiveram uma pequena diferença na resistência final em comparação ao estimado. A ruptura no topo da viga demonstra que o concreto esmagou antes da ruptura do compósito.

Figura 49 – Viga 3 após ruptura da fibra e do concreto



Fonte: Autor, 2025.

Figura 50 – Viga 3, ruptura do concreto por esmagamento



Fonte: Autor, 2025.

Figura 51 – Viga 4 testemunha após ruptura do concreto



Fonte: Autor, 2025.

Ao se observar das vigas após o ensaio, é possível perceber que os 4 corpos de prova obtiveram esmagamento do concreto na parte superior da viga, onde se encontra a zona de compressão do elemento. Essa ocorrência revela que parte da resistência estava atrelada ao concreto. Uma vez que se atingiu a capacidade de resistir aos esforços na zona de compressão, a deformação da viga se acentuou, seguindo um aumento dos esforços de tração na face inferior, onde se encontrava o reforço de fibra de carbono.

Também pode ser pontuado que o compósito de fibra de carbono se manteve íntegro durante o carregamento das vigas. Toda a sua face se manteve colada junto ao substrato de concreto, admitindo uma excelente aplicação do compósito. O desprendimento do compósito só ocorreu quando a sua resistência máxima à tração foi atingida, gerando a fragmentação instantânea da fibra de carbono. A figura 48, referente a viga 2, mostra que além do rompimento das fibras de carbono, houve o deslocamento da camada de concreto inferior, que cobria as armaduras positivas. Esse rompimento é característico de quando o compósito apresenta uma resistência superior a do concreto, dessa forma a falha ocorre no substrato.

Em nenhuma das situações ocorreu o escoamento do aço, que é quando se atinge o valor máximo de tensão resistida. Esse modelo de ruptura pode ocorrer, mas o descolamento e rompimento do compósito ocorrem antes.

8 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar de forma experimental o comportamento de vigas de concreto armado, submetidas a flexão e reforçadas com o uso de compósito de fibra de carbono.

Observou-se que durante a modelagem e aplicação do CFC na superfície do concreto, era fundamental seguir os procedimentos de preparo da superfície para garantir uma total e perfeita ancoragem do sistema. A presença de falhas no elemento ocasionou em uma pequena diminuição da resistência final, como visto nas vigas V1 e V2, que possuíam pequenas falhas de concretagem e de recuperação do substrato, mas que não impactaram de forma significativa nos resultados.

O modo de ruptura do compósito se deu através da tração, ao se atingir a força máxima de tração que a fibra de carbono resistia, não ocorrendo nenhum tipo de escoamento do aço existente ou deslocamento da fibra antes de sua ruptura.

O CFC também garantiu um aumento do deslocamento das vigas reforçadas, enquanto a viga de referência teve deslocamento máximo de 10mm, os elementos reforçados atingiam uma média de 15mm de deslocamentos.

Através dos modelos teóricos de cálculo era esperado um ganho de 45,39% na resistência com a aplicação do sistema de CFC, e após os ensaios foi possível perceber que os valores experimentais obtiveram um ganho real de 46,09%. Apesar de duas amostras apresentarem valor abaixo do estimado, essa variação representou uma média de 1,88%, que não se torna significativo para o experimento. Assim, os valores médios para a força de ruptura de 54,07kN e momento máximo de 2703,24kN.cm foram alcançados através dos experimentos, obtendo um ganho de 0,50% a mais, ficando com uma média de 54,33kN para a força de ruptura e 2716,66kN.cm de momento máximo nos experimentos.

Sendo assim, o uso de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC), aplicado em vigas de concreto armado submetidas a flexão, obtiveram um excelente desempenho, aumentando a capacidade de carga e momento resistente. Entretanto, cabe salientar que o reforço foi dimensionado para a solicitação de flexão, outras solicitações exigem análises e cálculos específicos.

8.1 Sugestão de trabalhos

Para trabalhos futuros sugere-se alguns temas que foram observados durante a elaboração do presente trabalho:

- Análises de desempenho em vigas com taxas de reforços diferentes;
- Análise de desempenho ao cisalhamento em vigas submetidas a flexão;
- Análise de vigas com comprimento de vão maior em relação a sua seção transversal;
- Análise de vigas com reforço de CFC em aberturas laterais do elemento.

REFERÊNCIAS

- ACI AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. ACI Committee 440. Detroit, 2017.
- AMARAL, João Mario. **Análise do processo de recomposição em vigas de concreto armado com reforço de fibra de carbono**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2023.
- ARAÚJO, Marcos León. **Estudo Experimental da Aderência entre o Concreto e Barras de Aço, de Compósito de Fibras de Vidro e de Compósito de Fibras de Carbono**. 2017. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto Procedimento para modelagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.
- _____. **NBR ISSO 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de tração Parte 1: Métodos de ensaio em temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2024.
- _____. **NBR 16889: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone**. Rio de Janeiro, 2020.
- BEBER, Andriei Jose. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- CALDER, A. J. J. **Exposure tests on externally reinforced concrete beams – first two years. Supplementary Report 529**. Transport and Road Research Laboratory, Department of the Environment, Department of Transport, Growthorne, Berkshire, UK, 1979.
- CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.
- DE MELO, Pedro Corrêa. **Modelagem de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono em elementos finitos utilizando o software abaqus**. 2024. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.
- DE OLIVEIRA, Felipe Cesario; DO NASCIMENTO, Kaike Manoel Barros; SOARES, Renan Gustavo Pacheco; FERNANDES, Jessyca Priscylla de Almeida Nunes. **Uso do compósito reforçado com fibra de carbono em viga de concreto armado submetida a descontinuidade não prevista: reforço e análise numérica por elementos finitos**. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 19, n. 2, p. 65-79, 2023.
- DE SOUZA, Luiz Otávio Salvador. **Análise do reforço à flexão com fibras de carbono em vigas de concreto armado: abordagem numérica**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2020.

DE SOUZA, Vicente Custodio Moreira; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.

FERRARI, Vladimir José; PADARATZ, Ivo José; LORIGGIO, Daniel Domingues. Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem. **Acta Scientiarum Maringá**, v. 24, n. 6, p. 1783-1791, 2002.

FIGUEIREDO, Tathiana Caram Souza de Paula. **Estudo experimental do reforço à torção de vigas de concreto armado com compósitos de fibras de carbono**. 2014. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2014.

FUGIYAMA, Michele Miwa; FORTI, Nádia Cazarim da Silva; JACINTHO, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila; PIMENTEL, Lia Lorena; DUARTE, Isabela Oliveira; DOS SANTOS, Jakeline Dutra. Estudos numérico-experimentais de vigas de concreto armado com reforço de fibra de carbono. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. e13093, 2022.

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

HOLLAWAY, Len C.; LEEMING, Mike B. **Strengthening of reinforced concrete structures**. Flórida: CRC Press, 1999.

JUVANDES, Luis Felipe Pereira. **Reforço e reabilitação de estruturas**. Universidade de Porto, Departamento de engenharia civil, Departamento de estruturas, módulo 2, 2002. *

MACHADO, Ari de Paula. Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono. **São Paulo: Better**, v. 24, 2010.

MANCINI, Gustavo Oliveira; PEDREIRO, Marcelo Rodrigues De Matos. Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 10, p. 1758-1771, 2023.

MEIER, U.; Kaiser, H. **Strengthening of Structures with CFRP Laminates**. Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, ASCE Specialty Conference, 1991. p. 224-232.

MORAES, Jéssica Bandeira. **Reforço de vigas de concreto armado: comparativo de custos e consumo de material entre uso de chapas de aço e de fibra de carbono**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2017.

REIS, Lília Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SÁNCHEZ FILHO, Emil De Souza; SILVA FILHO, Júlio Jerônimo Holtz; VELASCO, Marta De Souza Lima. Dimensionamento do reforço à torção de vigas retangulares e em caixão de concreto armado com compósitos de fibra de carbono. **Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, v. 6, p. 59-70, 2006.

SILVA FILHO, J. J. H., **Reforço à torção de vigas de concreto armado com compósitos de fibras de carbono**. 2007. Tese de doutorado (Programa de Pós-

graduação em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 2007.

TOMAZ, Roberta Aparecida; SOARES, Flavia Lopes; BARBOSA, Paulo Henrique Maciel. **Reforço Estrutural de Lajes de Concreto Armado com Fibra de Carbono**. 2014. Disponível em: <Recent Developments of Long-Span Bridges in China>. Acesso em: 25 mai. 2025.