



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL



REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO PELA TÉCNICA *NSM-FRP*

DIANA MARIA PEREIRA CAIRES

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques

Maceió/AL

2022

DIANA MARIA PEREIRA CAIRES

REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO PELA TÉCNICA *NSM-FRP*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Maceió/AL

2022

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

C136r Caires, Diana Maria Pereira.
Reforço de vigas de concreto armado pela técnica *NSM-FRP* / Diana Maria Pereira Caires. – 2023.
64 f. : il. color.

Orientador: Severino Pereira Cavalcanti Marques.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil)
– Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 61-64.

1. Concreto armado. 2. Reforço estrutural. 3. Fibra de carbono. 4. Técnica NSM.. I. Título.

CDU: 624.012.45

AGRADECIMENTOS

Gostaria, primeiramente, de agradecer a Deus, sem Ele eu nada seria e, muito menos, teria chegado até aqui.

Agradeço à minha mãe e ao meu padrasto, Socorro e Wandearley, que acompanharam de perto toda a minha trajetória e sempre me incentivaram, me estimularam e me inspiraram a alcançar meus objetivos e a lutar pelos meus sonhos. Agradeço também ao meu irmão Arthur, que torna os meus dias mais leves e alegres, mesmo em meio a tantos dias difíceis.

Agradeço a todo o suporte familiar do meu pai Edbério, meus avós maternos Idelfonso e Maria de Lourdes, meu padrinho Eusébio, minha madrinha Sanandréia e minha tia Dierle que, mesmo de longe, sempre torceram e estiveram à postos para me oferecer uma palavra de conforto e encorajamento. Agradeço também aos meus avós paternos Edgard e Umbelina (*in memoriam*) que, de onde estiverem, sei que intercedem por mim. E, de uma forma geral, a todos os meus familiares que, independente da distância, sempre vibram e torcem pelos meus sonhos e conquistas.

Gostaria de agradecer ao Programa de Educação Tutorial (PET) por todas as oportunidades, crescimento e formação ímpar que me concedeu. Com toda a certeza, fazer parte desse programa foi uma das melhores experiências que tive ao longo dos anos de graduação. Mas, em especial, agradeço ao PET Engenharia Civil, nas pessoas de todos os meus amigos petianos, que sempre foram apoio, incentivo e família ao longo desses anos. Um agradecimento especial à professora Karoline Melo, tutora do grupo, pelo apoio e incentivo incessantes.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos da UFAL, que trilharam esse caminho comigo e que foram a minha rede de apoio tantas vezes. Em especial à Alícia, Fernanda, Rayanne, Mateus e Luis, parceiros dos últimos anos do curso, e também à Kyara e Valéria presentes do início da jornada na engenharia civil, bem como à Ana Elza que, mais que monitora de Desenho I, se tornou uma grande amiga.

Às minhas amigas Maria Eduarda, Marinna, Júlia e Vânia, por serem as melhores amigas desde 2010 e por acreditarem tanto em mim.

Agradeço aos meus professores por todo o empenho, inspiração e conhecimentos compartilhados. Em especial ao professor Eduardo Setton pelo incentivo, lá no começo da graduação, à iniciação científica, bem como pelo acompanhamento atencioso ao longo dos

semestres. Gostaria de agradecer também aos professores João Carlos Barbirato e Flávio Barboza, componentes da banca avaliadora, pelas contribuições neste trabalho.

Em especial, agradeço ao meu orientador, professor Severino Marques, por toda a disposição, compreensão, atenção e comprometimento ao longo da produção deste trabalho. Mas para além, por tanta empatia, cuidado e didática ao compartilhar seus conhecimentos. Com toda certeza é uma inspiração e uma honra para mim ter sido sua aluna e orientanda.

Por fim, meus agradecimentos vão para a Universidade Federal de Alagoas (UFAL), espaço que me proporcionou tantas oportunidades, conhecimento e experiências que, sem dúvidas, são parte do que sou e do que levarei comigo.

RESUMO

CAIRES, D. M. P. **Reforço de vigas de concreto armado pela técnica NSM-FRP**. Trabalho de conclusão de curso de graduação – Engenharia Civil – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2022.

O concreto armado é um dos materiais mais importantes da engenharia estrutural, com presença destacada no setor da Construção Civil em todas as partes do mundo. As estruturas de concreto podem estar sujeitas a diversos fatores que demandem a necessidade de algum tipo de reforço estrutural, como o processo natural de envelhecimento das construções ou a necessidade de modificar a finalidade de utilização da edificação. Existem diversas possibilidades de reforço de peças estruturais e, dentre essas, a aplicação de polímeros com fibras de carbono. Os materiais poliméricos reforçados ou estruturados com fibras de carbono, além da facilidade e da rapidez de sua aplicação como elementos de reforço, apresentam outras características interessantes como elevada resistência mecânica, elevada rigidez, baixo peso específico e imunidade à corrosão que motivam a sua utilização. Além disso, eles são aplicados em lâminas de pequena espessura, modificando de forma sutil as dimensões dos elementos estruturais que serão reforçados. Os *CFRP*, do inglês *Carbon Fiber Reinforced Polymer*, podem ser aplicados como reforço estrutural empregando-se técnicas e materiais distintos, a depender das análises realizadas para cada situação particular. Dentre as técnicas de reforço mais recentes, encontra-se a conhecida na literatura inglesa como *Near Surface Mounted (NSM)*, que é caracterizada pela inserção das fibras no cobrimento de concreto. Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma revisão bibliográfica acerca dos *CFRP* usados como reforço estrutural, discutir os procedimentos da técnica *NSM* e realizar um estudo de caso envolvendo uma viga de concreto armado reforçada à flexão e ao cisalhamento, seguindo as orientações do código ACI 440.2R/2017 e da norma ABNT NBR 6118/2014.

Palavras-chave: Reforço estrutural; Fibras de carbono; Técnica *NSM*.

ABSTRACT

CAIRES, D. M. P. **Reinforcement of reinforced concrete beams by NSM-FRP technique.** Graduation course work– Civil Engineering–Federal University of Alagoas, Maceió. 2022.

Reinforced concrete is one of the most important materials of structural engineering, with a prominent presence in the Civil Construction sector in all parts of the world. Concrete structures may be subject to several factors that require the need for some type of structural reinforcement, such as the natural aging process of buildings or the need to modify the purpose of using the building. There are several possibilities of reinforcement of structural parts and, among these, the application of polymers with carbon fibers. The reinforced or structured polymeric materials with carbon fibers, in addition to the ease and speed of their application as reinforcing elements, have other interesting characteristics such as high mechanical strength, high rigidity, low specific weight and corrosion immunity that motivate their use. In addition, they are applied on small thickness blades, subtly modifying the dimensions of the structural elements that will be reinforced. Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) can be applied as structural reinforcement using different techniques and materials, depending on the analyses performed for each particular situation. Among the most recent reinforcement techniques is the one known in the English literature as Near Surface Mounted (NSM), which is characterized by the insertion of fibers in the concrete covering. This work aims to present a bibliographic review about the CFRP used as structural reinforcement, discuss the procedures of the NSM technique and perform a case study involving a reinforced concrete beam reinforced to bending and shear, following the guidelines of the code ACI 440.2R/2017 and the ABNT NBR 6118/2014 standard.

Keywords: Structural reinforcement; Carbon fibers; NSM technique.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Sistema estrutural	22
Figura 02: Esforços solicitantes e armaduras longitudinais e transversais	23
Figura 03: Trajetórias das tensões de tração e de compressão em uma viga biapoiada	24
Figura 04: Comportamento resistente de uma viga biapoiada	24
Figura 05: Idealização do Modelo de Treliça de Ritter e Morsch	25
Figura 06: Sistema composto estruturado com fibras de carbono	27
Figura 07: Ampliação em microscópio eletrônico de um sistema composto de <i>CFRP</i>	27
Figura 08: Diagrama tensão vs. deformação para matrizes poliméricas	28
Figura 09: Reforço de vigas à flexão e ao corte	31
Figura 10: Corte esquemático do sistema <i>NSM</i>	33
Figura 11: Entalhes no cobrimento de viga e laminados de <i>CFRP</i> inseridos	33
Figura 12: Distribuições de tensões e deformações em uma seção retangular sob flexão no ELU	37
Figura 13: Dimensões mínimas dos entalhes	44
Figura 14: Tipos de envolvimento de uma viga de concreto armado com fibras de carbono	44
Figura 15: Modelo estrutural do pavimento analisado	49
Figura 16: Seção transversal da viga 02 (dimensões em metros)	53
Figura 17: Seção transversal da viga 02 reforçada à flexão (dimensões em metros)	55
Figura 18: Esquema da viga 02 reforçada ao cisalhamento (dimensões em metros)	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Características genéricas das fibras de carbono	29
Tabela 02: Coeficientes de dilatação térmica para um <i>CFRP</i> unidirecional	30
Tabela 03: Roteiro com as etapas do processo executivo da técnica <i>NSM</i>	34
Tabela 04: Fatores de redução ambiental para distintas condições de exposição	38
Tabela 05: Fator de segurança Φ em função da deformação do aço	43
Tabela 06: Fator de redução ψ_f em função da técnica de envolvimento escolhida	46
Tabela 07: Deformação limite da fibra de carbono em função da técnica de envolvimento escolhida	47
Tabela 08: Levantamento de cargas e das armaduras necessárias à flexão para a viga (momento positivo)	50
Tabela 09: Levantamento de cargas e das armaduras necessárias à flexão para a viga (momento negativo)	50
Tabela 10: Levantamento de cargas e das armaduras necessárias ao cisalhamento para a viga 02	50
Tabela 11: Valores de cálculo adotados e novo momento fletor positivo para a viga 02	51
Tabela 12: Dados para o dimensionamento à flexão da viga 02	52
Tabela 13: Valores da linha neutra e do momento de inércia para a viga 02 no Estádio II	53
Tabela 14: Deformação inicial calculada para a viga 02	54
Tabela 15: Dimensionamento à flexão para a viga 02	54
Tabela 16: Dados para o dimensionamento ao cisalhamento da viga 02	56
Tabela 17: Parcelas de reforço ao cisalhamento do concreto, das armaduras e da fibra de carbono	57
Tabela 18: Valores máximos da deformação, tensão e força cortante limites da fibra de carbono	57
Tabela 19: Dimensionamento ao cisalhamento para a viga 02	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>CFRP</i>	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono)
EIS	Esforços Internos Solicitantes
ELU	Estado Limite Último
<i>EBR</i>	<i>External Bonded Reinforcement</i> (Reforço Externo à superfície)
<i>FRP</i>	<i>Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra)
<i>NSM</i>	<i>Near Surface Mounted</i> (Reforço Próximo à superfície)
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f - Área da fibra de carbono para dimensionamento à flexão.

$A_{fe,d}$ - Área de reforço adotada.

$A_{fe,m}$ - Área mínima de reforço.

A_{fv} - Área da fibra de carbono para dimensionamento ao cisalhamento.

A_{s+} - Área da seção transversal da armadura de tração da viga.

A_{s-} - Área da seção transversal da armadura de compressão da viga.

$A_{s,ef}$ - Área efetiva da seção transversal das armaduras de tração da viga.

A_{sw} - Área da seção transversal dos estribos.

a_b - Menor dimensão da lâmina de *CFRP*.

b_b - Maior dimensão da lâmina de *CFRP*.

b - Largura da seção transversal da viga.

c - Posição da linha neutra.

C_E - Fator de redução ambiental.

d - Altura útil da seção transversal da viga.

d' - Distância do topo da viga até o centroide da armadura negativa (estribos).

d_f - Distância do topo da viga até o centroide do reforço.

d_{fv} - Distância entre o centroide da armadura longitudinal até o limite superior da fibra de carbono.

e - Cobrimento de concreto da viga.

E_c - Módulo de elasticidade do concreto.

E_f - Módulo de elasticidade da fibra de carbono.

E_s - Módulo de elasticidade do aço.

F_c - Força de compressão atuante no concreto.

F_f - Força de tração atuante na fibra de carbono.

F_s - Força de tração atuante na armadura de aço.

f'_c - Resistência à compressão do concreto pelo ACI 440.2R/2017.

f_{ck} - Resistência à compressão do concreto pela NBR 6118/2014.

f_{fe} - Tensão efetiva da fibra de carbono.

f_s - Tensão nas armaduras de aço.

f_{fu} - Tensão de tração máxima de projeto da fibra de carbono.

f_{fu}^* - Tensão de tração máxima da fibra de carbono fornecida pelo fabricante.

f_y - Tensão de escoamento do aço.

f_{yk} - Resistência característica à tração do aço.

h - Altura da seção transversal.

I_{II} - Momento de inércia da seção transversal no Estádio II.

k_m - Coeficiente adimensional.

k_v - Coeficiente de redução em função da espessura e número de camadas do reforço.

k_1 - Parâmetro do coeficiente de redução da aderência.

k_2 - Parâmetro do coeficiente de redução da aderência.

L_e - Comprimento ativo de adesão.

M_{d+} - Momento positivo máximo resistente.

M_{d-} - Momento negativo máximo resistente.

M_{g+} - Momento positivo resistente para cargas permanentes.

M_n - Momento resistente à flexão da seção reforçada.

M_u - Momento resistente à flexão de cálculo da seção reforçada.

n - Número de camadas do reforço.

s_f - Espaçamento, eixo a eixo, entre as faixas da fibra de carbono.

$s_{m\acute{a}x}$ - Espaçamento máximo entre as fibras de carbono.

t_f - Espessura do reforço.

V_c - Parcela resistente ao cisalhamento do concreto.

V_f - Parcela resistente ao cisalhamento da fibra de carbono.

$V_{fm\acute{a}x}$ - Força cortante limite da fibra de carbono.

V_n - Força cortante resistente.

V_s - Parcela resistente ao cisalhamento do aço.

$V_{sd,m\acute{a}x}$ - Forças cortante máxima de cálculo.

V_u - Força cortante de cálculo.

w_f - Largura do reforço.

x_{II} - Altura da linha neutra no Estádio II.

α_1 - Parâmetro de uma seção retangular de concreto, definido para que se encontre uma tensão equivalente a partir de uma distribuição não linear de tensões.

β_1 - Parâmetro de uma seção retangular de concreto, definido para que se encontre uma tensão equivalente a partir de uma distribuição não linear de tensões.

ε_b - Deformação total da seção.

ε_{bi} - Deformação pré-existente no substrato de concreto no momento da instalação do reforço.

ε_c - Deformação específica do concreto.

ε'_c - Deformação máxima no concreto não confinado.

ε_{cu} - Deformação axial última do concreto.

ε_{fc} - Deformação específica máxima de tração permissível na fibra de carbono.

ε_{fd} - Deformação limite da fibra de carbono a ser adotada no dimensionamento.

ε_{fe} - Deformação efetiva na fibra de carbono.

ε_{fu} - Deformação máxima de projeto da fibra de carbono.

ε_{fu}^* - Deformação máxima da fibra de carbono fornecida pelo fabricante.

ε_s - Deformação específica de escoamento do aço.

ε_{sy} - Deformação de escoamento do aço.

ε_t - Deformação do aço.

Φ - Fator de redução aplicado à contribuição do *CFRP* em função de sua recente existência.

Ψ_f - Fator de redução para a parcela de contribuição do reforço com *CFRP*.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações iniciais	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Geral	17
1.2.2 Específicos	18
1.3 Metodologia	18
1.4 Justificativa	18
1.5 Estrutura do trabalho	19
2 CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO ARMADO, VIGAS E COMPÓSITOS	21
2.1 Concreto Armado	21
2.2 Considerações sobre o comportamento e dimensionamento de vigas	22
2.2.1 Sistema estrutural	22
2.2.2 Esforços e armaduras de flexão e de cisalhamento	23
2.3 Compósitos	26
2.3.1 Características e propriedades dos <i>CFRP</i>	26
2.3.2 Matriz polimérica	28
2.3.3 Fibras de carbono	29
2.3.4 Aplicação dos sistemas compostos de reforço	30
2.4 Técnica NSM	31
2.4.1 Processo executivo	32
2.4.2 Vantagens	34
3 PROCEDIMENTOS PARA DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO	36
3.1 Dimensionamento à flexão	37
3.2 Dimensionamento ao cisalhamento	44
4 ESTUDO DE CASO	49
4.1 Reforço da viga à flexão	51
4.2 Reforço da viga ao cisalhamento	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O concreto armado é um dos materiais mais importantes da engenharia estrutural, com presença marcante no setor da Construção Civil em todas as partes do mundo. Tradicionalmente, o concreto armado é um produto resultante da associação estratégica do concreto com armaduras de aço. O uso dessa associação com fins estruturais se justifica pelo fato de que o concreto convencional, apesar de apresentar boa resistência e razoável ductilidade à compressão, exhibe fragilidade e baixa resistência à tração. Considerando que o aço é um material dúctil e com alta resistência à tração, uma apropriada associação dele com o concreto tem como resultado o concreto armado, o qual se distingue como um produto extremamente útil para o setor da construção civil (NETO et al., 2021).

As estruturas de concreto podem estar sujeitas a diversos fatores que demandem a necessidade de algum tipo de reforço estrutural. Dentre esses fatores, de acordo com Moraes et al. (2021), podem ser citados o processo natural de envelhecimento das construções, a baixa qualidade dos materiais empregados, o uso inapropriado da edificação, erros executivos ou de projeto, a incidência de incêndios, bem como a falta e/ou ausência de manutenção preventiva. Também pode ocorrer a modificação da finalidade da utilização da construção, impondo maiores solicitações do que na situação inicial ou, até mesmo, atualizações da norma vigente, passando a demandar critérios de dimensionamento mais rigorosos. Nesse sentido, torna-se fundamental a execução de um reforço estrutural que restabeleça o desempenho das estruturas de concreto armado já existentes.

A escolha do tipo de reforço de estruturas decorre, dentre outros fatores, da disponibilidade dos materiais, da presença de mão de obra especializada e de equipamentos adequados, além da viabilidade econômica e da agressividade do meio ambiente, sendo necessária uma análise cuidadosa das causas por trás da necessidade de intervenção, bem como dos danos causados à peça estrutural em questão (ARAÚJO et al., 2017; DE MELO et al., 2018). Segundo Neto et al., (2021), existem diversas possibilidades de reforço de peças estruturais, como o aumento da seção transversal, o acréscimo de armaduras longitudinais e/ou transversais, a aplicação de chapas e perfis metálicos, o encamisamento com concreto de alto desempenho e, também, a aplicação de polímeros com fibras de carbono.

Os materiais reforçados ou estruturados com fibras de carbono, comumente conhecidos na literatura internacional como *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, além

da facilidade e da rapidez de sua aplicação, apresentam outras características interessantes como a elevada resistência mecânica, elevada rigidez, baixo peso específico e alta resistência à corrosão que motivam a sua utilização. Além disso, os *CFRP* são aplicados em lâminas de pequena espessura, modificando de forma sutil as dimensões dos elementos estruturais que serão reforçados (CHASTRE, 2014; DE MELO et al., 2018). Os reforços com *CFRP* podem ser executados usando técnicas e materiais distintos, a depender das análises realizadas para cada situação particular. Dentre as técnicas mais conhecidas, têm-se aquela na qual o reforço estrutural com lâminas ou manta de *CFRP* é colado na superfície externa do elemento, denominada como *External Bonded Reinforcement (EBR)*, e a técnica *Near Surface Mounted (NSM)*, mais recente e caracterizada pela inserção das fibras no cobrimento de concreto (ARAÚJO et al., 2017).

A técnica *EBR* é muito utilizada e, apesar de bastante eficiente, pode apresentar problemas devido ao desprendimento do reforço antes mesmo de atingir o aproveitamento máximo do material. A falha pode surgir entre o reforço e a resina de colagem, entre a resina e o cobrimento de concreto ou pode ocorrer o destacamento do cobrimento de concreto. Além disso, de acordo com Arquez (2010) e Schneider et al. (2016), outro inconveniente dessa técnica é a suscetibilidade do reforço a atos de vandalismo e agentes agressivos, além de necessitar de proteção contra incêndios.

Nesse sentido, dentre outras vantagens, a técnica *NSM* apresenta um melhor desempenho do reforço devido à dupla área de aderência entre o laminado e o concreto, diminuindo as tensões de tração e de cisalhamento no concreto situado na região de ancoragem, fazendo com que haja aproveitamento total do reforço empregado (ARQUEZ, 2010). Além disso, como o material de reforço encontra-se entalhado na região de cobrimento do concreto, os agentes agressivos, fogo e atos de vandalismo não se configuram mais como um problema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma revisão bibliográfica acerca dos *CFRP* usados como reforço estrutural, discutir os procedimentos da técnica *NSM* e realizar um estudo de caso envolvendo uma viga de concreto armado reforçada à flexão e ao

cisalhamento, seguindo as orientações do código ACI 440.2R/2017 e da norma ABNT NBR 6118/2014.

1.2.2 Específicos

Os objetivos específicos consistem em:

- Demonstrar as vantagens da técnica *NSM*;
- Realizar um estudo de caso de viga com reforço à flexão e ao cisalhamento.

1.3 Metodologia

O presente trabalho teve início com um levantamento bibliográfico sobre a utilização de compósitos de fibra de carbono no reforço de elementos estruturais, em especial, de vigas, incluindo artigos, monografias, dissertações e teses.

Em seguida, os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de reforço de vigas, baseados no código ACI 440.2R/2017, são descritos e, posteriormente, aplicados em um estudo de caso, com o auxílio do *software* “Microsoft Excel”. O estudo de caso consiste no dimensionamento do reforço estrutural com fibras de carbono de uma das vigas de um pavimento de um edifício que terá a sua finalidade de utilização modificada.

1.4 Justificativa

Conforme Balaguru et al. (2009), o uso dos compósitos de fibra de carbono teve seu início em meados da década de 80, a partir da qual os primeiros estudos na área, que buscavam demonstrar a eficiência desse material para uso na execução de reforços estruturais, começaram a surgir. Esses materiais eram, inicialmente, utilizados nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, de defesa e, ao longo dos anos, também têm respondido bem a novos desafios propostos por áreas como a indústria naval e automotiva (CHASTRE, 2014).

Ainda segundo Chastre (2014), no que diz respeito à engenharia civil, a sua utilização é relativamente recente, mas tem se revelado um tanto quanto interessante no reforço e reparação de estruturas de concreto armado, de madeira ou até mesmo de alvenaria. O alto custo de produção, somada à carência de pesquisas na área, desencadeou o atraso na inserção desses materiais no mercado da construção civil. Entretanto, com o barateamento das matérias-primas e dos custos industriais de manufatura, os compósitos de fibra de carbono

ficaram cada vez mais conhecidos e competitivos, desencadeando uma nova linha de pesquisa e, conseqüentemente, uma maior utilização pelos profissionais da área, que ficaram mais confiantes em utilizar o novo recurso (ARQUEZ, 2010).

Alguns países, como o Canadá, os Estados Unidos e o próprio Japão, já criaram normas específicas para elaboração de projetos utilizando as fibras de carbono. No Brasil, apesar do uso desses materiais estar cada vez mais difundido, a demora na elaboração de documentos próprios que regulamentem a sua utilização faz com que os profissionais da área ainda utilizem essas normas estrangeiras (ARQUEZ, 2010; WIERZBICKI, 2021). Sendo assim, é importante a análise e o estudo desses materiais, em especial no contexto da construção civil, para que se avance na tecnologia com técnicas cada vez mais simples e eficientes que possam reabilitar as estruturas que tiveram as suas funcionalidades comprometidas (SOUZA e RIPPER, 2009).

Dentre as técnicas de reforço estrutural com fibras de carbono existentes, a técnica *NSM*, que consiste na inserção de lâminas ou barras de polímeros reforçados com fibras no cobrimento do concreto, é pouco conhecida e estudada no Brasil, apesar das suas vantagens, em dados aspectos, quando comparadas à outras técnicas mais tradicionais. Dessa forma, em razão do caráter recente das pesquisas sobre essa temática, bem como da pouca difusão do uso desses materiais e da técnica em questão, o mercado necessita de novos estudos e aplicações na área, da mesma forma que precisa de profissionais capacitados no assunto.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) encontra-se organizado em 5 capítulos. O primeiro deles trata-se da introdução, inserindo as considerações iniciais com o conteúdo a ser estudado e trabalhado, bem como os objetivos, metodologia, justificativa e estrutura do trabalho, que são apresentados de forma a possibilitar uma melhor compreensão do que será tratado ao longo deste estudo, bem como a sua relevância.

O segundo capítulo trata-se de uma revisão bibliográfica acerca das características e propriedades mecânicas do concreto armado, das considerações sobre o comportamento e dimensionamento de vigas e das características e propriedades dos compósitos de fibra de carbono, além de dissertar sobre a técnica *NSM*.

O terceiro capítulo demonstra o procedimento de cálculo para o dimensionamento do reforço com compósitos de fibra de carbono de vigas à flexão e ao cisalhamento, com base nas orientações do código ACI 440.2R/2017.

A fim de apresentar um exemplo numérico e elucidar as etapas abordadas no capítulo anterior, o quarto capítulo traz um estudo de caso de dimensionamento de uma viga de concreto armado reforçada com fibras de carbono.

O quinto capítulo consiste nas considerações finais, bem como em sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, as referências bibliográficas utilizadas são apresentadas.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO ARMADO, VIGAS E COMPÓSITOS

2.1 Concreto Armado

Historicamente, de acordo com Andrade (2016) e Carvalho e Filho (2014), os primeiros elementos construídos em concreto reforçado com ferro datam da metade do século XIX e tiveram início na França. Em meados do ano 1800, o francês Lambot construiu um pequeno barco em concreto armado, apresentado oficialmente em Paris no ano de 1855. Mas foi a partir de 1861 que Joseph Monier fez o primeiro uso prático do concreto armado, fabricando reservatórios e até mesmo uma ponte de 16,5 m de vão.

Dentre as principais vantagens do uso do concreto armado como material estrutural estão a boa resistência a maioria das solicitações, a boa trabalhabilidade, a facilidade de moldagem, permitindo grande variabilidade de formas e de concepções arquitetônicas. Ele também possibilita a construção de estruturas monolíticas, fazendo com que todo o conjunto se comporte de forma integrada, além de possuir técnicas executivas bastante difundidas, sem exigir profissionais com níveis de qualificação muito altos. Ademais, apresenta uma boa durabilidade e resistência ao fogo (ANDRADE, 2016; CARVALHO e FILHO, 2014).

O concreto armado trata-se da associação do aço, normalmente no formato de barras, ao concreto convencional e é projetado considerando-se que os dois materiais atuam em conjunto na resistência aos esforços solicitantes, uma vez que o concreto convencional, apesar de apresentar boa resistência à compressão, demonstra uma baixa resistência à tração, cerca de dez vezes menor, enquanto que a principal característica do aço é, justamente, a alta resistência à tração (NETO et al., 2021; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

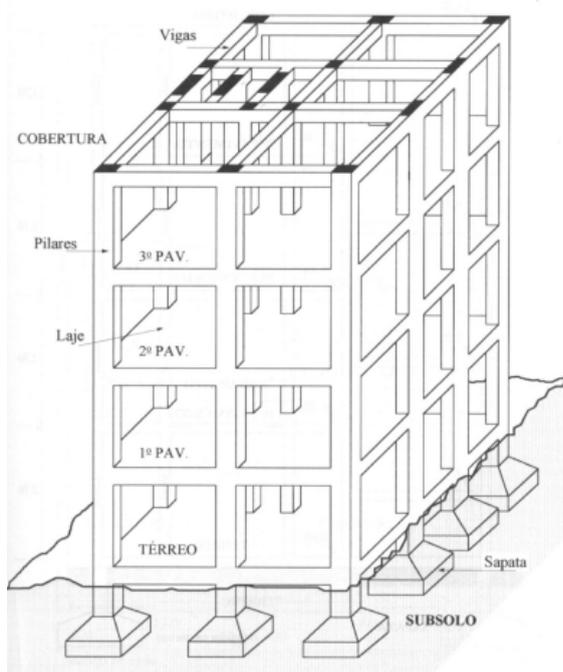
O bom desempenho mecânico do concreto armado é possível em virtude da boa aderência entre as superfícies dos dois materiais (concreto e aço), permitindo a transferência de esforços entre eles. Ademais, a proximidade entre os coeficientes de dilatação térmica do aço e do concreto ($\alpha_{conc} = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $\alpha_{aço} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), bem como o fato do concreto proteger o aço contra as ações dos agentes agressivos garantem o bom funcionamento do conjunto (CARVALHO e FILHO, 2014).

2.2 Considerações sobre o comportamento e dimensionamento de vigas

2.2.1 Sistema estrutural

Na Figura 01 mostra-se um sistema estrutural convencional de concreto armado constituído por lajes, vigas, pilares e fundações. Nesse sistema, o mecanismo de transferência de cargas se manifesta de acordo com a sequência de elementos estruturais: lajes – vigas – pilares – fundações – solo (SOUZA, 2018). Todos os elementos que compõem esse sistema são fundamentais para o seu equilíbrio e devem funcionar adequadamente e de acordo com as condições previstas no projeto. Essas condições de projeto impõem que o conjunto estrutural, ou suas partes, não devem atingir um Estado Limite Último (ELU) em situação normal de utilização, nem deixar de atender aos requisitos relacionados aos Estados Limites de Serviço (ELS).

Figura 01: Sistema estrutural



Fonte: Botelho e Marchetti (2002) *apud* Martha (2004)

Nesse contexto, as vigas sendo parte do sistema estrutural devem ser projetadas para resistirem aos esforços provenientes das lajes e de outros elementos da construção, sem comprometimento dos requisitos de segurança e de bom desempenho em relação à deformação, fissuração e durabilidade.

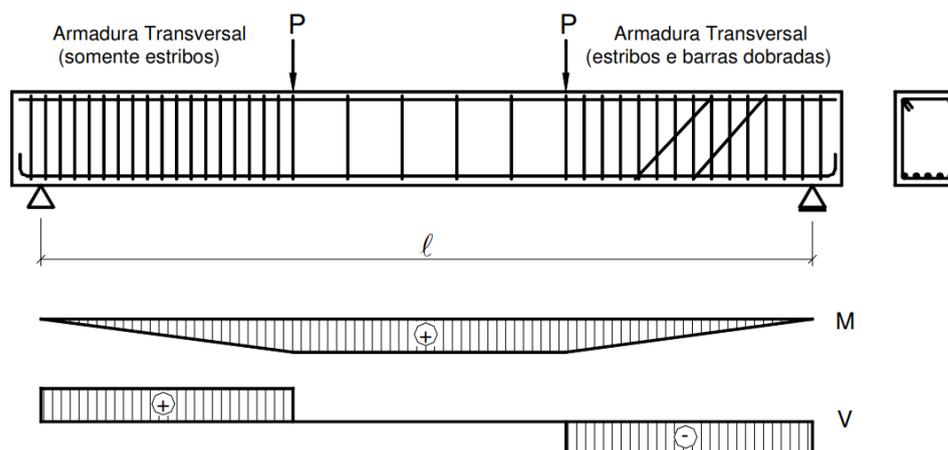
2.2.2 Esforços e armaduras de flexão e de cisalhamento

De acordo com a NBR 6118/2014 da ABNT, as vigas são elementos lineares nos quais a flexão é preponderante. As seções transversais das vigas estão submetidas, predominantemente, a momentos fletores e forças cortantes.

O dimensionamento das vigas de concreto armado envolve as armaduras longitudinais de flexão, obtidas em função dos momentos fletores, e as armaduras transversais de cisalhamento, que levam em conta a presença das forças cortantes.

De acordo com Pinheiro et al. (2016), considerando que as vigas de concreto armado estão submetidas, simultaneamente, a momentos fletores e a forças cortantes, o dimensionamento no ELU envolve dois tipos de armaduras. As armaduras longitudinais de flexão são projetadas e dimensionadas para resistirem aos esforços de tração provenientes da flexão, enquanto as armaduras transversais de cisalhamento, constituídas usualmente por estribos verticais, são dimensionadas para resistirem aos esforços cortantes. Na Figura 02 são apresentados os diagramas de momentos fletores (M) e de forças cortantes (V) e as correspondentes armaduras de uma viga de concreto armado.

Figura 02: Esforços solicitantes e armaduras longitudinais e transversais



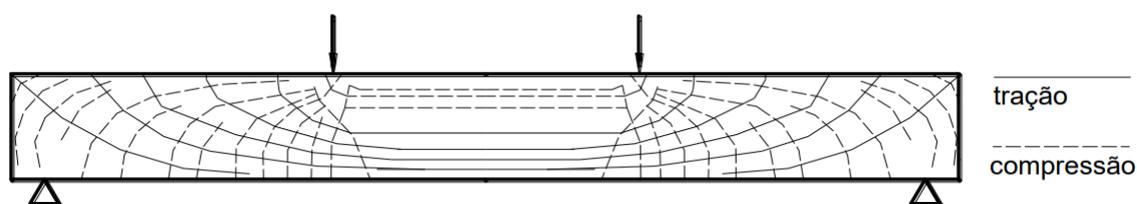
Fonte: Leonhardt e Monnig (1982)

Na Figura 03 são apresentadas as trajetórias das tensões principais de tração e de compressão de uma viga ainda no Estádio I, ou seja, antes da fissuração. É possível perceber que no trecho de flexão pura as trajetórias das tensões principais de compressão e de tração

seguem paralelas ao eixo longitudinal da viga, enquanto que nos demais trechos, devido à influência dos esforços cortantes, as trajetórias das tensões principais se tornam inclinadas (BASTOS, 2020).

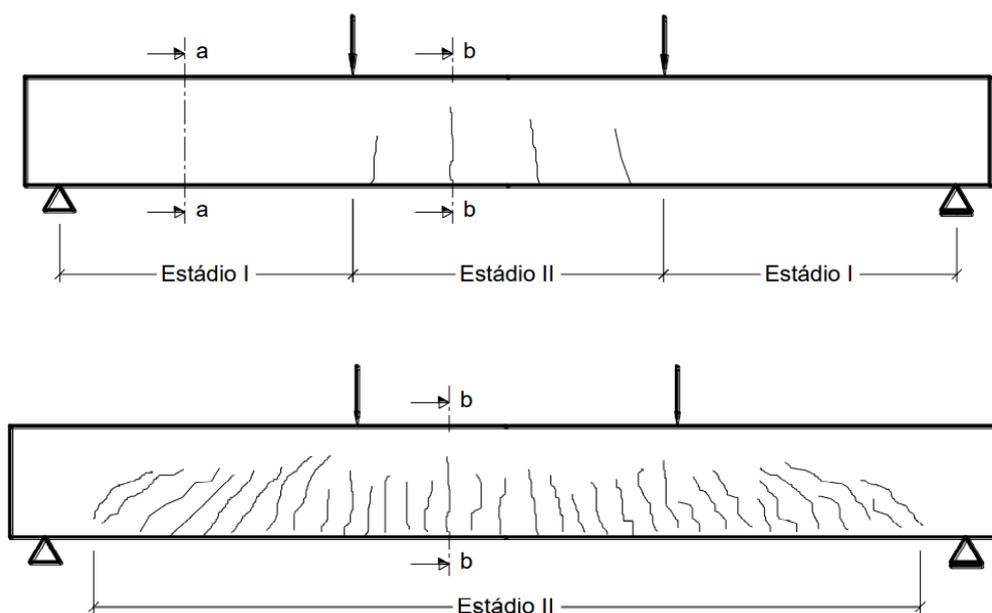
Enquanto a resistência à tração do concreto é superior às tensões principais de tração, não surgem fissuras na viga. As primeiras fissuras de flexão surgem na região de máximos momentos fletores, no instante em que as tensões de tração atuantes superam a resistência do concreto à tração na flexão, como pode ser visto na Figura 04. Nesse momento a viga apresenta trechos fissurados, no Estádio II, e trechos não fissurados, no Estádio I. Por essa razão a inserção de armaduras de flexão se torna importante, uma vez que fica a cargo do aço absorver as tensões de tração decorrentes da flexão, não mais suportadas pelo concreto (BASTOS, 2020).

Figura 03: Trajetórias das tensões de tração e de compressão em uma viga biapoada



Fonte: Leonhardt e Monnig (1982)

Figura 04: Comportamento resistente de uma viga biapoada

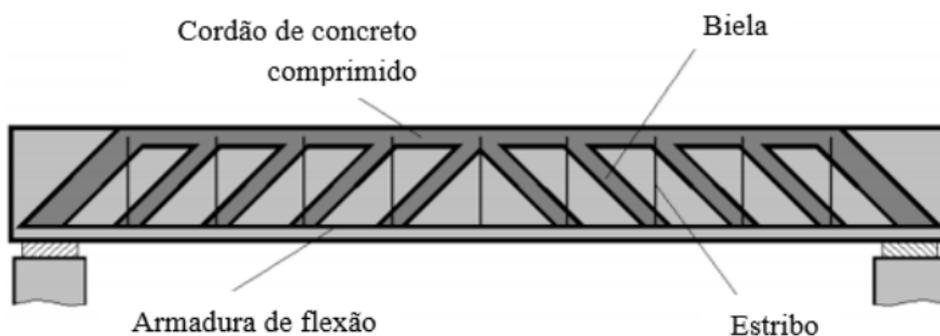


Fonte: Leonhardt e Monnig (1982)

Segundo Schultz (2021) e Bastos (2015), após o surgimento de fissuras inclinadas, decorrentes da combinação de força cortante, momento fletor e, ocasionalmente, forças axiais, a ruptura por cisalhamento tem início, sendo influenciada por muitas variáveis, como as dimensões da viga, a geometria, características do carregamento, resistência do concreto, entre outros.

O método tradicional utilizado para se dimensionar as armaduras de cisalhamento é baseado no consagrado modelo de treliça de Ritter - Morsch. Idealizado por Morsch no início do século XX, o modelo clássico de treliça fundamenta-se na analogia entre uma viga fissurada e uma treliça (PINHEIRO et al., 2016). Nesse modelo, admite-se que uma viga de concreto armado fissurada tem um comportamento análogo ao de uma treliça, composta pelos seguintes elementos: um banzo superior, correspondente ao cordão de concreto comprimido, um banzo inferior representando a armadura longitudinal de tração, diagonais comprimidas, correspondentes às bielas de concreto entre as fissuras, e diagonais tracionadas que representam as armaduras de cisalhamento (SCHULTZ, 2021). Na Figura 05 apresenta-se uma ilustração da analogia acima mencionada.

Figura 05: Idealização do Modelo de Treliça de Ritter e Morsch



Fonte: Pinheiro et al. (2016)

No modelo clássico de treliça, consideram-se as seguintes hipóteses básicas (PINHEIRO et al., 2016):

- Fissuras e bielas de compressão com inclinação de 45° ;
- Banzos paralelos;
- Treliça isostática, ou seja, não há engastamento nos nós;
- Armadura de cisalhamento com inclinação entre 45° e 90° , geralmente 90° .

A norma NBR 6118/2014 apresenta dois modelos para o dimensionamento de vigas ao cisalhamento. O primeiro deles é baseado na treliça clássica, ou seja, assume que as bielas de compressão têm inclinação de 45° , enquanto que o segundo modelo utiliza como base a ideia da treliça generalizada, na qual as referidas bielas podem assumir uma inclinação entre 30° e 45° .

2.3 Compósitos

Dentre os vários tipos de compósitos, relacionados a engenharia estrutural, os polímeros reforçados com fibras, conhecidos na literatura internacional como *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* têm se destacado cada vez mais. Os *FRP* surgem como opção para o reforço de elementos estruturais em substituição aos materiais que são tradicionalmente utilizados para esse fim. Beber (2003) e De Melo et al. (2018) afirmam que, no que diz respeito a engenharia civil, as principais fibras utilizadas são as de vidro, aramida e carbono, enquanto as matrizes poliméricas mais empregadas são as resinas poliéster, epóxi, fenólica e éster vinílica.

Em comparação com as fibras de vidro e aramida, as fibras de carbono apresentam uma maior resistência à tração, além de possuírem um maior módulo de elasticidade que, por sua vez, proporciona uma boa rigidez ao sistema de reforço estrutural. Araújo (2014) afirma que outra característica importante dos compósitos em questão é o bom comportamento à fadiga.

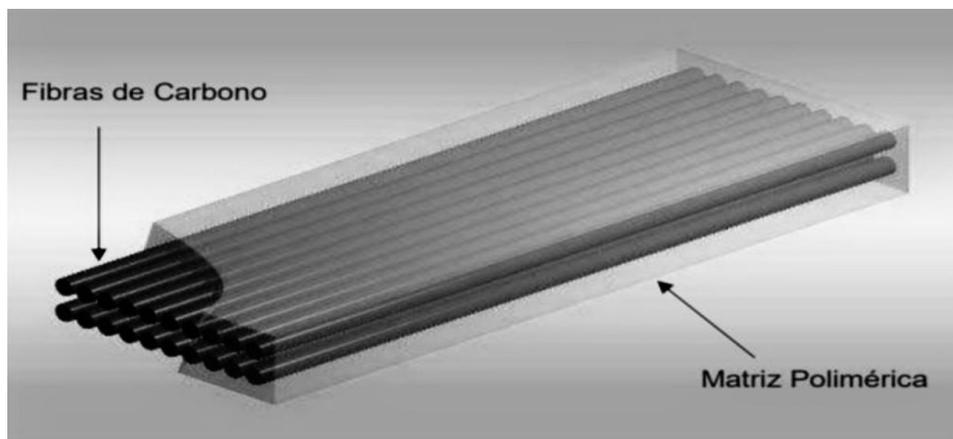
Sendo assim, de acordo com Souza e Ferrari (2012), os *CFRP* são opções bastante interessantes para o reforço de estruturas de concreto, uma vez que apresentam alto desempenho mecânico proporcionado pelas fibras de carbono.

2.3.1 Características e propriedades dos *CFRP*

Os materiais compósitos ou polímeros reforçados com fibras tem a sua estrutura constituída por uma combinação de duas ou mais fases não solúveis entre si. Uma delas é designada como reforço (fibras), que absorve as tensões de tração provenientes dos esforços solicitantes, e a outra como matriz polimérica, que envolve as fibras e as mantém coesas, permitindo a transferência das tensões de tração entre o concreto e as fibras (BEBER, 2003; DE MELO et al., 2018; MACHADO, 2002).

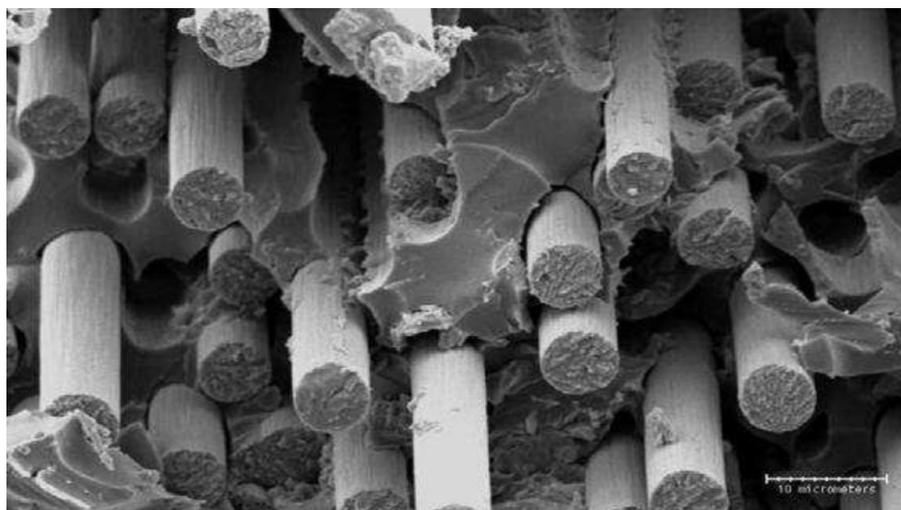
As Figuras 06 e 07 mostram detalhes de um sistema composto reforçado por fibras de carbono.

Figura 06: Sistema composto estruturado com fibras de carbono



Fonte: Machado (2002)

Figura 07: Ampliação em microscópio eletrônico de um sistema composto de CFRP

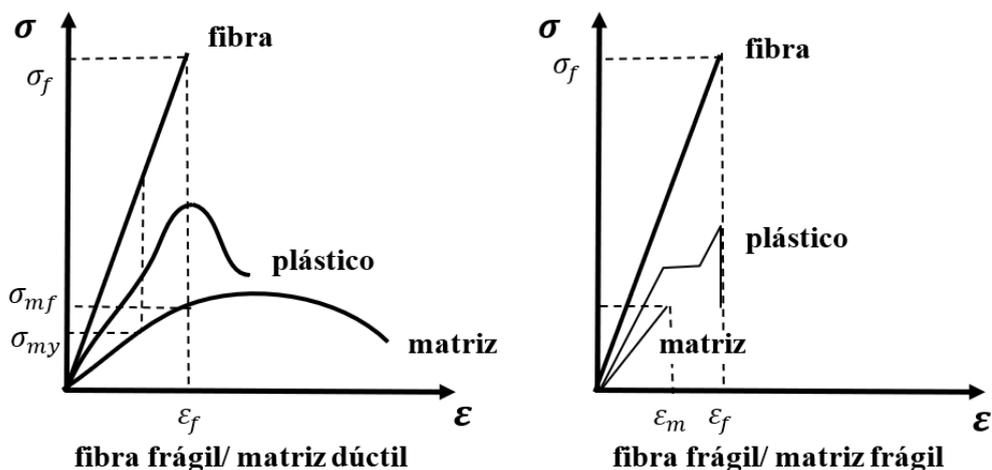


Fonte: Machado (2002)

A matriz polimérica deve apresentar um alongamento de ruptura muito maior do que o alongamento limite da fibra de carbono. O objetivo é que a matriz continue a possuir capacidade de carga mesmo após a tensão na fibra ter atingido o valor de ruptura (limite de resistência), evitando que o sistema composto entre em colapso imediatamente após a ruptura frágil das fibras. Nesse sentido, segundo Machado (2002), é desejável que os sistemas compostos com fibras de carbono se comportem em conformidade com o mecanismo de falha

característico dos compósitos reforçados por fibras com ruptura frágil e matriz polimérica com ruptura dúctil, conforme indicado no lado esquerdo da Figura 08.

Figura 08: Diagrama tensão vs. deformação para matrizes poliméricas



Fonte: Adaptado de Machado (2002)

No que diz respeito às propriedades e características dos *CFRP*, destacam-se a excelente resistência mecânica e rigidez, o bom comportamento à fadiga e extrema leveza devido ao baixo peso específico do sistema (da ordem de $1,6 \text{ g/cm}^3$ a $1,9 \text{ g/cm}^3$, cerca de 5 vezes menor do que o do aço estrutural). Além disso, a elevada resistência a ataques químicos diversos, sem serem afetados pela corrosão e a estabilidade térmica e reológica também são características desses materiais (MACHADO, 2002).

2.3.2 Matriz polimérica

As propriedades e características dos *CFRP* estão diretamente associadas às características e propriedades dos materiais que o constituem, neste caso as fibras e a matriz polimérica. As matrizes utilizadas em polímeros reforçados são resinas termoplásticas ou termorrígidas, sendo estas últimas as mais utilizadas em reforço de estruturas. Dentre as resinas termorrígidas, podem ser citadas as seguintes: poliéster, éster-vinílico, uretano metacrilato, fenol e epóxi. As resinas epóxi são as mais utilizadas por apresentarem algumas características e propriedades que são necessárias para o bom funcionamento do sistema de reforço (SILVA FILHO, 2007).

Nesse sentido, Machado (2002) afirma que as matrizes, além de satisfazerem as propriedades mecânicas demandadas, devem ser compatíveis e aderentes ao substrato de concreto e ao próprio compósito, resistentes às condições ambientais e ter uma vida útil que seja compatível com a da fibra. Além disso, são elas que saturam as fibras de carbono, as mantêm no lugar e se encarregam de transferir as tensões de cisalhamento entre o concreto e o sistema compósito.

2.3.3 Fibras de carbono

A partir dos estudos e o consequente avanço tecnológico no desenvolvimento dos compósitos, observou-se que mantas, tecidos e laminados de fibras de carbono dispostas de forma unidirecional, contínua e com matrizes em resina epóxi poderiam substituir, satisfatoriamente, as tradicionais chapas de aço no reforço estrutural (BEBER, 2003).

As fibras de carbono são resultado da carbonização, tratamento térmico através da oxidação, de fibras precursoras orgânicas como o poliácridonitril (PAN), com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) em um ambiente inerte e, também, através de fibras de *rayon*. Ao final desse processo, as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, conferindo uma excelente resistência mecânica ao produto final (MACHADO, 2002).

Nesse processo de tratamento térmico, quanto maior a temperatura, maior será o módulo de elasticidade do material resultante, variando de $100GPa$ a $300GPa$ para as fibras de carbono (MACHADO, 2002). As características mais importantes das fibras de carbono estão sintetizadas na tabela abaixo.

Tabela 01: Características genéricas das fibras de carbono

Tipo da fibra de carbono	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência Máxima de Tração (MPa)	Deformação de Ruptura (%)
De uso geral	220 - 235	< 3.790	> 1,2
Alta resistência	220 - 235	3.790 - 4.825	> 1,4
Ultra alta resistência	220 - 235	4.825 - 6.200	> 1,5
Alto módulo	345 - 515	> 3.100	> 0,5
Ultra alto módulo	515 - 690	> 2.410	> 0,2

Fonte: Adaptado de Machado (2002)

A partir da Tabela 01, é possível perceber que as fibras de carbono, basicamente, são divididas em fibras de alta resistência e fibras de elevado módulo de elasticidade. Essas propriedades são advindas do arranjo molecular do material e, de acordo com Machado (2002), quanto maior o módulo de elasticidade, mais valor agregado o material apresenta.

Existem vários tipos de fabricação das fibras de carbono, sendo as mais comuns a unidirecional e a entrelaçada com fibras defasadas em 90°, com diversas disposições das fibras (BALAGURU et al., 2009). E, nesse contexto, o coeficiente de dilatação térmica dos compostos unidirecionais de carbono varia de acordo com as suas direções longitudinal e transversal, como apresentado na Tabela 02, dependendo também do tipo da fibra, da resina, e do volume de fibra no composto (MACHADO, 2002).

Tabela 02: Coeficientes de dilatação térmica para um *CFRP* unidirecional

Direção	Coeficiente de Dilatação Térmica
Longitudinal (α_L)	$- 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $0/^{\circ}\text{C}$
Transversal (α_T)	$22 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $23 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Fonte: Adaptado de Machado (2002)

A partir da Tabela 02, percebe-se que as fibras de carbono apresentam um coeficiente de dilatação térmica longitudinal negativo, indicando que o material sofre contração com o aumento de temperatura e dilatação com a diminuição da temperatura.

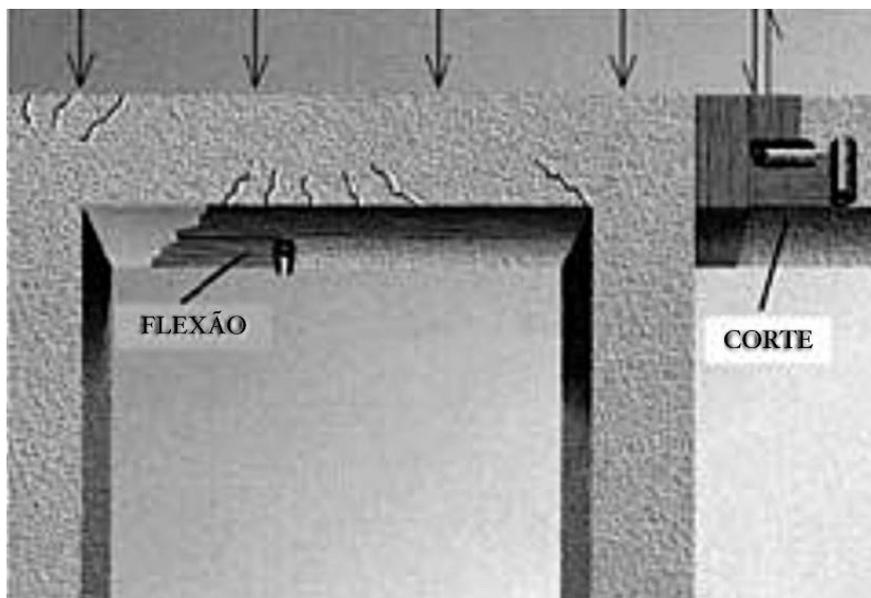
2.3.4 Aplicação dos sistemas compostos de reforço

Os sistemas compostos podem ser utilizados como alternativa para o reforço estrutural de uma vasta variedade de elementos de concreto armado. Mas, em especial, são utilizados em elementos estruturais nos quais há a ocorrência de momentos fletores, esforços cortantes e momentos torçores e, também, em casos específicos de confinamento em pilares de concreto (MACHADO, 2002).

Como exemplos de elementos nos quais se utilizam as fibras de carbono como reforço estrutural podem ser citados: lajes, pilares, tanques, silos, reservatórios, muros de arrimo, vigas-paredes, alvenarias e vigas. Neste último, as fibras de carbono podem ser utilizadas para absorver os esforços de tração provenientes dos momentos fletores positivos e negativos,

assim como das tensões de cisalhamento originadas dos esforços cortantes, como apresentado na Figura 09 (MACHADO, 2002).

Figura 09: Reforço de vigas à flexão e ao corte



Fonte: Adaptado de Machado (2002)

A Figura 09 apresenta elementos estruturais de viga sendo reforçados, por meio da aplicação de lâminas de polímeros reforçados com fibras, na parte externa dessas estruturas. Nota-se que na região mais à direita da figura, próximo ao apoio, há fissuras decorrentes de esforços cortantes, enquanto no meio do vão, em decorrência de um momento fletor positivo, apresenta fissuras na parte inferior. Percebe-se, também, que para os esforços de cisalhamento, próximo ao apoio, as lâminas de fibras de carbono são aplicadas na direção vertical (90°) e horizontal (0°) ou, também, orientadas em qualquer inclinação que se faça necessária, ao passo que, no vão da viga as lâminas são dispostas horizontalmente (0°), apenas (MACHADO, 2002).

2.4 Técnica NSM

No contexto dos reforços estruturais, Wierzbicki (2021) afirma que várias são as possibilidades e técnicas existentes para solucionar a problemática e, nesse sentido, a escolha depende da análise do custo-benefício de cada alternativa.

Em meio às técnicas de solução dessa problemática, a *EBR* é a mais comumente empregada, consistindo na aplicação de lâminas ou mantas de *CFRP* aderidas externamente

nas estruturas de concreto armado. Entretanto, estudos recentes demonstram que a técnica *NSM*, com lâminas ou barras de *CFRP* inseridas no cobrimento do concreto apresenta melhores resultados, uma vez que possui uma área de aderência maior em relação à técnica *EBR*, dentre outros fatores (WIERZBICKI, 2021).

2.4.1 Processo executivo

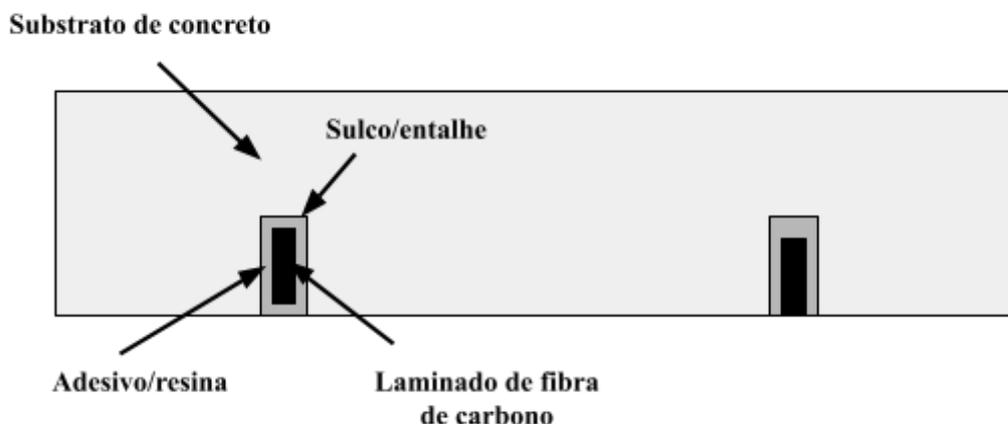
Segundo Lorenzis e Teng (2007), a principal diferença do processo executivo da técnica *NSM*, em relação à *EBR*, é a necessidade de fazer entalhes no cobrimento do concreto. Entretanto, ainda faltam estudos mais aprofundados e minuciosos para o desenvolvimento do processo executivo dessa técnica.

A técnica *NSM*, assim como a *EBR*, também se inicia com o procedimento de recuperação do substrato de concreto e, em seguida, faz-se uso de um disco de corte diamantado para realizar os entalhes. A espessura e profundidade do entalhe variam de acordo com as dimensões do material a ser aplicado (WIERZBICKI, 2021). Recomenda-se que os entalhes sejam limpos com ar comprimido e o material de reforço seja limpo com acetona (COELHO et al., 2011).

O sulco, entalhe, deve ser totalmente preenchido pelo adesivo epóxi, que serve para unir o *CFRP* ao substrato de concreto, possibilitando um caminho para a carga entre o substrato e o sistema de reforço (ACI 440.2R, 2008). Recomenda-se que as superfícies laterais do material de reforço também sejam cobertas com uma fina camada de epóxi e que, após inserir o material de reforço estes sejam ligeiramente pressionados para forçar o adesivo epóxi a fluir entre o *CFRP* e as paredes dos entalhes. Por fim, deve-se remover o excesso do adesivo e regularizar a superfície. Maiores detalhes sobre a aplicação do reforço podem ser vistos nas Figuras 10 e 11.

A Figura 10 ilustra um corte esquemático, em perfil, de um elemento estrutural reforçado com lâminas de compósitos de fibra de carbono, na região de cobrimento do concreto. Percebe-se que a lâmina de *CFRP* fica envolvida pela resina, ou adesivo, epóxi dentro dos dois entalhes que são realizados no concreto, mas enquanto que no entalhe à esquerda a lâmina é envolvida em sua totalidade pela resina, no entalhe à direita apenas três faces do material de reforço são envolvidas por esta. São duas formas diferentes de entalhar o material de reforço no elemento, entretanto, em ambas, as lâminas de *CFRP* se encontram inseridas na região do cobrimento, perto da borda.

Figura 10: Corte esquemático do sistema *NSM*



Fonte: Autora (2022)

Enquanto isso, do lado esquerdo da Figura 11, é possível ver os entalhes realizados no cobrimento de uma viga, ao passo que do lado direito é apresentada a viga já com o material de reforço inserido e o fechamento devidamente realizado. Nessa figura é possível ter uma noção de como as dimensões dos entalhes e das lâminas de *CFRP* são pequenas, se comparadas com as dimensões do elemento estrutural como um todo.

Ao comparar as Figuras 10 e 11, nota-se, também, que as lâminas de *CFRP* da Figura 11 foram inseridas da mesma forma que a lâmina do entalhe à esquerda da Figura 10, ou seja, todas as suas faces foram envolvidas pela resina utilizada.

Figura 11: Entalhes no cobrimento de viga e laminados de *CFRP* inseridos



Fonte: Adaptado de Araújo (2017)

A Tabela 03 apresenta um roteiro com as etapas do processo executivo da técnica *NSM* (DALFRÉ, 2013).

Tabela 03: Roteiro com as etapas do processo executivo da técnica *NSM*

Etapa	Procedimento
1	Realizar o corte dos entalhes com um disco de corte diamantado
2	Limpar os entalhes com ar comprimido
3	Limpar o material de reforço com acetona
4	Preencher os entalhes com o adesivo epóxi
5	Cobrir as superfícies laterais do material de reforço com uma fina camada do adesivo epóxi
6	Preencher os entalhes com o material de reforço
7	Remover o excesso do adesivo epóxi

Fonte: Adaptado de Dalfré (2013)

2.4.2 Vantagens

De acordo com Oliveira (2019) e Lorenzis e Teng (2007), ao se comparar a técnica *NSM* com a *EBR*, pode-se perceber algumas vantagens bastante expressivas da primeira, como:

- Redução da quantidade de tempo investida no momento da instalação do reforço, uma vez que irregularidades da superfície de concreto podem ser mais facilmente acomodadas;
- Menor propensão do reforço *NSM* se destacar do substrato de concreto;
- Menor exposição a impactos acidentais e danos mecânicos, incêndio e vandalismo;
- Maior área de contato entre o reforço e o concreto, aumentando, assim, a adesão entre os materiais;
- Maior facilidade em ancorar as barras em peças adjacentes, sendo um atrativo para o fortalecimento flexural de vigas e colunas em quadros rigidamente articulados, onde os momentos máximos normalmente ocorrem nas extremidades da peça;

- A estética da estrutura reforçada é praticamente inalterada.

Devido às vantagens supracitadas, a técnica *NSM* é, em muitos casos, superior à técnica *EBR* ou pode ser usada em combinação com esta, desde que a espessura do cobrimento de concreto seja suficiente para os entalhes necessários.

3. PROCEDIMENTOS PARA DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO

A concepção do diagnóstico da estrutura e determinação das ações serão realizadas considerando as orientações das normas NBR 6118/2014 e NBR 6120/1980, respectivamente. Para mais, em virtude da ausência de normas brasileiras que regulamentem o uso do reforço com fibras de carbono, o dimensionamento do reforço e as suas propriedades serão determinados seguindo as orientações do ACI 440.2R/2017.

Além disso, em relação à ruptura dos materiais, Araújo (2014) ressalta que o elemento estrutural é dimensionado para que o escoamento da armadura ocorra antes do esmagamento do concreto ou do rompimento da fibra, assim, a estrutura apresentará fissuras antes de entrar em colapso, buscando evitar modos de ruptura prematuros e sem avisos.

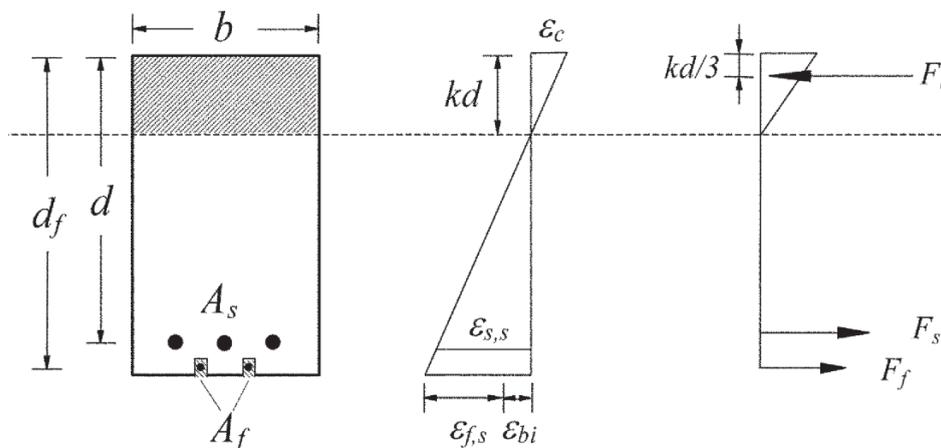
Ademais, o ACI 440.2R/2017 preconiza que, para ser reforçado com *FRP*, o concreto deve possuir resistência superior à 17 MPa e que algumas medidas como a utilização de coeficientes de majoração, a utilização de comprimento de ancoragem e a limitação da tensão e da deformação específica que atua no compósito são necessárias para minimizar os riscos provenientes da não garantia da correta aplicação do reforço.

De acordo com o ACI 440.2R/2017, o dimensionamento do reforço à flexão de vigas em concreto armado com *CFRP* deve ser realizado no Estado Limite Último (ELU), no qual se estabelece que a capacidade resistente à flexão de um elemento deve ultrapassar a demanda estrutural, não se limitando à demanda de serviço da estrutura. A análise correspondente ao ELU calcula a capacidade resistente da seção através da combinação das condições de equilíbrio de forças e momentos, compatibilidade das deformações e o comportamento reológico do concreto e dos demais materiais constituintes na ruptura.

Para o dimensionamento do reforço de uma viga de concreto armado com *CFRP*, Adorno et al. (2015) destacam que, primeiramente, deve-se analisar se o elemento de fato precisa ser reforçado. Sendo assim, os esforços máximos resistidos pela peça devem ser avaliados e, em seguida, comparados com aqueles produzidos pelas ações atuantes. Se os esforços internos máximos solicitantes forem superiores aos resistidos pela peça, esta deve ser reforçada.

O ACI 440.2R/2017 apresenta as distribuições de tensão e deformação de uma seção retangular reforçada pela técnica *NSM*, submetida à flexão e no ELU, como ilustrado na Figura 12.

Figura 12: Distribuições de tensões e deformações em uma seção retangular sob flexão no ELU



Fonte: Adaptado de ACI 440.2R/2017

3.1 Dimensionamento à flexão

De acordo com Machado (2002), ao se calcular a resistência à flexão de um elemento estrutural de concreto armado reforçado com compósitos de fibra de carbono, deve-se adotar alguns conceitos básicos e considerações dispostos a seguir:

- Os estudos e cálculos devem ser efetuados com base nas condições das estruturas existentes. Sendo assim, considera-se as dimensões das seções reais e a quantidade e distribuição das armaduras de aço contidas nestas. Além disso, deve-se utilizar as características mecânicas e propriedades dos materiais constituintes do elemento a ser reforçado;
 - Considera-se que as seções planas permanecem planas após a ocorrência dos carregamentos e as deformações são linearmente proporcionais à sua distância à linha neutra (hipótese de Bernoulli);
 - A resistência à tração do concreto deve ser desprezada;
 - A deformação específica de compressão do concreto não pode ultrapassar os limites de 3,5‰ (0,0035 *cm/cm*), quando dimensionada segundo a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), ou 3,0‰ (0,0030 *cm/cm*), quando dimensionada segundo o ACI 440.2R/2017;
 - A aderência entre o compósito *CFRP* e o substrato de concreto é perfeita;
 - A curva tensão x deformação do compósito *CFRP* é considerada linear até a ruptura.
- É válido ressaltar que, ao se dimensionar o reforço estrutural com fibras de carbono

seguindo as orientações do ACI 440.2R/2017, é importante se atentar para o fato de que esse código utiliza o valor de f'_c para a resistência à compressão do concreto, enquanto que no Brasil utiliza-se f_{ck} para representar esse mesmo parâmetro. A diferença entre eles está no quantil usado para definir a probabilidade do mencionado valor não ser alcançado pelo concreto, o qual corresponde a 10% para f'_c e 5% no caso de f_{ck} .

O ACI 440.2R/2017 destaca que, para calcular a tensão de tração máxima e a deformação máxima na fibra de carbono que serão utilizadas para cálculo, faz-se necessário multiplicar a tensão de tração máxima e a deformação máxima da fibra fornecidas pelo fabricante por um fator de redução ambiental C_E , assim como apresentam as seguintes equações:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (01)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (02)$$

nas quais f_{fu} e f_{fu}^* são, respectivamente, a tensão de tração máxima de projeto e a tensão de tração máxima fornecida pelo fabricante, enquanto ε_{fu} e ε_{fu}^* representam a deformação máxima de projeto e a deformação máxima fornecida pelo fabricante, nessa ordem.

O fator de redução ambiental depende das condições de exposição do material de reforço. A Tabela 04 apresenta os valores desse fator indicados pelo ACI 440.2R/2017 para a fibra de carbono, de acordo com as condições de exposição.

Tabela 04: Fatores de redução ambiental para distintas condições de exposição

Condições de exposição	Tipo de fibra	Fator de redução ambiental (C_E)
Ambiente interno	Carbono	0,95
Ambiente externo	Carbono	0,85
Ambiente agressivo	Carbono	0,85

Fonte: Adaptado de ACI 440.2R/2017

De posse dos valores máximos da tensão e da deformação de tração de projeto para o reforço de fibra de carbono, obtém-se o seu correspondente módulo de elasticidade E_f , através da seguinte expressão:

$$E_f = f_{fu} / \varepsilon_{fu} \quad (03)$$

Em geral, no momento em que o compósito *CFRP* é aplicado, não há nenhuma tensão sendo imposta sobre ele, diferentemente do que ocorre com o substrato de concreto do elemento estrutural a ser reforçado. Este último já está submetido às tensões decorrentes das diversas solicitações existentes (peso próprio, forças de protensão, dentre outras). Sendo assim, o nível de deformação existente no reforço é diferente daquele que ocorre no substrato de concreto no qual esse será aplicado (MACHADO, 2002).

Nesse sentido, é necessário conhecer a tensão que existe no substrato para que, a partir desta, tenha-se conhecimento do nível de deformação existente na fibra mais extrema desse elemento de concreto e então, saiba-se qual nível de tensão o compósito *CFRP* será submetido. Machado (2002) ainda ressalta que, para que se saiba com qual nível de tensão o *CFRP* efetivamente trabalhará, é preciso que se subtraia essa deformação pré-existente da deformação final encontrada para a fibra de carbono.

Sendo assim, a deformação específica máxima de tração permissível na fibra de carbono (ε_{fc}), é dada pela equação a seguir:

$$\varepsilon_{fc} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad (04)$$

em que ε_b e ε_{bi} representam, respectivamente, a deformação total da seção no nível do reforço para o carregamento máximo e aquela pré-existente no momento da aplicação do reforço de fibra de carbono.

Para o dimensionamento do reforço estrutural pela técnica *NSM*, o ACI 440.2R/2017 propõe a seguinte equação que limita o valor de deformação específica da fibra aplicada no reforço:

$$\varepsilon_{fd} = k_m \cdot \varepsilon_{fu} \quad (05)$$

na qual ε_{fd} e ε_{fu} são, nessa ordem, o valor limite de deformação da fibra a ser adotado no dimensionamento e verificação do reforço para evitar rupturas prematuras da fibra e a deformação máxima observada na fibra no momento da ruptura, ao passo que k_m se trata do coeficiente adimensional dependente da forma de ligação para a flexão. Para os elementos de concreto armado reforçados com PRF pela técnica *NSM*, o ACI 440.2R/2017 recomenda o uso do valor de $k_m = 0,7$.

A resistência à flexão da viga é governada pela ruptura da fibra de carbono, pela ruptura no concreto, pelo descolamento da fibra de carbono e pela ruptura do aço. Esse último mecanismo é mais raro e, como o ACI 440.2R/2017 não limita a deformação do aço, a ruptura deve ocorrer devido aos outros fatores.

Para se calcular a deformação na fibra, uma vez adotado um valor para a posição da linha neutra (c), prossegue-se como apresentado na expressão a seguir:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (06)$$

na qual ε_{fe} , ε_{cu} e ε_{bi} são a deformação efetiva na fibra de carbono, a deformação de ruptura do concreto (igual a 0,003 pelo ACI 440.2R/2017) e a deformação encontrada no cobrimento da armadura de tração na viga antes do reforço, respectivamente. A grandeza d_f representa a distância do topo da viga até o centroide do reforço.

A tensão no reforço de *CFRP* (f_{fe}) pode ser encontrada, considerando o comportamento elástico desse material, por meio da equação a seguir:

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (07)$$

A deformação no concreto (ε_c), a deformação na armadura de aço (ε_s) e a tensão nas armaduras de aço (f_s) são dadas, respectivamente, por:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right) \quad (08)$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (09)$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y \quad (10)$$

Na Equação 09, d indica a altura útil da seção transversal da viga, enquanto que na Equação 10, E_s e f_y consistem no módulo de elasticidade e na tensão de escoamento da armadura de aço, respectivamente.

O modo de ruptura previsto para o sistema pode ser analisado com base nos valores de deformação calculados. Na situação em que os valores de deformação efetiva da fibra superem o valor de deformação última, o colapso se dará pela ruptura do reforço. Entretanto, caso o valor de deformação do concreto supere a deformação última adotada pelo ACI 440.2R/2017 (3,0%), o colapso se dará pelo esmagamento do concreto.

Em uma situação na qual não se considere perfeita a aderência entre o compósito *CFRP* e o substrato de concreto, caso o colapso não ocorra pela ruptura do reforço nem pelo esmagamento do concreto, um descolamento do reforço deve ser o modo de ruptura observado.

Uma vez conhecidas as tensões e deformações na fibra de carbono e nas armaduras de aço, verifica-se se a posição da linha neutra (c) adotada inicialmente corresponde a posição real, por meio da seguinte expressão:

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \cdot \beta_1 b} \quad (11)$$

na qual A_s e A_f são, nessa ordem, a área de aço da armadura e a área do reforço aplicado na viga, ao passo que f_s , f_{fe} e f'_c representam, respectivamente, a tensão no aço da armadura de aço, a tensão efetiva da fibra de carbono e a resistência à compressão do concreto. Nesta última equação, b se trata da largura da seção transversal da viga.

A Equação 11 representa um processo iterativo, no qual a posição correta da linha neutra é encontrada quando o equilíbrio das forças na armadura de aço, na fibra de carbono e no concreto for satisfeito, como apresenta a seguinte equação:

$$F_f + F_s + F_c = 0 \quad (12)$$

na qual

$$F_f = f_{fe} \cdot A_f \text{ é a força de tração atuante na fibra;}$$

$F_s = f_s \cdot A_s$ é a força de tração atuante na armadura inferior;

$F_c = \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot f'_c \cdot b \cdot c$ é a força de compressão atuante no concreto.

Assim, deve-se buscar um valor de c para o qual a somatória das forças de tração e de compressão atuantes na seção transversal do elemento seja zero.

De acordo com o ACI 440.2R/2017, na Equação 11, no caso do modelo de ruptura previr o esmagamento do concreto, antes ou depois do escoamento do aço, os coeficientes α_1 e β_1 podem ser associados ao bloco de tensão de Whitney, no qual $\alpha_1 = 0,85$ e β_1 depende do valor da resistência característica à compressão do concreto. Para concretos com valores de resistência até $27,5 \text{ MPa}$, $\beta_1 = 0,85$, enquanto isso, para concretos com valores de resistência maiores, aplica-se um decréscimo linear de $0,05$ para cada $6,9 \text{ MPa}$ acima dos $27,5 \text{ MPa}$ fixados, obedecendo o valor mínimo de $0,65$.

Por outro lado, se for controlado o modo de ruptura de descolamento do cobrimento de concreto, descolamento do *PRF* ou ruptura do *PRF*, o bloco de tensões de compressão determinado por Whitney fornece resultados mais acurados se for utilizado o valor de α_1 fornecido pela Equação 13 e os demais parâmetros forem determinados pela Equação 14 e Equação 15.

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot (\varepsilon'_c)^2 \cdot \beta_1} \quad (13)$$

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon'_c - 2 \cdot \varepsilon_c} \quad (14)$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1,71 \cdot f'_c}{E_c} \quad (15)$$

nas quais E_c consiste no módulo de elasticidade do concreto e ε'_c e ε_c se tratam da deformação máxima no concreto não confinado e da deformação no concreto, respectivamente.

Depois que o valor apropriado para a profundidade da linha neutra é obtido através das iterações necessárias, a equação a seguir pode fornecer o momento resistente (M_n) da seção reforçada com *CFRP*:

$$M_n = [A_s \cdot f_s (d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2}) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} (d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2})] \quad (16)$$

em que ψ_f representa um fator de redução adicional para a parcela de contribuição do *CFRP*, com valor recomendado de 0,85. A intenção é que se trabalhe a favor da segurança, levando em conta os possíveis modos de falhas desse tipo de solução de reforço estrutural, como o descolamento do material de reforço de *CFRP*.

O momento resistente de cálculo (M_u) é obtido através da multiplicação do momento resistente (M_n) pelo fator de segurança Φ , como pode ser visto através da seguinte expressão:

$$M_u = \Phi M_n \quad (17)$$

O fator de segurança Φ , na Equação 17, por sua vez, depende do valor da deformação do aço, que pode ser encontrado na tabela a seguir:

Tabela 05: Fator de segurança Φ em função da deformação do aço

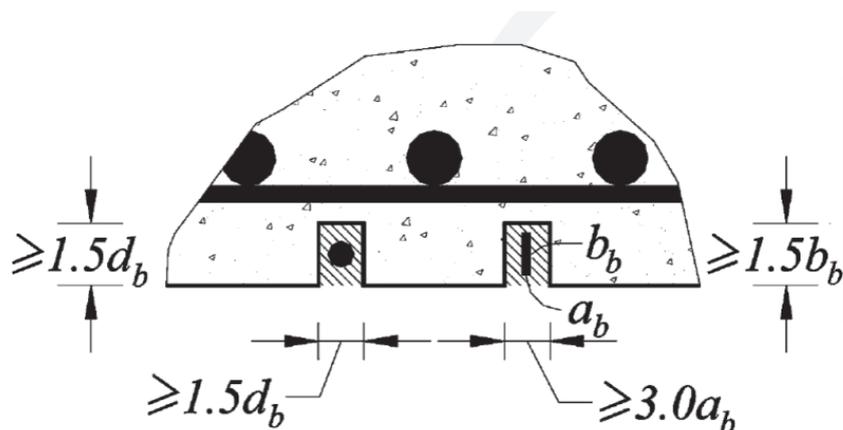
Deformação do aço	Valor de Φ
$\varepsilon_t \geq 0,005$	0,90
$\varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005$	$0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}}$
$\varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy}$	0,65

Fonte: Adaptado de ACI 440.2R-8/2017

No que diz respeito ao detalhamento, o ACI 440.2R/2017 recomenda que o entalhe tenha dimensões de, no mínimo $3a_b$ e $1,5b_b$, sendo a_b e b_b a menor e a maior dimensão do laminado do reforço, respectivamente, como ilustra a Figura 13.

Além disso, o espaçamento entre entalhes deve ser maior que o dobro da sua profundidade para que se evite a sobreposição das tensões de tração ao redor das lâminas do reforço.

Figura 13: Dimensões mínimas dos entalhes

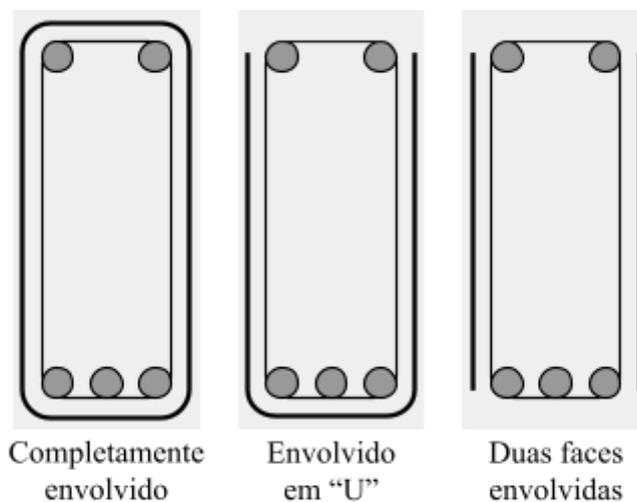


Fonte: ACI 440.2R/2017

3.2 Dimensionamento ao cisalhamento

O dimensionamento do reforço com fibras de carbono de vigas de concreto armado ao cisalhamento, de acordo com o ACI 440.2R/2017, pode ser dividido em três tipos. O primeiro corresponde ao completo envolvimento da viga com o material de reforço, o segundo consiste no envolvimento de três, das quatro, faces da viga que é conhecido como “envolvimento em U” e o terceiro diz respeito ao envolvimento de duas faces opostas da viga. A Figura 14 ilustra os três tipos de envolvimento de uma viga de concreto armado com fibras de carbono.

Figura 14: Tipos de envolvimento de uma viga de concreto armado com fibras de carbono



Fonte: Autora (2022)

Apesar das três configurações contribuírem para um aumento da resistência ao cisalhamento da viga de seção retangular, envolver totalmente a seção com o reforço é a alternativa mais eficiente, seguida da técnica de envolvimento de três faces, fazendo com que a opção de envolver duas faces opostas da viga seja a configuração menos eficiente entre as três. Entretanto, apesar de mais eficiente, envolver totalmente uma viga não é tão simples como envolver um pilar, por exemplo, em razão da sua disposição na estrutura. Dessa forma, em vigas, a segunda alternativa (envolvimento em U) é mais corriqueiramente utilizada (ACI 440.2R-8/2017).

No que diz respeito à força cortante de cálculo (V_u), essa é obtida através da multiplicação da força cortante resistente (V_n) pelo fator de segurança Φ , que é definido pelo ACI 318 como $\Phi = 0,75$, como pode ser visto através da seguinte expressão:

$$V_u = \Phi V_n \quad (18)$$

Por conseguinte, a força cortante de cálculo (V_u) é determinada por meio da soma das contribuições da fibra de carbono, das armaduras de aço e do concreto, como pode ser visto na equação a seguir:

$$V_u = \Phi(V_c + V_s + \psi_f \cdot V_f) \quad (19)$$

na qual V_c , V_s e V_f são, respectivamente, a parcela resistente ao cisalhamento do concreto, a parcela resistente ao cisalhamento das armaduras de aço e a parcela resistente ao cisalhamento da fibra de carbono (calculada através da Equação 22).

Além disso, na Equação 19, analogamente ao dimensionamento desses reforços à flexão, ψ_f trata-se de um fator de redução adicional para a parcela de contribuição do *CFRP*, com valor dependendo do tipo de técnica utilizada para o envolvimento da viga com o material de reforço. A intenção é que, mais uma vez, se trabalhe a favor da segurança, levando em conta os possíveis modos de falhas desse tipo de solução de reforço estrutural, como o descolamento do material de reforço de *CFRP*.

A Tabela 06 apresenta os valores de ψ_f em função da técnica escolhida para envolver a viga com o material de reforço.

Tabela 06: Fator de redução ψ_f em função da técnica de envolvimento escolhida

Técnica	Valor de ψ_f
Envolvimento total	0,95
Envolvimento em “U”	0,85
Envolvimento de duas faces opostas	0,85

Fonte: Adaptado de ACI 440.2R/2017

As parcelas V_c e V_s são calculadas de acordo com as orientações do ACI 318 e podem ser obtidas por meio das expressões a seguir:

$$V_c = 0,17 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (20)$$

$$V_s = \frac{A_s \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (21)$$

Enquanto isso, o cálculo da parcela resistente ao cisalhamento da fibra de carbono é realizado através da seguinte equação:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (22)$$

onde A_{fv} e f_{fe} representam, nessa ordem, a área de fibra de carbono e a tensão na fibra de carbono, d_{fv} se trata da distância entre o centroide da armadura longitudinal até o limite superior da fibra de carbono e s_f consiste no espaçamento entre as faixas da fibra de carbono de eixo a eixo das faixas.

Além disso, para seções retangulares, A_{fv} e f_{fe} são dadas, respectivamente, pelas seguintes expressões:

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (23)$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (24)$$

em que n , t_f e w_f representam o número de camadas do reforço, a espessura do reforço e a largura do reforço, respectivamente.

O ACI 440.2R/2017 também limita o valor máximo da deformação da fibra de carbono de acordo com a técnica de envolvimento a ser utilizada. Sendo assim, a Tabela 07 apresenta os valores limite dessas deformações, em função da técnica empregada.

Tabela 07: Deformação limite da fibra de carbono em função da técnica de envolvimento escolhida

Técnica	Valor de ψ_f
Envolvimento total	$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_{fu}$
Envolvimento em “U”	$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004$
Envolvimento de duas faces opostas	$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004$

Fonte: Adaptado de ACI 440.2R/2017

O valor de k_v , coeficiente de redução em função da espessura e número de camadas da manta ou laminado e da resistência do concreto, é dado pela seguinte expressão:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (25)$$

onde k_1 e k_2 são parâmetros do coeficiente de redução da aderência, que levam em conta a resistência do concreto e o tipo de reforço na seção, respectivamente. Além disso, L_e consiste no comprimento ativo de adesão, que mantém a maior parte das tensões de adesão. Sendo assim, k_1 , k_2 e L_e são encontrados por meio das equações a seguir:

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (26)$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}}, \text{ para seções envolvidas em “u”} \quad (27)$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}}, \text{ para seções com duas faces envolvidas}$$

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0,58}} \quad (28)$$

De posse dos valores dos coeficientes supracitados, bem como do comprimento ativo de adesão, é possível calcular qual será a deformação limite na fibra de carbono e, conseqüentemente, a sua tensão e força cortante limites.

Finalmente, o ACI 440.2R/2017 limita a resistência total ao cisalhamento de acordo com a seguinte expressão:

$$V_s + V_f \leq 0,66 \sqrt{f'_c} b d \quad (29)$$

na qual a resistência total ao cisalhamento é fornecida pela soma das parcelas de resistência ao cisalhamento da fibra e da armadura de aço.

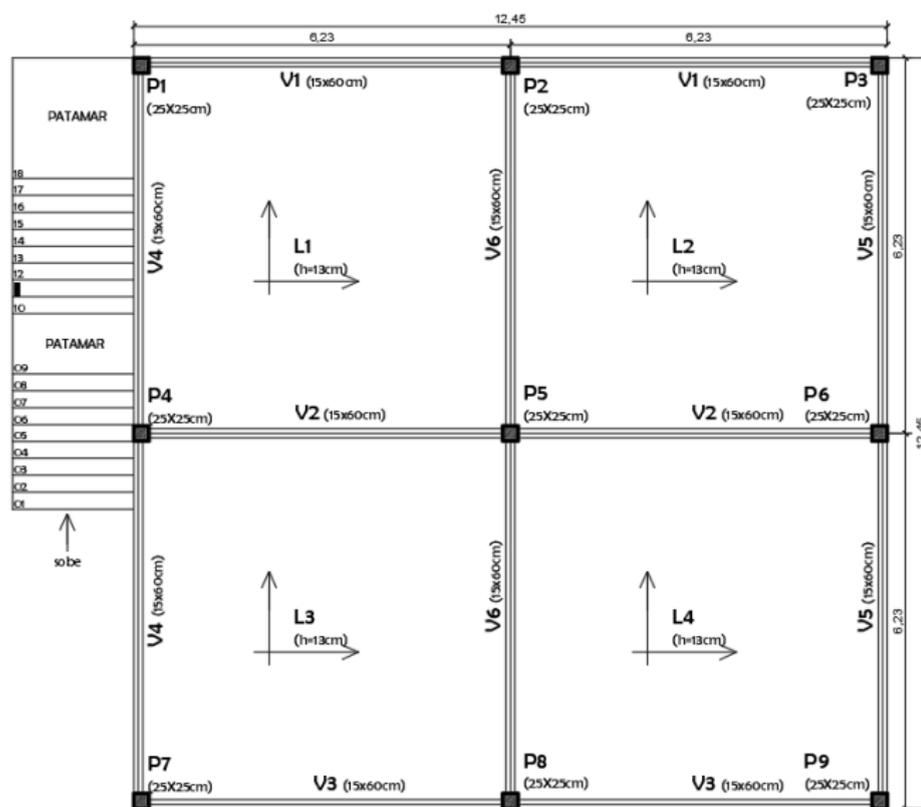
No que diz respeito ao detalhamento, o ACI 440.2R/2017 limita o espaçamento máximo entre as fibras de carbono ($s_{m\acute{a}x}$) de acordo com a seguinte expressão:

$$s_{m\acute{a}x} = \frac{d}{4} + w_f \quad (30)$$

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste trabalho baseou-se no pavimento de um edifício, foco do estudo de Oliveira (2020). O problema consistia no fato de que o edifício, onde se localizava o pavimento em questão, foi dimensionado, inicialmente, para uso residencial, mas planejava-se mudar a sua utilização para finalidades esportivas. A estrutura trata-se de um pavimento de planta baixa quadrada, como pode ser visto na Figura 15, constituída por lajes maciças, vigas e pilares, todos em concreto armado. Nesse contexto, os pilares atendiam às solicitações tanto para o uso residencial, quanto para o uso esportivo, mas a laje e as vigas precisariam ser reforçadas.

Figura 15: Modelo estrutural do pavimento analisado



Fonte: Oliveira (2020)

O concreto adotado para a estrutura tem resistência de $f'_c = 25\text{MPa}$ e serão utilizados aço CA - 50 para armadura de flexão e aço CA - 60 para armadura de cisalhamento.

Neste trabalho, a viga 02 será o foco de estudo. Trata-se de uma viga com dimensões da seção transversal de $15 \times 60\text{ cm}$ e que, segundo cálculos previamente realizados, considerando o seu peso próprio, a sobrecarga proveniente das lajes e a sobrecarga proveniente da parede de alvenaria acima dela, é submetida a uma ação de $32,73\text{ kN/m}$ para

uso residencial. Entretanto, quando os cálculos foram refeitos, considerando a utilização da edificação para fins esportivos, verificou-se que essa peça estrutural estaria sujeita a uma ação de $38,69 \text{ kN/m}$.

De posse das ações atuantes na viga 02, foram calculados os momentos fletores máximos e mínimos, bem como as forças cortantes máximas para fins residenciais e para fins esportivos. A partir desses valores críticos, as armaduras de flexão e de cisalhamento foram dimensionadas para os dois cenários (uso residencial e uso esportivo), assim como apresentado nas tabelas a seguir:

Tabela 08: Levantamento de cargas e das armaduras necessárias à flexão para a viga 02 (momento positivo)

Carregamento	Carga (kN/m)	M_{d+} ($kN.m$)	A_s (cm^2)	$A_{s,ef}$ (cm^2)	Dimensionamento
Residencial	32,73	78,80	5,11	6,14	5 Φ 12, 5mm
Esportivo	38,69	93,20	6,28	7,36	6 Φ 12, 5mm

Fonte: Adaptado de Oliveira (2020)

Tabela 09: Levantamento de cargas e das armaduras necessárias à flexão para a viga 02 (momento negativo)

Carregamento	Carga (kN/m)	M_{d-} ($kN.m$)	A_s (cm^2)	$A_{s,ef}$ (cm^2)	Dimensionamento
Residencial	32,73	142,20	10,32	11,04	9 Φ 12, 5mm
Esportivo	38,69	168,10	12,64	13,50	11 Φ 12, 5mm

Fonte: Adaptado de Oliveira (2020)

Tabela 10: Levantamento de cargas e das armaduras necessárias ao cisalhamento para a viga 02

Carregamento	Carga (kN/m)	$V_{sd, \text{máx}}$ (kN)	A_{sw} (cm^2/cm)	Dimensionamento
Residencial	32,73	116,21	0,02550	Φ 6, 3mm c. 24
Esportivo	38,69	137,37	0,03551	Φ 6, 3mm c. 17

Fonte: Adaptado de Oliveira (2020)

De acordo com a análise das cargas atuantes, percebe-se que a viga 02 precisará ser reforçada tanto para os momentos máximo positivos e negativos, quanto para o cisalhamento.

Entretanto, ao analisar a situação de planta do pavimento, nota-se que sobre a viga 02 há a continuidade do pilar central para os pavimentos superiores, o que inviabilizaria a execução do reforço para o momento máximo negativo nessa região da estrutura. Sendo assim, para contornar esse obstáculo e fazer com que se precise reforçar a peça estrutural apenas para o momento fletor positivo, foi realizada uma compensação de momentos.

A ideia é reduzir o momento fletor negativo até um valor que não se precise reforçar a estrutura, ao passo que se compensa essa redução com o aumento proporcional do momento fletor positivo. Dessa forma, adotou-se como momento fletor negativo aquele utilizado para a estrutura com finalidades residenciais (situação em que a viga não precisa de reforço) e manteve-se a carga atuante de fins esportivos sobre a viga, fazendo com que se encontrasse um novo, e maior, valor de momento positivo na estrutura, como pode ser visto na tabela a seguir:

Tabela 11: Valores de cálculo adotados e novo momento fletor positivo para a viga 02

Carregamento	Carga (kN/m)	M_{d-} ($kN.m$)	M_{d+} ($kN.m$)
Esportivo	38,69	142,20	123,30

Fonte: Autora (2020)

Sendo assim, o novo valor de momento positivo ($M_{d+} = 123,30 kN.m$) absorve a sobrecarga proveniente da diminuição do momento negativo e permite reforçar a viga 02 apenas na sua parte inferior, que pode ser facilmente acessada.

Dessa forma, prossegue-se o dimensionamento para o reforço estrutural à flexão e ao cisalhamento com base no novo momento fletor positivo calculado, seguindo as orientações do ACI 440.2R/2017.

4.1 Reforço da viga à flexão

Primeiramente, foram estabelecidos os dados que seriam utilizados para o cálculo do reforço. Sendo assim, as dimensões da seção transversal, as propriedades do concreto e do aço, bem como os valores das propriedades das fibras de carbono foram definidos, como exposto na tabela a seguir:

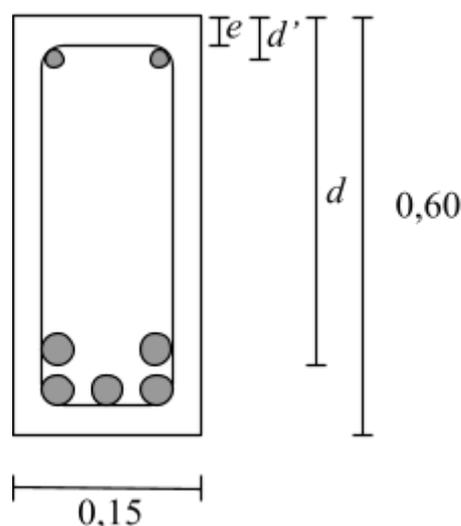
Tabela 12: Dados para o dimensionamento à flexão da viga 02

Dado	Valor
Seção transversal	
b	15 <i>cm</i>
h	60 <i>cm</i>
e	4 <i>cm</i>
d_f	58,5 <i>cm</i>
d	53,5 <i>cm</i>
d'	4,945 <i>cm</i>
Concreto	
f'_c	25 <i>MPa</i>
E_c	28000 <i>MPa</i>
ε_{cu}	3,0‰
Aço	
f_{yk}	500 <i>MPa</i>
E_s	210000 <i>MPa</i>
Armadura da Viga 02	
A_s^+	6,14 <i>cm</i> ²
A_s^-	0,63 <i>cm</i> ² (2Φ6, 3mm)
Fibra de carbono	
E_f	228000 <i>MPa</i>
t_f	1,4 <i>mm</i>
n	1

Fonte: Autora (2022)

na qual e e d' são, respectivamente, o cobrimento de concreto e a distância do topo da viga até o centroide da armadura negativa (estribos). A figura a seguir apresenta um esboço da seção considerada para reforço:

Figura 16: Seção transversal da viga 02 (dimensões em metros)



Fonte: Autora (2022)

A Figura 16 apresenta a seção da viga 02 considerada para os cálculos do dimensionamento do reforço à flexão, ou seja, com as armaduras de aço conforme exposto na Tabela 12.

Prossegue-se com o cálculo considerando que a estrutura se encontra no Estádio II de fissuração, ou seja, a seção da viga já apresenta fissuras, indicando que as tensões atuantes abaixo da linha neutra da seção já superam a tensão de tração característica do concreto. Neste momento, são calculados a altura da linha neutra no Estádio II (x_{II}) e o momento de inércia da seção transversal (I_{II}), dispostos na tabela a seguir:

Tabela 13: Valores da linha neutra e do momento de inércia para a viga 02 no Estádio II (continua)

Viga 02	
Linha neutra	M_{g+}
(x_{II})	15, 20 cm

Fonte: Autora (2022)

Tabela 13: Valores da linha neutra e do momento de inércia para a viga 02 no Estádio II (conclusão)

Momento de inércia	M_{g+}
(I_{II})	85555 cm^4

Fonte: Autora (2022)

na qual M_{g+} representa o momento positivo resistente para cargas permanentes.

De posse dos valores da linha neutra e do momento de inércia, calculados para o Estádio II, a deformação inicial no substrato de concreto da viga 02 foi encontrada pelo princípio das seções planas. A Tabela 14 apresenta a deformação inicial encontrada.

Tabela 14: Deformação inicial calculada para a viga 02

Viga 02	
Deformação	Valor
(ε_{bi})	1,43 ‰

Fonte: Autora (2022)

A partir dos parâmetros dispostos na Tabela 12 e da deformação inicial encontrada, prosseguiu-se o roteiro de cálculo pré-estabelecido no item 5.1 e obteve-se a seguinte configuração para do dimensionamento à flexão da viga 02:

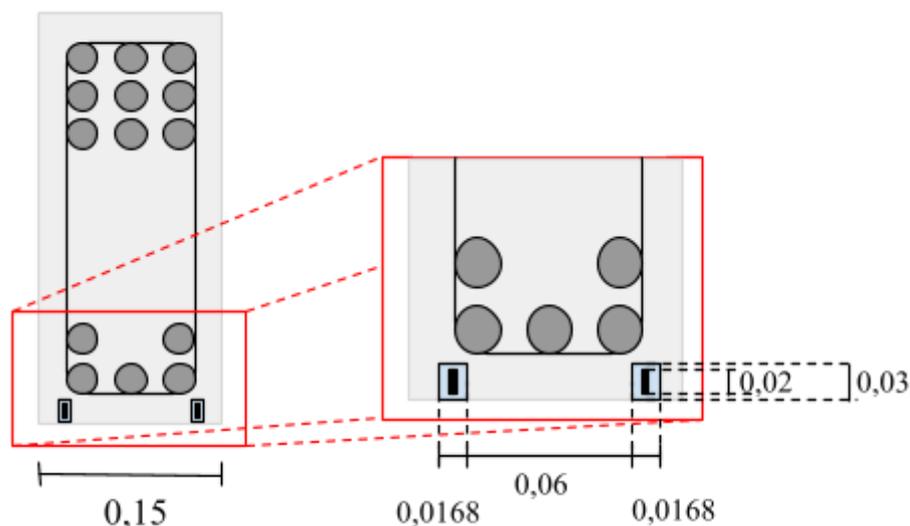
Tabela 15: Dimensionamento à flexão para a viga 02

Fibra de carbono	
Dados	Valor
Área mínima ($A_{fe,m}$)	$0,8 \text{ cm}^2$
Área adotada ($A_{fe,d}$)	$1,12 \text{ cm}^2$
Altura	2 cm
Número de entalhes	2
Número de camadas (n)	4

Fonte: Autora (2022)

A configuração final da seção reforçada, de acordo com os procedimentos de cálculo e de detalhamento apresentados no tópico 5.1, é apresentada pela Figura 17.

Figura 17: Seção transversal da viga 02 reforçada à flexão (dimensões em metros)



Fonte: Autora (2022)

Observa-se que optou-se pela realização de dois entalhes com quatro camadas de laminado em cada um, em detrimento da realização de mais entalhes com menos camadas, por exemplo. Essa escolha é justificada, principalmente, pela largura da seção transversal da viga em questão, que não consegue abarcar mais de dois rasgos sem ir de encontro às recomendações de espaçamento, entre entalhes, do ACI 440.2R/2017.

Outra consideração é o fator construtivo, uma vez que a execução de entalhes não é simples e precisa ser bastante minuciosa para que não se tenha problemas como o atingimento das armaduras de aço ou qualquer erro em algum dos procedimentos descritos na Tabela 03. Dessa forma, ao se realizar uma menor quantidade desses rasgos, diminui-se também as chances de erros executivos.

Ademais, vale ressaltar que os entalhes serão realizados, longitudinalmente, ao longo de toda a extensão inferior da viga, com exceção da região do pilar central.

4.2 Reforço da viga ao cisalhamento

De acordo com as recomendações de cálculo apresentadas no item 3.2 e com os dados considerados na Tabela 16, o cálculo do dimensionamento do reforço das vigas ao cisalhamento foi realizado.

Tabela 16: Dados para o dimensionamento ao cisalhamento da viga 02

Dado	Valor
Concreto	
f'_c	25 MPa
E_c	28000 MPa
ε_{cu}	3,0‰
Aço	
f_{yk}	600 MPa
E_s	210000 MPa
Armadura da Viga 02	
A_{sw}	0,02550 cm ² /cm
Fibra de carbono	
Configuração	2 faces opostas
Orientação	90°
E_f	228000 MPa
t_f	1,4 mm
ε_{fu}	17‰

Fonte: Autora (2022)

Nota-se, a partir da tabela acima que, antes de iniciar os cálculos, é preciso definir qual o tipo de envolvimento da fibra de carbono na peça estrutural.

Nesse caso, opta-se pelo envolvimento das duas faces opostas da viga, visto que o envolvimento completo da seção não é viável, em virtude da disposição da viga no arranjo estrutural, e o envolvimento em “U” traz dificuldades relacionadas à realização dos entalhes nas quinas da viga, uma vez que estes precisam ser realizados de forma a impedir que os laminados de fibra de carbono sejam dobrados em 90° e, assim, venham a ter suas fibras danificadas.

A partir dessa definição, é possível encontrar o fator de segurança Φ e dar início ao dimensionamento. Dessa forma, obteve-se a força cortante de cálculo (V_u) com base nas parcelas de reforço ao cisalhamento do concreto (V_c), das armaduras de aço (V_s), da fibra de carbono (V_f) e nos coeficientes Φ e ψ_f , como pode ser visto na tabela a seguir:

Tabela 17: Parcelas de reforço ao cisalhamento do concreto, das armaduras e da fibra de carbono

Dados	Valor
V_{cd}	61,8 kN
V_s	65,3 kN
V_f	199,6 kN
V_u	222,5 kN

Fonte: Autora (2022)

Em seguida, encontra-se o valor máximo da deformação da fibra de carbono e, conseqüentemente, a sua tensão e força cortante limites, limitada pelo ACI 440.2R/2017, conforme descrito no item 5.2.

Tabela 18: Valores máximos da deformação, tensão e força cortante limites da fibra de carbono

Dados	Valor
ε_{fe}	1,16 ‰
f_{fe}	264,2 MPa
$V_{f\acute{m}ax}$	199,6 kN

Fonte: Autora (2022)

A partir dos dados apresentados e seguindo o detalhamento conforme apontado no item 5.2, a tabela abaixo apresenta o dimensionamento do reforço ao cisalhamento da viga 02:

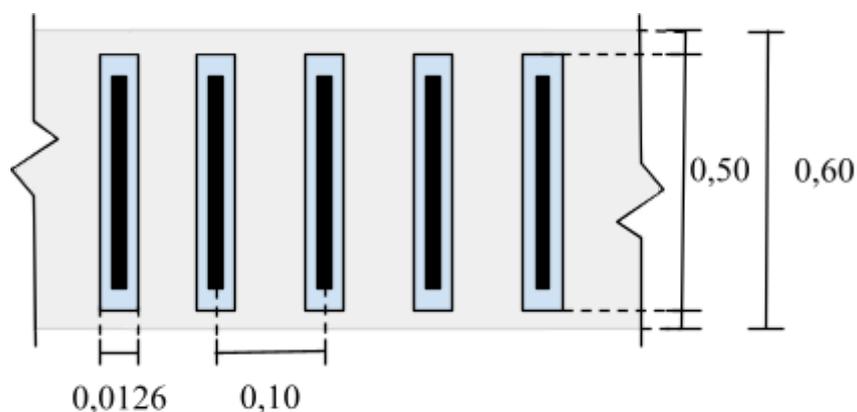
Tabela 19: Dimensionamento ao cisalhamento para a viga 02

Fibra de carbono	
Dados	Valor
Largura da tira	<i>2 cm</i>
Espaçamento	<i>10 cm</i>
Número de camadas (<i>n</i>)	3

Fonte: Autora (2022)

A configuração final da seção reforçada, de acordo com os procedimentos de cálculo e de detalhamento apresentados no tópico 5.2, é apresentada pela Figura 18.

Figura 18: Esquema da viga 02 reforçada ao cisalhamento (dimensões em metros)



Fonte: Autora (2022)

Nota-se que os entalhes e, conseqüentemente, os laminados de fibra de carbono não são realizados e aplicados ao longo da altura total da viga e, sim, guardando-se uma distância das bordas do elemento estrutural, neste caso *5 cm*. Ademais, vale ressaltar que os entalhes serão realizados ao longo de toda a extensão lateral da viga, em ambos os lados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentou-se e discutiu-se sobre os procedimentos de reforço de vigas de concreto armado com polímeros reforçados com fibras de carbono, pela técnica *Near Surface Mounted (NSM)*. Primeiramente, foram discutidas as razões e motivações que levam às estruturas de concreto armado a precisarem de algum tipo de reforço estrutural e, em seguida, a discussão a respeito da utilização de compósitos como alternativa para o reforço de estruturas foi introduzida.

Nesse contexto, as características e propriedades dos polímeros reforçados com fibras de carbono foram exploradas, ressaltando o fato destes compósitos apresentarem, dentre outras vantagens, uma elevada resistência à tração e baixo peso específico, o que proporciona um reforço eficiente da peça estrutural, praticamente sem modificar o peso e estética dos elementos.

Em seguida, no que tange à técnica *NSM*, foi discutido o seu conceito e as suas principais diferenças, quando comparada à técnica mais comumente empregada para reforço estrutural com polímeros reforçados com fibras. As principais vantagens dessa técnica, que tem uso bastante recente no Brasil, é o fato do reforço *NSM* estar menos exposto a impactos acidentais, danos mecânicos, incêndio e vandalismo, uma vez que fica inserido no cobrimento, além de ter maior área de contato com concreto, aumentando, assim, a adesão entre os materiais, bem como a estética da estrutura reforçada ser, praticamente, inalterada.

Após serem apresentados procedimentos adequados para a aplicação dos compósitos, discorreu-se sobre os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de reforço estrutural de polímeros reforçados com fibra à flexão e ao cisalhamento, com base nas orientações do ACI 440.2R/2017 e da NBR 6118 (2014). A partir de então, através do estudo de caso deste trabalho, foi possível descrever e utilizar os passos necessários para o dimensionamento do reforço da viga em questão.

Assim como o esperado, notou-se que a estrutura inicial, com o auxílio dos laminados de fibra de carbono, poderia ser utilizada para a nova finalidade, que demandava uma maior capacidade de carga, sem que houvesse alteração nas suas dimensões ou aumento substancial do seu peso próprio. Sendo assim, pode-se perceber a importância de se aprofundar ainda mais nos estudos desses materiais e da técnica em questão, visto que com mais conhecimento, intimidade e domínio, os profissionais estarão cada vez mais confortáveis e seguros em utilizá-la como alternativa para reforço de estruturas.

Finalmente, como sugestão para trabalhos futuros e complementação deste, sugere-se o estudo e dimensionamento de outros elementos estruturais como as lajes e os pilares reforçados com fibras de carbono, pela técnica *NSM*. Outro viés interessante seria a comparação experimental das técnicas *NSM* e *EBR*, procurando investigar e levar em conta fatores como a facilidade de execução, modos de ruptura e ganho de resistência da peça reforçada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. ABNT NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **ACI 440-2R**. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills: ACI, 2008.

ADORNO, F. V., DIAS, F. O., SILVEIRA, J. da. **Recuperação e reforço de vigas de concreto armado**. Monografia - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP Systems for strengthening concrete structures**. Farmington Hills, Estados Unidos, 2017.

ANDRADE, B. S. O. **Concreto armado: um estudo sobre o processo histórico, características, durabilidade, proteção e recuperação de suas estruturas**. Monografia - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

ARAÚJO, I. N. **Dimensionamento de reforço de elementos estruturais de concreto armado usando polímeros reforçados com fibras de carbono**. Monografia - Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2014.

ARAUJO, C. J. R. V.; PINHEIRO, L. H. B.; BRISOLA, G. M. S.; CARVALHO, B. C. S.; SAWADA, B. C.; MORENO JÚNIOR, A. L. Estudo experimental de viga de concreto armado reforçada com PRFC pela técnica NSM. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação 1.4**, 2017.

ARQUEZ, A. P. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2010. 242 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BALAGURU, P.; NANNI, A.; GIANCASPRO, J. **FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures: a guide to fundamentals and design for repair and retrofit**. New York: CRC Press, 2009.

BASTOS, P. S. S. **Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante**. Notas de aula da disciplina de Estruturas de Concreto II da Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.

BASTOS, P. S. S. **Flexão normal simples-vigas**. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2020.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. **Concreto Armado Eu Te Amo**. 2 ed. Vol. 1. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2002.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos, SP: EDUFSCar, 2014. 415 p.

CHASTRE, C. Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão-potencialidade e limitações. **REHABEND 2014-Congresso Latinoamericano Patología de la construcción, Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio**. Santander. 10p. 2014.

COELHO, M. R. F.; SILVA, L.; SENA-CRUZ, J.; BARROS, J. A. Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob acções monotónicas e de fadiga. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE)** 2011.

DALFRÉ, G. M. **Flexural and shear strengthening of RC elements**. Guimarães, 2013. 432p. Tese de Doutorado – Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

DE MELO, R. H.; TEXEIRA, A. M. A. J.; CARNEIRO, L. A. V. Vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e FRP no cobrimento do concreto. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais** 9.3, 2018: 234-250.

LEONHARD, F.; MONNIG, E. **Construções de Concreto: Princípios Básicos do Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado**. 2 ed. Vol. 1. São Paulo: Interciencia, 1982.

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

MACHADO, A. P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. Disponível em: <[manual-fibra-de-carbono.pdf \(viapol.com.br\)](#)>. Acesso em 12 de Maio de 2022.

MACHADO, A. P. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2002.

MARTHA, L. F. **Introdução à análise de estruturas**. Notas de aula. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <[CIV1112 - Sistemas Estruturais na Arquitetura II - 2004.1 \(puc-rio.br\)](#)> Acesso em 15 de Maio de 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MORAES, M. H. M.; FRANCKLIN, H. M.; DALFRE, G.; GHIASSI, B. **Vigas de concreto armado reforçadas segundo a técnica TRM: Revisão sistemática da literatura**, 2021

NETO, T. G. P.; SOUSA, J. L. C.; SOUSA, B. F. M.; FROTA, J. I. P.; LIMA, E. M. F. Análise teórica comparativa entre os tipos de reforço estrutural aplicados em vigas de concreto armado. **Research, Society and Development** 10.13, 2021.

OLIVEIRA, M. C. **Análise do comportamento estrutural e durabilidade de pilares de concreto armado reforçados com manta de GFRP**. 2019.115p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de São Carlos, 2019.

OLIVEIRA, P. D. de. **Reforço de um pavimento de concreto armado usando fibras de carbono: estudo de caso**. Trabalho de conclusão de curso de graduação – Engenharia Civil – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2020.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P.; SARTORTI, A. L. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Capítulo 10 – Cisalhamento em vigas. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

SILVA FILHO, J. J. H. **Reforço à torção de vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono**. Tese de Doutorado - PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, L. G. **Estudo comparativo de sistemas estruturais – estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) na engenharia civil. João Pessoa, 2018.

SOUZA, R. A.; FERRARI, V. J. **Automatic design of the flexural strengthening of reinforced concrete beams using fiber reinforced polymers (FRP)**. Acta Scientiarum, pp. 157-165, 2012.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2009.

SCHNEIDER, F. H.; SCHULTZ, J. L.; WIERBICKI, L. R. **Análise do desempenho da ancoragem do reforço de fibras de carbono em vigas submetidas à flexão**. BS thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

SCHULTZ, J. L.. **Análise numérica de normas sobre o reforço estrutural com compósitos reforçados de fibra de carbono (CFRP) em vigas de concreto armado submetidas ao cisalhamento**. MS thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

WIERZBICKI, L. R. **Análise do desempenho da técnica de reforço NSM (Near Surface Mounted) com fibras de carbono em vigas submetidas à flexão**. MS thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.