

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JACQUELINE DA LUZ SCHULTZ

**ANÁLISE NUMÉRICA DE NORMAS SOBRE O REFORÇO ESTRUTURAL COM
COMPÓSITOS REFORÇADOS DE FIBRA DE CARBONO (CFRP) EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS AO CISALHAMENTO**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2021**

JACQUELINE DA LUZ SCHULTZ

**ANÁLISE NUMÉRICA DE NORMAS SOBRE O REFORÇO ESTRUTURAL COM
COMPÓSITOS REFORÇADOS DE FIBRA DE CARBONO (CFRP) EM VIGAS DE
CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS AO CISALHAMENTO**

**Numerical analysis of standards for structural reinforcement with carbon fiber
reinforced polymers (CFRP) in reinforced concrete beams subject to shear.**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil (PPGEC), da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

**CURITIBA
2021**



Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.



JACQUELINE DA LUZ SCHULTZ

**ANÁLISE NUMÉRICA DE NORMAS SOBRE O REFORÇO ESTRUTURAL COM COMPÓSITOS
REFORÇADOS DE FIBRA DE CARBONO (CFRP) EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS AO
CISALHAMENTO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 20 de Agosto de 2021

Prof Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Arthur Medeiros, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Carlos Eduardo Rossigali, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 20/08/2021.

Dedico àqueles que me
acompanharam nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e Nossa Senhora por terem me abençoado e iluminado em mais essa etapa da minha vida.

Agradeço imensamente meus pais, Emerson e Eni, meus irmãos, Jean, Janayna e Murilo, minha madrasta Sirlei e minha cunhada Aline pelo apoio e motivação para conseguir vencer os obstáculos que surgiram ao longo do caminho.

Agradeço ao Rafael, meu noivo e companheiro de todas as horas pela paciência, carinho e incentivo que sempre me deu. Encanta-me sua capacidade de cuidar de mim tão bem.

Agradeço ao meu doador voluntário de medula óssea, quem não conheço, mas considero meu anjo protetor, que salvou minha vida sem nem saber quem eu sou.

Agradeço a toda minha família, avós, tios, tias, primos, primas e colegas da família que conhecem minha história e me apoiaram o tempo todo, não me deixando desistir em nenhum momento.

Agradeço a todos meus colegas do programa, com quem pude dividir as dificuldades e dúvidas sobre a jornada. Em especial a Luisa, quem me ajuda desde a graduação.

Agradeço as minhas amigas tão especiais pela força: Ana Paula, Ana Caroline, Jana Beatriz, Alessandra, Priscila Caroline e Priscila Santos.

Agradeço aos médicos, enfermeiros, técnicos e toda a equipe do Setor de Transplante de Medula Óssea do Hospital de Clínicas do Paraná pela dedicação e empenho em cuidar de mim e reestabelecer minha saúde. O sucesso desse procedimento foi graças a eles.

Agradeço ao meu orientador professor Dr. Wellington Mazer, pelos ensinamentos, paciência, incentivo e dedicação nesse trabalho e pela amizade ao longo desses vários anos de convivência. Aos professores Dr. Arthur Medeiros e Dr. Carlos Rossigali pela colaboração na concretização desta dissertação.

E por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agência de fomento, Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

SCHULTZ, Jacqueline da Luz. **Análise numérica de normas sobre o reforço estrutural com compósitos reforçados de fibra de carbono (CFRP) em vigas de concreto armado submetidas ao cisalhamento.** 2021. 78f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

O estudo de estruturas de concreto armado é fundamental para o conhecimento do prazo de vida útil da peça, bem como de um programa de manutenção preventiva. Várias são as causas de deterioração da estrutura, levando à necessidade de recuperação, reforço ou limitação de utilização da construção. Após o diagnóstico de uma manifestação patológica, define-se a intervenção a ser aplicada. Dentre os materiais para reforço estrutural em viga de concreto, há o emprego de materiais compósitos. Assim, faz-se necessário o estudo deste material. Compósitos reforçados com fibras são formados pela matriz, que une os macro-componentes e dá forma ao material e a fibra, que tem como papel principal resistir a grande parte da carga aplicada no sistema. Os três tipos mais comuns de fibra são vidro, aramida e carbono, sendo este último o foco deste estudo, comparando o reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado por meio de normas internacionais, visto que no Brasil não há regulação para este material. Por isso, foram realizados estudos teóricos e numéricos sobre o assunto, através da análise numérica de três normas internacionais. Foram analisados diferentes parâmetros de equacionamento dos métodos ACI *Committe* 440.2R (2017), CEB-FIP *Bulletin* 14 (2001) e CNR-DT 200.R1 (2013). Com a obtenção dos dados de resistência de acordo com a variável em estudo, foram realizadas comparações entre os métodos escolhidos, com diferentes tipos de aplicações. Ao comparar os diferentes modelos estudados, o modelo do ACI 440.2R (2017) se apresenta mais arrojado, ou seja, valores mais altos entre os demais modelos ocorrem nos quatro parâmetros analisados, enquanto que o modelo CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) é o mais conservador, ou seja, com valores mais baixos. Em termos de consideração de parâmetros dos modelos, o destaque o modelo CNR-DT 200.R1 (2013) que considera a tensão de aderência entre o substrato e o reforço, enquanto as outras normas não.

Palavras-chave: Concreto armado. Reforço estrutural. Cisalhamento. Compósitos de fibra de carbono (CFRP).

ABSTRACT

SCHULTZ, Jacqueline da Luz. **Numerical analysis of standards for structural reinforcement with carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in reinforced concrete beams subject to shear.** 2021. 78p. Dissertation (Master) – Postgraduate Program in Civil Engineering. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

The study of reinforced concrete structures is essential for understanding the useful life of the part, as well as a preventive maintenance program. There are several causes for the deterioration of the structure, leading to the need for restoration, reinforcement or limitation in the use of the construction. After the diagnosis of a pathological manifestation, the intervention to be applied is defined. Among the materials for structural reinforcement in concrete beams, there is the use of composite materials. Thus, it is necessary to study this material. Fiber-reinforced composites are formed by the matrix, which unites the macro-components and gives shape to the material and the fiber, whose main role is to resist most of the load applied to the system. The three most common types of fiber are glass, aramid and carbon, the latter being the focus of this study, comparing shear reinforcement in reinforced concrete beams using international standards, as there is no regulation for this material in Brazil. Therefore, theoretical and numerical studies on the subject were carried out, through the numerical analysis of three international standards. Different equations parameters of the ACI Committee 440.2R (2017), CEB-FIP Bulletin 14 (2001) and CNR-DT 200.R1 (2013) methods were analyzed. With the obtaining of strength data according to the variable under study, comparisons were made between the chosen methods, with different types of applications. When comparing the different models studied, the ACI 440.2R (2017) model is bolder, that is, higher values among the other models occur in the four parameters analyzed, while the CEB-FIP model: Bulletin 14 (2001) is the most conservative, that is, with lower values. In terms of considering the parameters of the models, the highlight is the CNR-DT 200.R1 (2013) model, which considers the bonding stress between the substrate and the reinforcement, while the other standards do not.

Keywords: Reinforced concrete. Structural reinforcement. Shear. Carbon fiber composites (CFRP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Expectativa de vida útil prevista das edificações.	19
Figura 2 - "Lei de Sitter" ou "Lei de evolução dos custos".....	20
Figura 3 - Diagramas de tensão uniaxial versus deformação para diferentes FRPs e aço.	25
Figura 4 - Ampliação da matriz polimérica.....	27
Figura 5 - Diagramas tensão <i>versus</i> deformação da fibra e matriz.	28
Figura 6 - Analogia à treliça de Ritter e Mörsch.....	30
Figura 7 - Trajetória de tensões principais no Estádio I.....	31
Figura 8 - Distribuição de tensões no Estádio I.....	32
Figura 9 - Distribuição de tensões no Estádio II.	32
Figura 10 - Distribuição de tensões no Estádio III.....	33
Figura 11 - Forças internas em uma viga fissurada com armadura de cisalhamento.	34
Figura 12 - Distribuição da força cortante interna em viga de concreto armado.	34
Figura 13 - Possíveis disposições do reforço ao cisalhamento	37
Figura 14 - Distribuição do reforço ao cisalhamento contínuo e com espaçamentos.	40
Figura 15 - Orientação das fibras de carbono na aplicação do reforço ao cisalhamento.	41
Figura 16 - Orientação bi-axial das fibras de carbono a 45° e 90°.	41
Figura 17 - Indicações de largura, espaçamento e inclinação da fibra de carbono.	45
Figura 18 - Ângulos das fibras de carbono e das fissuras no reforço.....	49
Figura 19 - Ilustração do reforço ao cisalhamento com CFRP e indicações de largura e espaçamento.....	50
Figura 20 - Representação do reforço ao cisalhamento com CFRP e suas medidas.....	52
Figura 21 - Planta de formas da viga em estudo.	54
Figura 22 - Representação das armaduras da viga em estudo.....	54
Figura 23 - Análises da capacidade de carga para o método ACI 440.2R (2017).	60
Figura 24 - Variação da carga resistente em função de wf/sf	61
Figura 25 - Análises da capacidade de carga para o método CEB-FIP: <i>Bulletin</i> 14 (2001). ...	62
Figura 26 - Variação da capacidade de carga em função de wf/sf e ρf	63
Figura 27 - Análises da capacidade de carga para o método CNR-DT 200.R1 (2013).	64
Figura 28 - Variação da capacidade de carga em função de wf/sf	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas das resinas.....	25
Tabela 2 - Características dos diferentes tipos de fibras.	26
Tabela 3 - Variáveis utilizadas na análise paramétrica.	55
Tabela 4 - Características técnicas de manta de fibra de carbono de uso geral.	56
Tabela 5 - Dados para a análise paramétrica do número de camadas de reforço.....	56
Tabela 6 - Dados para a análise paramétrica da largura de reforço.	57
Tabela 7 - Dados para a análise paramétrica do espaçamento do reforço.....	57
Tabela 8 - Dados para a análise paramétrica da altura do reforço.	58
Tabela 9 – Resultados da relação largura/espaçamento do reforço.....	59
Tabela 10 – Espaçamento entre lâminas para $w_f = 10$ cm.	59
Tabela 11 – Carga resistente em função do número de camadas (em kN).	66
Tabela 12 – Carga resistente em função da largura da lâmina (em kN).	66
Tabela 13 – Carga resistente em função do espaçamento da lâmina (em kN).....	66
Tabela 14 – Carga resistente em função da altura da lâmina (em kN).....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estados limites de uma estrutura.....	21
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

- α = ângulo de inclinação da armadura transversal (barras e estribos)
- V_{nR} = resistência nominal ao esforço cortante da viga após reforço
- V_f = força cortante da fibra
- Ψ_f = coeficiente de minoração do CRFP
- V_μ = esforço cortante solicitante
- \emptyset = coeficiente mínimo da capacidade resistente ao cisalhamento
- A_f = área da fibra
- f_f = tensão limite de ruptura da fibra
- β = ângulo de inclinação das fibras
- d_f = profundidade da lâmina
- s_f = espaçamento da lâmina
- n = número de camadas
- t_f = espessura de uma camada
- w_f = largura da lâmina
- f_{fe} = esforço efetivo na fibra de carbono
- ε_{fe} = deformação no reforço de fibra de carbono atuante na falha
- E_f = módulo de elasticidade da fibra de carbono
- ε_{fu} = deformação última da fibra de carbono
- L_e = comprimento de ligação efetiva
- θ = ângulo da fissura diagonal em relação ao eixo longitudinal da peça
- b_f = largura da folha de fibra de carbono
- ρ_f = taxa de reforço
- p_f = espaçamento de centro a centro entre as lâminas
- f_{cm} = tensão de ruptura media do concreto
- k_v = coeficiente de redução de ligação
- V_c = força cortante do concreto
- V_a = força cortante dos agregados
- V_d = força cortante de cálculo
- V_s = força cortante da armadura transversal
- V_n = resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado com estribos
- b_w = largura da alma da viga

d = distância do centroide da armadura tracionada à fibra oposta mais comprimida
 τ_{wd} = tensão de cálculo de cisalhamento
 f_{cd} = resistência de cálculo do concreto à compressão
 h = altura da seção transversal da viga
 τ_{wu} = tensão nominal última de cisalhamento
 τ_d = minoração da tensão de cálculo
 τ_c = tensão de correção do valor de τ_d no cálculo da resistência do concreto ao cisalhamento
 f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão
 ρ_1 = menor taxa de armadura longitudinal de tração
 $A_{s,apoi}$ = área da seção transversal de armadura de apoio
 b = largura da seção de concreto
 A_{sw} = contribuição da armadura de cisalhamento existente na viga
 s = espaçamento dos estribos
 f_{yd} = resistência de cálculo do escoamento do aço
 z = distância entre os centroides da armadura longitudinal de tração e o da região comprimida do concreto
 s_{fmax} = espaçamento máximo entre as faixas de reforço
 ϕV_n = resistência ao cisalhamento com fator de segurança
 V_u = esforço cortante solicitante
 $\varepsilon_{fd,e}$ = deformação de tensão de cálculo efetiva da fibra de carbono
 $\varepsilon_{fk,e}$ = deformação característica
 k = fator de redução
 $\varepsilon_{f,e}$ = valor médio da deformação efetiva
 V_{Rd} = reforço ao cisalhamento com sistema CFRP
 $V_{Rd,s}$ = contribuição do aço ao cisalhamento
 $V_{Rd,f}$ = contribuição da fibra de carbono ao cisalhamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.2 OBJETIVO GERAL	15
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 JUSTIFICATIVA	16
1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	16
1.6 DESCRIÇÃO SUCINTA DA DISSERTAÇÃO	17
2 ESTUDO DA LITERATURA	18
2.1 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL	18
2.2 REPARO E REFORÇO ESTRUTURAL	21
2.3 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS	23
2.4 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO.....	26
2.5 CISALHAMENTO NO CONCRETO ARMADO	29
2.5.1 Tensões de Cisalhamento em Vigas	31
2.5.2 Resistência ao Cisalhamento em Vigas de Concreto com Armadura Transversal	33
2.5.3 Método de Dimensionamento de Vigas de Concreto Armado ao Cisalhamento.....	35
2.6 REFORÇO AO CISALHAMENTO COM FIBRAS DE CARBONO	37
2.6.1 Espaçamento do Reforço ao Cisalhamento	39
2.6.2 Orientação das Fibras de Carbono	40
2.7 MODOS DE RUPTURA.....	42
2.8 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO AO CISALHAMENTO.....	43
2.8.1 Método ACI <i>Committe</i> 440.2R (2017).....	44
2.8.2 Método CEB-FIP: <i>Bulletin</i> 14 (2001)	49
2.8.3 Método CNR-DT 200.R1 (2013)	51
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	53
3.1 APLICAÇÃO PRÁTICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO	53
3.2 VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO	55
4 RESULTADOS E ANÁLISES	59
4.1 APLICAÇÃO PRÁTICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO	59
4.2 VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO	60

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1 CONCLUSÕES	68
5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento de estruturas de concreto se faz cada vez mais necessário, já que estas estão presentes em praticamente todas as construções civis (BEBER, 2003). Por vezes, a capacidade de atender ao desempenho solicitado pela peça é comprometida, o que leva a alteração na estrutura e a não adequação às exigências mínimas de normas, apresentando manifestações patológicas, que devem ser identificadas, ter encontradas as causas e ter definidas as soluções adequadas para uma intervenção (SOUZA e RIPPER, 2009).

Situações como estas fazem com que surjam fissurações nas vigas e em elementos não estruturais, bem como diminuição da capacidade resistente, levando ao comprometimento estético e estrutural. A partir disso, há a necessidade de reforço das estruturas afetadas.

A escolha do tipo de reforço está diretamente ligada a uma série de questões, como custo, tempo de execução, modificação estética da estrutura, durabilidade e confiabilidade. Existem materiais e procedimentos utilizados para aumentar a capacidade resistente ao cisalhamento de vigas.

Dentre as opções disponíveis, uma alternativa é o uso de sistemas compósitos estruturados com fibras de carbono, do inglês *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) aderidos externamente às estruturas (MACHADO, 2002).

Os compósitos são formados pela junção de dois ou mais materiais com diferentes características. Há muito tempo, já vêm sendo usado em áreas como a aeronáutica, devido a sua ótima resistência mecânica. Depois, a aplicação expandiu para outros setores, como a indústria naval, automobilística, telecomunicações, construção civil, entre outras (MENON, 2008).

Segundo Bukhari *et al.* (2010), os ensaios já realizados com vigas reforçadas com fibras de carbono se restringem a vigas simplesmente apoiadas sem estribos de aço com envoltório lateral completo ou apenas em “U”, envolvendo apenas três seções da peça.

Atualmente, o Instituto Americano de Concreto (ACI 440.2R, 2017), o Conselho Euro-Internacional de Concreto, da França (CEB-FIP *Bulletin* 14, 2001) e o Conselho Nacional de Pesquisa, da Itália (CNR-DT 200.R1, 2013) definem diretrizes para reforçar vigas de concreto armado com CFRP a partir de equações definidas empiricamente por Khalifa *et al.* (1998) e Antonopoulos e Triantafillou (2003). No Brasil, ainda não há uma normatização consolidada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Várias são as maneiras de se reforçar uma peça de concreto armado, seja esta feita a partir de materiais compósitos, isto depende sob qual ação está submetida, quais os fatores internos (por exemplo, escassez de armadura) e externos da sua modificação (por exemplo, arquitetura da construção). Além disso, deve ser feito o estudo da aplicação do material quanto à localização da peça, tempo necessário para a intervenção e quais são os custos. Recentemente, estudos vêm sendo realizados para a aplicação de materiais compósitos em reforço estrutural, com a intenção de incrementar a capacidade resistente da estrutura (SCHNEIDER *et al.*, 2017).

Considerando as divergências das localidades, a cultura, o clima e a economia, a aplicação de CFRP em cada região torna-se particular. Com isso, antes de se adotar normas internacionais, juntamente com especificações brasileiras, é necessário que sejam realizadas comparações numéricas no contexto nacional, para verificar a aplicabilidade do método de reforço.

Esta pesquisa está inserida na área de concentração de “Construção Civil”, na Linha de Pesquisa “Materiais, Estruturas e Geotecnia” do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Para o desenvolvimento deste estudo, serão utilizadas características de materiais compósitos de fibras de carbono disponíveis em recentes pesquisas sobre o material no âmbito nacional e mundial em análises numéricas.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar numericamente diferentes normas técnicas para o dimensionamento de reforço estrutural com fibras de carbono em elementos de concreto armado submetidos ao esforço de cisalhamento.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir da avaliação global dos trabalhos analisados, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar os parâmetros de diferentes modelos matemáticos para o reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado com CFRP;
- Comparar diferentes modelos para o dimensionamento de reforço ao cisalhamento utilizando CFRP;

- Fazer o dimensionamento de uma viga de concreto armado para o reforço com CFRP ao cisalhamento.

1.4 JUSTIFICATIVA

Desde o início dos estudos de reforço de estruturas de concreto armado, têm-se buscado os melhores resultados de um material muito resistente, de fácil aplicação e que não gere problemas de durabilidade às estruturas, como por exemplo, a corrosão das armaduras. Neste contexto, começa-se a utilização dos compósitos de fibra de carbono como solução para reforço estrutural (SOUZA e RIPPER, 2009).

No Brasil, esta técnica tende a ser cada vez mais difundida devido a suas características. Com isso, o mercado tem a necessidade de novos estudos e aplicações na área, bem como de profissionais habilitados e conhecedores do assunto, que tenham origem no país, utilizando as marcas aqui existentes internacionais. Ademais, as peças reforçadas com este tipo de material recebem pouca modificação estética e estrutural, o que contribui para que não tenham suas dimensões e peso próprio aumentados significativamente e o ambiente onde a peça se localiza tenha sua arquitetura alterada.

Para manter o acompanhamento do desenvolvimento desses materiais, suas respectivas técnicas de aplicação e métodos de cálculo, há a necessidade de pesquisas atuais nesse segmento. Para compatibilizar os métodos e estudos já publicados, é necessário um estudo, tanto dos trabalhos quanto das normas internacionais, para que se simplifiquem os cálculos para reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado, correlacionando as diferentes relações matemáticas para o reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado.

1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O presente trabalho será limitado a uma análise paramétrica das normas ACI 440.2R (2017), CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) e CNR-DT 200.R1 (2013) para o sistema de reforço em “U”. Também serão feitas análises unicamente para sistemas de reforço estrutural com fibras de carbono que utilizam mantas de uso geral, com resistência última (f_{fc}) igual a 3.790 MPa, módulo de elasticidade (E) igual a 220GPa e deformação específica (ϵ) igual a 1,2%, conforme informações de fabricantes nacionais.

1.6 DESCRIÇÃO SUCINTA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, descritos adiante.

No Capítulo 1, inicia-se a Introdução, apresentando o tema abordado, estabelecendo o problema de pesquisa e sua delimitação, os objetivos gerais e específicos da dissertação. Além disso, também há a justificativa dessas etapas e estudo.

O Capítulo 2, chamado Estudo da Literatura, traz as principais teorias e definições relativos ao cisalhamento em vigas de concreto armado e ao reforço estrutural ao cisalhamento com CFRP, suas propriedades físicas e mecânicas, além das vantagens e desvantagens deste material. Também apresenta equações e meios de dimensionamento da viga ao cisalhamento e ao reforço com fibras de carbono.

No terceiro capítulo, Procedimentos Metodológicos, é descrita a metodologia utilizada para a realização deste trabalho, apresentando os diferentes tipos de dimensionamento aplicados para o reforço de vigas ao cisalhamento com CFRP.

O capítulo seguinte, Resultados e Análises, apresenta dados, tabelas e gráficos obtidos com a aplicação dos diferentes métodos de dimensionamento estudados, discutindo e comparando os valores.

No Capítulo 5, Considerações Finais, são apresentadas as conclusões, as consequências dos números encontrados e propostas para futuros trabalhos acadêmicos.

2 ESTUDO DA LITERATURA

Nesta etapa da pesquisa, a bibliografia estudada se delimita a estruturas de concreto armado que necessitam de reforço estrutural, utilizando materiais compósitos, principalmente, fibras de carbono. Esta investigação teve como base um levantamento bibliométrico, evidenciando os principais autores e materiais escolhidos que tratam do tema de estudo. O capítulo é dividido em oito subitens, na sequência: Durabilidade e vida útil; Reparo e reforço estrutural; Compósitos com fibras; Compósitos reforçados com fibras de carbono; Cisalhamento no concreto armado; Reforço ao cisalhamento com fibras de carbono; Modos de ruptura e Dimensionamento do reforço de fibras de carbono ao cisalhamento.

2.1 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

De acordo com Neville e Brooks (2013) e Mehta e Monteiro (2014), o concreto é o material de construção civil mais utilizado no mundo. Isso se deve a três importantes fatores. Primeiro, relativo à sua resistência a água, o que não ocorre com madeira e aço; segundo, sua facilidade em se moldar a diferentes formas estruturais, devido à sua plasticidade no estado fresco e terceiro, seu baixo custo e fácil disponibilidade.

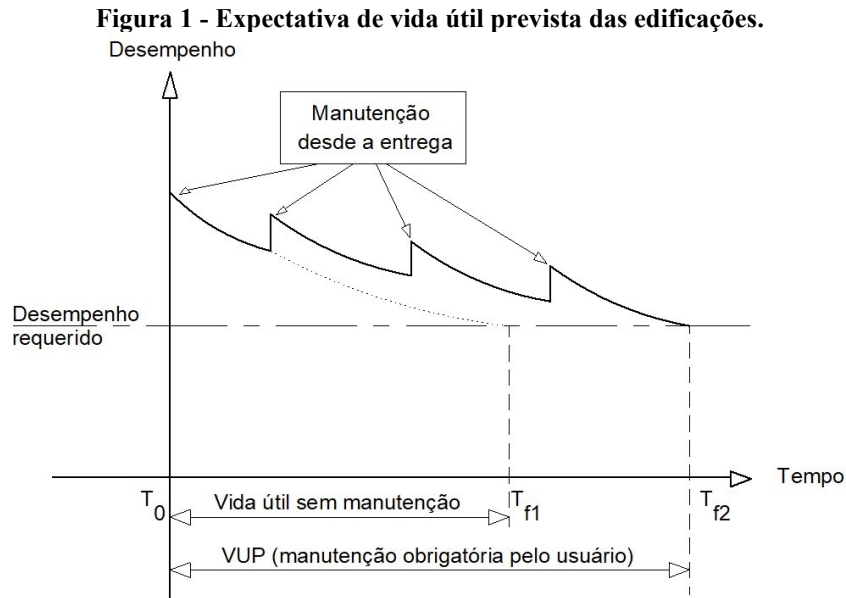
Assim como em qualquer outro material construtivo, as estruturas de concreto armado possuem uma vida útil média definida de acordo com a sua utilização e finalidade (MACHADO, 2015). Para Souza e Ripper (2009), entende-se por vida útil o período no qual as propriedades do material permanecem acima do limite especificado em norma. O conhecimento da vida útil da estrutura é fundamental para o programa de manutenção preventiva. Já o desempenho é o resultado do trabalho desenvolvido em projeto, construção e manutenção, fazendo com que a peça se comporte adequadamente em serviço durante sua vida útil.

“Hoje, os edifícios são mais altos e esbeltos, a concepção privilegia grandes vãos, há menos pilares e as lajes apresentam espessura reduzida. Essas características, sem dúvida, trouxeram implicações e tornaram as estruturas mais deformáveis, introduzindo nas alvenarias maiores tensões” (LOPES e NETTO, 2014).

A durabilidade pode ser medida pela unidade de tempo de vida útil de uma estrutura ou seus sistemas, elementos e componentes. A vida útil de projeto (VUP) é definida pelo arquiteto ou engenheiro projetista e a vida útil estimada (VUE) é a previsão de durabilidade para o produto baseada em dados históricos e ensaios específicos, segundo a norma de

desempenho (ABNT, 2013). Para prolongar a vida útil da edificação e garantir uma menor redução do seu desempenho, realizam-se manutenções periódicas, conforme ilustrado na

Figura 1.

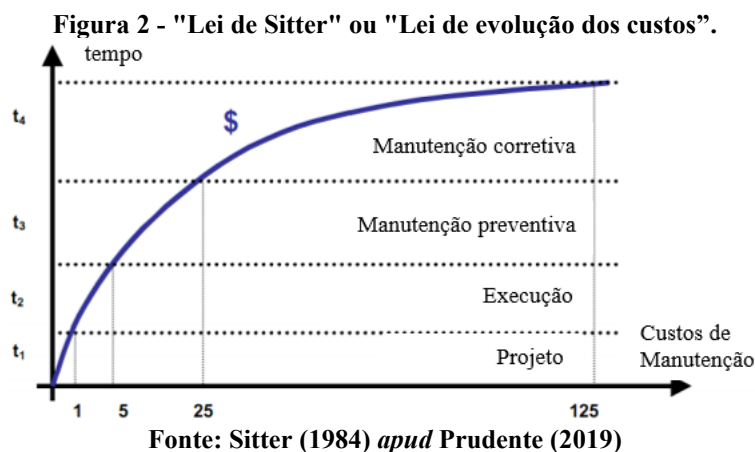


Fonte: ABNT NBR 15575 (2013)

A cada manutenção preventiva realizada, o desempenho é retomado até um certo ponto, prolongando a vida útil da edificação, conforme previsto em projeto (ABNT NBR 15575, 2013).

Para que a estrutura não tenha sua vida útil drasticamente reduzida ou até mesmo seja afetado seu desempenho, faz-se necessário o uso da manutenção preventiva (MACHADO, 2015). A situação ideal é que o projeto seja desenvolvido de forma que a construção seja bem executada e que o trabalho da manutenção seja facilitado, minimizando a deterioração (SOUZA e RIPPER, 2009).

A Lei de evolução de custos de manutenção (SITTER, 1984 *apud* PRUDENTE, 2019) mostra que os custos crescem segundo uma progressão geométrica. Conforme passa o tempo, mais difíceis são de executar as correções e muito mais caras. Como mostrado na Figura 2, ao dividir as etapas construtivas e de uso em quatro períodos, que correspondem a projeto, execução, manutenção preventiva e manutenção corretiva, cada uma terá um custo relativo, seguindo uma razão geométrica igual a cinco (PRUDENTE, 2019).



Segundo Sitter (1984) *apud* Prudente (2019), adiar uma intervenção é o mesmo que aumentar os custos diretos em razão cinco vezes maior. Quanto antes fizer a intervenção, menor será o custo. Assim, se no projeto o custo da intervenção for uma unidade, na execução custará cinco unidades, na manutenção preventiva vinte e cinco unidades e na manutenção corretiva cento e vinte e cinco unidades.

De maneira geral, as estruturas de concreto possuem um longo período de vida útil. Contudo, seus requisitos podem se alterar durante esse período. Em algum momento no futuro, a estrutura poderá ter que suportar uma carga maior do que aquela para a qual foi projetada ou podem surgir novas exigências normativas. Existem também situações em que ocorrem erros durante a fase de projeto ou de construção, fazendo com que seja necessário reforçar as peças estruturais, antes, durante ou depois de já estarem em funcionamento (JUVANDES, 1999).

O custo de uma recuperação ou reforço de estruturas de concreto é diretamente relacionado à solução adotada, abrangendo execução, mão de obra e gastos futuros com manutenção. A análise de todo o processo é muitas vezes determinante na avaliação da viabilidade econômica do projeto (SOUZA e RIPPER, 2009).

Lopes (2019) estudou as principais soluções para resolver as manifestações patológicas no concreto armado, suas causas, formas de prevenção e recuperação, para seu melhor desempenho. Utilizando uma análise estatística, foi possível apontar quantitativa e qualitativamente os diferentes problemas que surgem nas construções, encontrar suas causas e a frequência com que aparecem, além dos custos gerados. Na escolha de uma alternativa de intervenção, o profissional deve formular um plano e conhecer a disponibilidade de recursos técnicos e financeiros para a execução do projeto.

Para Possan (2010), o estado limite de durabilidade é definido a partir de estudos de degradação e previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, definindo valores aceitáveis de desempenho e degradação das estruturas, conforme é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Estados limites de uma estrutura.

Tipo	Descrição	Exemplos
Estado Limite Último (ELU)	Esgotamento da capacidade resistente da estrutura. Refere-se a eventos que apresentam consequências irreversíveis à estrutura, geralmente associados a elevados prejuízos.	Perda de seção; Propagação da corrosão; Ruptura; Colapso; Fadiga; Solicitações dinâmicas.
Estado Limite de Serviço (ELS)	Relacionados a eventos que restringem de alguma forma a adequada utilização da estrutura, como aparência, conforto do usuário e sua boa utilização funcional. Neste caso, os prejuízos de ordem econômica são restritos e não são esperadas perdas humanas.	Despassivação; Início da corrosão; Início da fisuração; Danos pontuais; Vibrações; Manchas, entre outros.
Estado Limite de Durabilidade (ELD) *Não definido pela NBR 6118	Refere-se aos valores mínimos aceitáveis para o desempenho ou os máximos aceitáveis para a degradação.	Estimativa de vida útil de projeto reduzida

Fonte: Possan (2010)

Segundo alguns pesquisadores (JUVANDES *et al.*, 2012; IRSHIDAT *et al.*, 2015; ANDREOLLI, 2016; BATISTA *et al.* 2017; LEE *et al.*, 2018), a utilização de compósitos reforçados com fibras é uma alternativa moderna para os trabalhos de recuperação e reforço estrutural devido às vantagens que apresenta, tais como a leveza, a resistência à corrosão, a alta resistência mecânica e o curto prazo para aplicação.

2.2 REPARO E REFORÇO ESTRUTURAL

De acordo com Souza e Ripper (2009) as atividades de reforço estrutural envolvem trabalhos com a finalidade de aumentar ou reconstituir a capacidade resistente de uma estrutura, enquanto as atividades de reparo não visam alterar a capacidade estrutural do elemento. Durante um procedimento de reforço, Machado (2015) menciona que se deve ter cuidado com o material existente (que geralmente está deteriorado) e com o detalhamento da estrutura, que pode não retratar a real situação estrutural da peça.

Piancastelli (1998) cita que devem ser observadas algumas propriedades ou características dos materiais a serem empregados, como: resistência à tração, flexão e cisalhamento; resistência a ataques químicos; módulo de elasticidade; coeficiente de dilatação térmica; resistência à abrasão; além da aderência do material ao concreto ou aço.

De acordo com Ali *et al.* (2013), muitos materiais podem ser utilizados para o reforço estrutural, inclusive no reforço ao cisalhamento, sendo os materiais mais comuns o concreto armado e o aço. Porém, esses materiais apresentam problemas de execução (exigência de espaço para confecção) e de durabilidade (menor resistência a intempéries e chamas, por

exemplo), sendo que o uso de polímeros reforçados com fibras está se apresentando como alternativa para minimizar esses problemas.

Helene (1992) recomenda que sejam tomadas medidas de proteção da estrutura após qualquer intervenção, com a implantação de um programa de manutenção periódica, que deve levar em consideração a importância da obra, a previsão de vida útil e a natureza dos materiais e métodos adotados.

A definição dos materiais e técnicas de correção a serem empregados depende das exigências de funcionamento e do diagnóstico do problema, além de se considerar a região em que se encontra a peça. Por exemplo, em estruturas que tenham a necessidade de aplicação de carga pouco tempo após a execução do reparo e/ou reforço, pode-se utilizar sistemas à base de epóxi ou poliéster (HELENE, 1992).

Souza e Ripper (2009) pontuam os materiais, métodos ou técnicas mais utilizadas para o reforço de peças estruturais de concreto armado:

- Armaduras de complementação;
- Adição de chapas e perfis metálicos;
- Protensão exterior;
- Reforço externo com concreto;
- Mantas de fibras de carbono.

O reforço de viga de concreto através de aumento de seção da estrutura ou da área de aço é um dos métodos utilizados para incremento de resistência, de acordo com Pérez e Espert (2016). Contudo, nos casos onde se amplia a seção, há o aumento do peso próprio da estrutura, o impacto estético e arquitetônico do reforço e pode trazer problemas no seu uso, devido ao aumento das dimensões da peça (PÉREZ e ESPERT, 2016).

Para Karbhari e Zhao (2000), o emprego de aço e concreto (materiais convencionais) no reforço das estruturas apresenta grandes vantagens, principalmente devido a sua tradição, fácil obtenção e baixo custo de implementação. Todavia, esses materiais não apresentam a longevidade necessária e capacidade resistente em relação a outros materiais e novas tecnologias, como, por exemplo, o reforço estrutural com materiais compósitos (BEBER, 2003; BALAGURU *et al.*, 2009; ELSHAFFEY *et al.*, 2014; RASHEED, 2014).

Segundo Araújo (2002.a) e Batista *et al.* (2017), os compósitos reforçados com fibras de carbono surgem como alternativa moderna para locais em que a técnica tradicional de aumento de seção com concreto e aço não se apresenta adequada ou viável.

2.3 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Compósitos reforçados com fibras são materiais poliméricos confeccionados com fibras de alta resistência e uma matriz para uni-las de forma estrutural (BALAGURU *et al.*, 2009; RASHEED, 2014). Estes são uma combinação de dois ou mais elementos diferentes que possuem uma interface macroscópica entre si (SCHWARTZ, 1984; MANO, 1991; CALLISTER, 2008).

A matriz é o material principal que envolve o componente chamado disperso. Os dispersos determinam a estrutura interna do compósito, enquanto a matriz une os macro-componentes e dá forma ao compósito (BEBER, 2003; FARIA, 2007).

Os materiais compósitos se comportam em função da natureza, da forma, arranjo estrutural e da interação entre os componentes, segundo a norma ACI 440.2R (2017). As propriedades gerais do compósito são determinadas pelas propriedades e características de cada componente empregado. Além de seus constituintes, as propriedades dos compósitos dependem da distribuição das fases e da sua geometria.

O arranjo do disperso na matriz determina sua homogeneidade e uniformidade. Se o componente é disposto uniformemente, o material é homogêneo e há menor possibilidade de falha nas áreas mais frágeis. A anisotropia da peça é afetada pela orientação e geometria dos dispersos (DANIEL e ISHAI, 1994; BALAGURU *et al.*; 2009; ACI 440.2R, 2017).

A classificação do compósito varia conforme o tipo do componente disperso, segundo Callister (2008):

- Particulares, se o reforço for feito por partículas (mesma dimensão em todas as direções);
- Fibrosos, se o disperso for feito por fibras (diâmetro menor que o comprimento);
- Compósitos estruturais.

O principal papel da fibra é resistir a grande parte da carga aplicada ao sistema composto. Conforme seja a matriz, o percentual de volume da fibra no material pode variar de 30 a 75% (MALLICK, 1993). Os materiais compósitos, especialmente aqueles com fibras, diferentemente do aço, não sofrem corrosão eletroquímica e resistem aos efeitos corrosivos de álcalis, ácidos, sais e outros agentes agressivos (HOLLAWAY, 1993; BALAGURU *et al.*, 2009; CHASTRE, 2014).

Em princípio, a matriz é responsável pela união das fibras que formam o compósito, agindo como o meio através do qual as solicitações externas são transmitidas e distribuídas para

as fibras. Pela matriz é absorvida apenas uma parcela muito pequena desta solicitação (HOLLAWAY, 1993; CALLISTER, 2008).

Segundo Beber (2003), outra função da matriz polimérica é atuar como uma barreira das fibras, pois, forma uma camada entre estas e o ambiente, protegendo-as da umidade, abrasão, oxidação e agentes agressivos químicos e biológicos, além de ser responsável por manter as fibras na posição correta.

Para Hollaway (1993), os papéis da matriz polimérica devem ser:

- Unir as fibras e protegê-las durante o manuseio, fabricação e ao longo da sua vida útil;
- Dispersar e separar as fibras de maneira ordenada, a fim de evitar a propagação de fissuras e a consequente ruptura do compósito;
- Transferir de maneira integral as tensões para as fibras por atrito ou adesão;
- Ser térmica e quimicamente compatível com a fibra.

Existe uma grande variedade de matrizes disponíveis no mercado para a fabricação de compósitos com fibras. As matrizes poliméricas podem ter origem em resinas termorrígidas e termoplásticas, sendo a primeira a matriz ideal para os compósitos fibrosos, porque proporcionam, dentre outras vantagens, boa estabilidade térmica, boa resistência química e baixa fluência (ACI 440.2R, 2017).

As resinas epóxis podem ser formuladas em uma grande variedade de formas a fim de fornecer um amplo espectro de características e propriedades mecânicas e representam uma importante classe dos polímeros termorrígidos e sendo comercializados desde a década de 1940 (HOLLAWAY, 1993). Ademais, apresentam excelente aderência a diversos tipos de fibras e substratos, são resistentes a ações químicas e apresentam baixa retração térmica (JUVANDES *et al.*, 1996).

De acordo com Rizkalla e Mufti (2011) e Pivatto (2017), são comumente utilizadas na engenharia estrutural as resinas epóxi de formulações bi-componentes, com o agente principal sendo a resina e um catalisador, que promove o seu endurecimento. As fibras promovem aos sistemas compósitos suas propriedades de resistência e espessura, podendo ser consideradas o “esqueleto” do material. As fibras de carbono são originárias do tratamento térmico (carbonização) de fibras orgânicas, tais como poliacrilonitril (PAN) ou com base em derivados do petróleo em um ambiente inerte (MACHADO, 2015).

Algumas propriedades mecânicas importantes das resinas são apresentadas na Tabela 1 para caracterização de matrizes poliméricas dos compósitos.

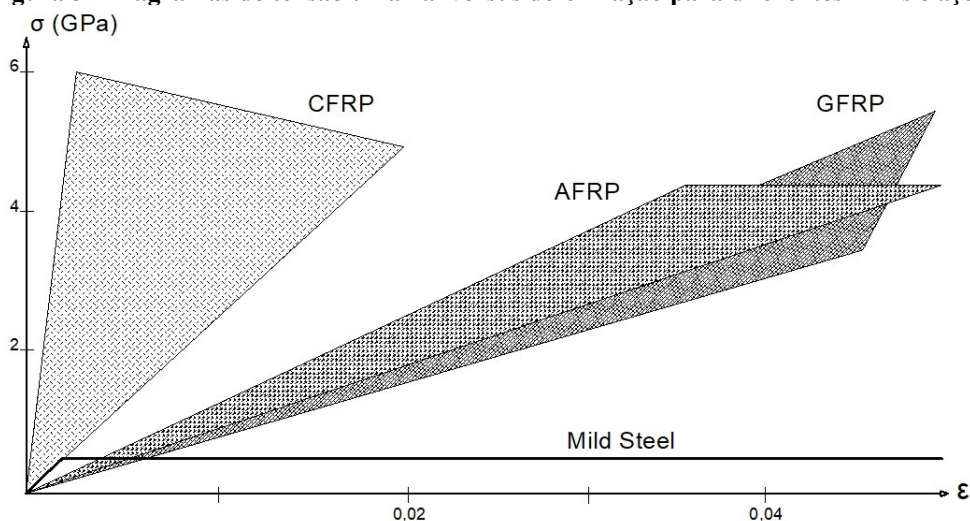
Tabela 1 - Propriedades mecânicas das resinas.

Propriedade	Resinas		
	Poliéster	Éster-vinílico	Epóxi
Resistência à tração (MPa)	20 – 100	79 – 90	55 – 130
Módulo de elasticidade (GPa)	2,1 – 4,1	3,0 – 3,3	2,5 – 4,1
Deformação na ruptura (%)	1 – 6	3,9 – 5,2	1 – 9
Resistência à flexão (MPa)	125	110 – 149	131
Peso específico (kN/m ³)	9,8 – 14,2	10,9 – 12,9	10,8 – 12,7

Fonte: Beber (2003)

Devido ao CFRP apresentar comportamento elástico-linear até a ruína, é de fundamental importância determinar o seu nível de deformação, e sua limitação deve garantir a adequada segurança da estrutura reforçada. Na Figura 3 é possível comparar a relação tensão *versus* deformação dos três tipos de compósitos mais utilizados na construção civil.

Figura 3 - Diagramas de tensão uniaxial versus deformação para diferentes FRPs e aço.

Fonte: CEB-FIP: *Bulletin 14* (2001)

Considera-se CFRP como compósito de fibra de carbono; AFRP como compósito de fibra de aramida; GFRP como compósito de fibra de vidro e *Mild steel* como aço comum sob carregamento monotônico de curto prazo. A capacidade de deformação do aço comum é muito inferior aos valores obtidos pelos compósitos reforçados com polímeros (CEB-FIP: *Bulletin 14*, 2001).

Na Tabela 2, encontram-se as características principais dos três diferentes tipos de fibras. Os valores expostos correspondem a dados obtidos de ensaios com carga estática, sem exposição ao exterior.

Tabela 2 - Características dos diferentes tipos de fibras.

Tipo de fibra		Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação específica última (%)
Vidro	Aluminoborosilicato de cálcio (Vidro-E)	1900 - 3000	70	3,0 – 4,5
	Aluminosilicato de magnésio (Vidro-S)	3500 - 4800	85 - 90	4,5 – 5,5
Aramida	Com módulo de elasticidade intermediário (IM)	3500 - 4100	70 - 80	4,3 – 5,0
	Com alto módulo de elasticidade (HM)	3500 - 4000	115 - 130	2,5 – 3,5
Carbono	Alta resistência	3500 - 4800	215 - 235	1,4 – 2,0
	Ultra-alta resistência	3500 - 6000	215 - 235	1,5 – 2,3
	Alto módulo de elasticidade	2500 - 3100	350 - 500	0,5 – 0,9
	Ultra-alto módulo de elasticidade	2100 - 2400	500 - 700	0,2 – 0,4

Fonte: CEB-FIP: *Bulletin 14 (2001)*

Os valores de projeto dos sistemas com compósitos devem considerar a presença da resina e suas reduções ao longo prazo, devido a carga e alterações ambientais. Essas reduções geralmente são fornecidas pelos fabricantes (CEB-FIP: *Bulletin 14, 2001*).

Verifica-se que o reforço com compósito de fibra de carbono possui maiores resistências à tração e módulos de elasticidade, quando comparados aos reforços de fibra de vidro e fibra de aramida, bem como ao aço comum (CEB-FIP: *Bulletin 14, 2001*; FERNÁNDEZ, 2016).

Considerando a baixa deformação específica, dos diferentes tipos de compósitos estruturados com fibras, para aplicação na área de infraestrutura, o CFRP é o menos propenso à falha por fadiga (ACI 440.2R, 2017).

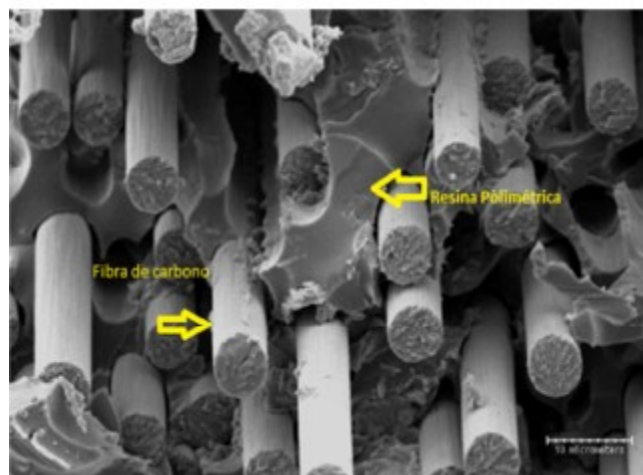
2.4 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO

As matrizes de resina epoxídica com compósitos de fibra de carbono (CFRP) apresentam um quarto do peso específico e de oito a dez vezes mais resistência à tração que o aço convencional de construção, com tensão última na ordem de 3.500 MPa, comparando-se ao mesmo módulo de elasticidade (MACHADO, 2002; SOUZA e RIPPER, 2009).

O compósito reforçado com fibra de carbono é composto por uma matriz polimérica, cuja função é manter as fibras internamente coesas, o que favorece a transferência de tensões entre o elemento estrutural e a fibra de carbono, enquanto as fibras alinhadas

unidirecionalmente dentro das matrizes poliméricas absorvem as tensões de tração advindas dos esforços solicitantes atuantes, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Ampliação da matriz polimérica.



Fonte: Machado (2002)

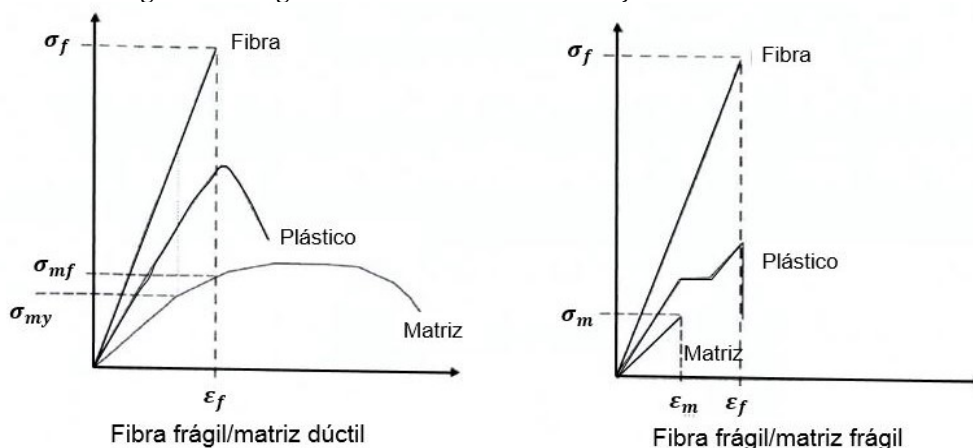
De acordo com Machado (2015), as principais características apresentadas pelos sistemas estruturados com CFRP como elemento principal são:

- Alta resistência mecânica;
- Elevada rigidez;
- Bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas excelente;
- Produto inerte à corrosão;
- Estabilidade térmica e reológica;
- Baixo peso específico (seu peso não é considerado nos cálculos).

O uso do reforço com CFRP é feito com segurança em reabilitação ou restauração de elementos estruturais de concreto armado, com manifestações patológicas específicas de enfraquecimento ou fragilização. Também feita em estruturas em condições aceitáveis, em que se deseja incrementar o esforço solicitante, o que acontece quando há mudança de destinação da área ou para minimizar erros de construção e/ou projeto (MACHADO, 2015).

Deve-se trabalhar com os sistemas CFRP de acordo com o critério da fibra com ruptura frágil e a matriz polimérica com ruptura dúctil. Com isso, assume-se que o conjunto entra em colapso devido à ruptura frágil da matriz (ACI 440.2R, 2017). As propriedades da matriz e da fibra estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Diagramas tensão *versus* deformação da fibra e matriz.



Fonte: Machado (2002)

Atualmente, o reforço feito com CFRP tem sido aplicado largamente em edifícios e obras de infraestrutura, na forma de reforço à flexão longitudinal e ao cisalhamento (DUIC *et al.*, 2018; SALAH-ELDIN *et al.*, 2019; ZHENG *et al.*, 2019). Além disso, há diferentes geometrias de vigas e tipos de seções que são reforçadas com CFRP, por ser um material encontrado em lâminas e mantas (LI e LEUNG, 2016). As formas podem ser em U, T, L, C, I, circular, retangular de canto arredondado ou placas de CFRP com aberturas (KIM *et al.*, 2014). Segundo Souza e Ripper (2009), o sistema CFRP vem sendo aplicado em pilares de pontes e viadutos a fim de melhorar o desempenho estrutural, já que ensaios demonstram um acréscimo da ductilidade destes elementos de concreto armado quando reforçados pelas folhas flexíveis do compósito.

Uma desvantagem da aplicação da manta de fibra de carbono é que, quando dobrada a 90°, há uma tensão concentrada na região da curva, que pode levar à ruptura do material (EL-SAYED *et al.*, 2007). Na curva da manta, as fibras mais internas são facilmente dobradas, enquanto as externas possuem raio maior de curvatura, o que resulta na diminuição das tensões de tração na dobra (DUIC *et al.*, 2018). Costuma-se utilizar fibras de carbono de elevada resistência à tração e com módulo de elasticidade próximo ao do aço da construção, para a utilização do sistema como elemento de reforço estrutural (SOUZA e RIPPER, 2009).

De acordo com os estudos de Teng (2001) e Sarturi (2014), o rompimento de vigas reforçadas com compósitos de fibra de carbono tem como causa mais frequente o descolamento do CFRP, causado pelas tensões na interface concreto-reforço, geralmente não previsto em cálculos computacionais. Ali *et al.* (2013) observaram que para reforço envolvendo toda a seção transversal da viga a ruptura ocorre na fibra, mas para reforço em “U”, além da ruptura da fibra, também ocorre a delaminação.

Além do modo de ruptura, a direção da fibra de carbono também influencia na capacidade de carga. Bukhari *et al.* (2010), Ferreira e Cunha (2013) e Ali *et al.* (2013) observaram que as fibras posicionadas a 45° em relação ao eixo apresentam capacidade de carga maior que as fibras posicionadas a 90° com o eixo da viga, podendo chegar a um aumento de 92% da carga no primeiro caso contra 54% nas fibras posicionadas a 90°.

Fakharifar *et al.* (2016) utilizaram mantas de fibra de carbono para implementar estribos de CFRP, fabricados *in loco*. No estudo, foram analisadas vigas de concreto e colunas para o reforço. Os resultados dos ensaios demonstraram que o reforço híbrido, tanto em manta quanto em estribo, apresenta maior rigidez e resistência quando comparado aos estribos de aço comum. Schneider *et al.* (2017) avaliaram a influência da ancoragem no reforço à flexão de vigas de concreto armado tendo observado que a ancoragem reta, quando em comprimento adequado, é suficientemente capaz de garantir a eficácia do sistema, não necessitando de ancoragens extras nas extremidades. O estudo do reforço com CFRP em pilares curtos foi feito por Mendes *et al.* (2017) e verificaram que o aumento do número de camadas de reforço reduziu o deslocamento lateral, mas não produziu um aumento de carga em relação a uma única camada.

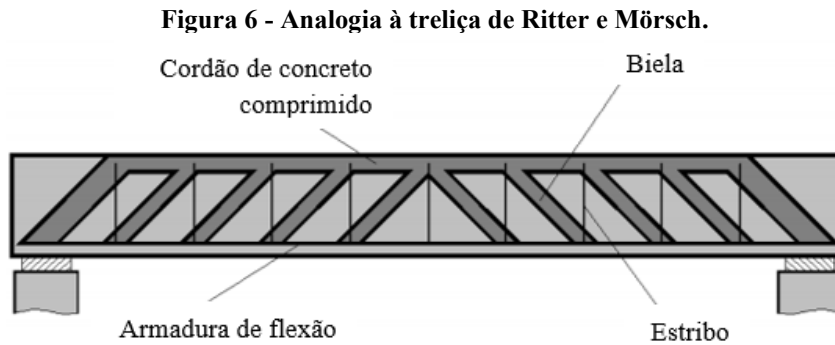
2.5 CISALHAMENTO NO CONCRETO ARMADO

Em geral, as vigas de concreto armado são submetidas simultaneamente ao momento fletor e a força cortante (PINHEIRO *et al.*, 2016). Após o surgimento de fissuras inclinadas, devido à combinação de força cortante, momento fletor e fortuitamente forças axiais, é iniciada a ruptura por efeito do cisalhamento. O número de variáveis que interferem na ruptura é muito grande, como dimensões da viga, geometria, classe do concreto, características do carregamento, resistência do concreto, armaduras longitudinal e transversal, entre outros (BASTOS, 2015).

A força cortante transferida para as vigas de concreto armado depende muito das resistências da peça à tração e à compressão. Com isso, a ruptura frágil é possível de acontecer, devendo se realizar corretamente o dimensionamento das vigas ao esforço cortante (BASTOS, 2015). Segundo Machado (2002), deve-se verificar a capacidade resistente do elemento estrutural a ser reforçado, para, depois disso, ser realizado o dimensionamento do sistema de reforço com fibra de carbono.

O modelo clássico de treliça, idealizado por Ritter e Morsch, no início do século XX, baseia-se na correspondência entre uma viga fissurada e uma treliça (PINHEIRO *et al.*, 2016). Morsch admitiu que uma viga bi-apoiada de seção retangular, após a fissuração, tem seu

comportamento análogo ao de uma treliça, formada pelos elementos: banzo superior – cordão de concreto comprimido, banzo inferior – armadura longitudinal de tração, diagonais comprimidas – bielas de concreto entre as fissuras, diagonais tracionadas – armaduras de cisalhamento, como é possível visualizar na Figura 6.



Fonte: Pinheiro *et al.* (2016)

Segundo Pinheiro *et al.* (2016), para essa analogia, deve-se considerar as seguintes hipóteses básicas:

- 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°.

Para Lobo Carneiro (1964) *apud* Bastos (2015),

“A chamada treliça clássica de Ritter-Mörsch foi uma das concepções mais fecundas na história do concreto armado. Há mais de meio século tem sido a base do dimensionamento das armaduras transversais – estribos e barras inclinadas – das vigas de concreto armado, e está muito longe de ser abandonada ou considerada superada. As pesquisas sugerem apenas modificações ou complementações na teoria, mantendo, no entanto o seu aspecto fundamental: a analogia entre a viga de concreto armado, depois de fissurada, e a treliça”. (LOBO CARNEIRO, 1964).

A partir de pesquisas experimentais, verificou-se que a analogia à Treliça de Ritter e Mörsch leva a um excesso de armadura transversal devido a diversas causas, entre estas (SAVARIS, 2016):

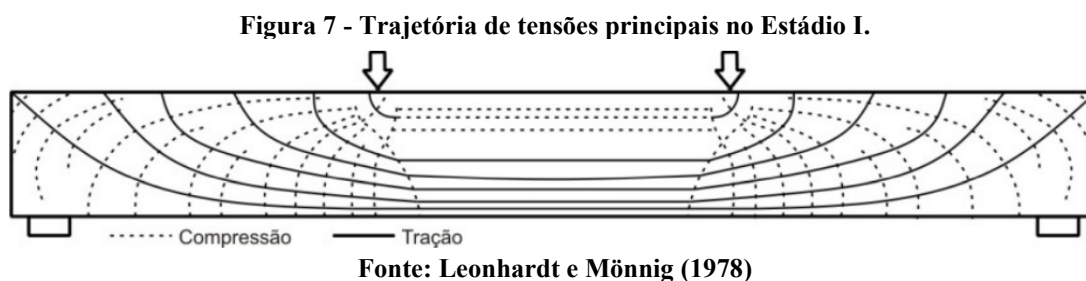
- O ângulo das bielas não é constante, alguns são menores que 45°;
- Os nós da armadura não formam rótulas perfeitas e a treliça é hiperestática;
- Os banzos não são paralelos na prática, levando ao encurvamento do banzo comprimido, especialmente próximo aos apoios;

- Parte da força cortante é incorporada à zona comprimida da peça;
- Devido ao efeito de pino, a quantidade de armadura longitudinal influencia na reação da armadura transversal.

2.5.1 Tensões de Cisalhamento em Vigas

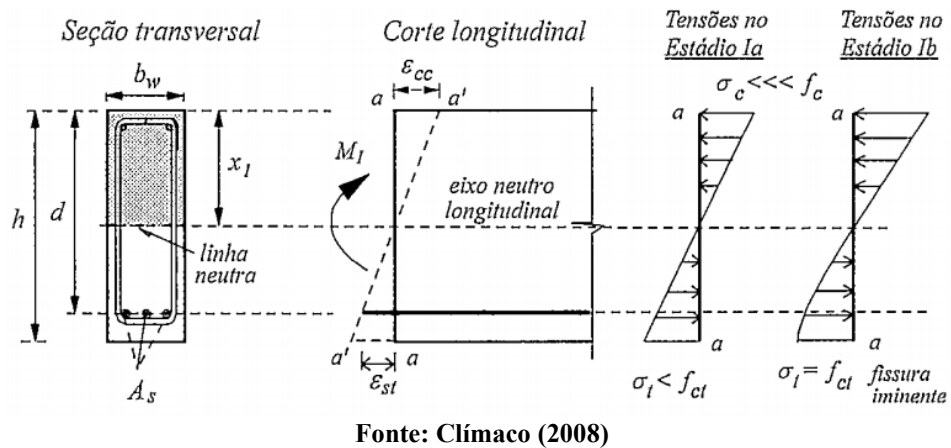
Um carregamento transversal qualquer aplicado em uma viga gera tensões normais, advindas do momento fletor e tensões tangenciais, ocasionadas pela força cortante (SAVARIS, 2016). Com isso, forma-se um estado bi-axial de tensões de tração e compressão, que pode ser caracterizado em três estádios de deformações distintas (ABNT, 2014).

Na Figura 7 são apresentados os caminhos percorridos pelas tensões principais de uma viga bi-apoiada submetida a duas cargas pontuais iguais e simétricas, na fase elástica. As trajetórias são linhas e as suas tangentes mostram as direções das tensões principais de compressão e de tração. Percebe-se que estas variam ao longo da altura da peça e que no nível da linha neutra, as tensões apresentam inclinação de 45° ou 135° (LEONHARDT e MÖNNIG, 1978).



No Estádio I, o nível de carga aplicada é de baixa intensidade. A peça não apresenta nenhuma fissura e comportamento elástico dos materiais. Já que a resistência à tração do concreto não é superada pela tensão de tração, considera-se que o material é homogêneo. Com isso, as tensões atuantes são determinadas utilizando os conceitos de mecânica dos sólidos (ABNT, 2014; SAVARIS, 2016). O estágio termina assim que a seção apresenta a primeira fissuração junto à face tracionada. Como a resistência do concreto à tração é baixa, se comparada com a resistência à compressão, neste estágio é inviável o dimensionamento da estrutura (PINHEIRO, 2007). Na Figura 8 é possível visualizar a distribuições das tensões na seção transversal submetida à flexão no Estádio I.

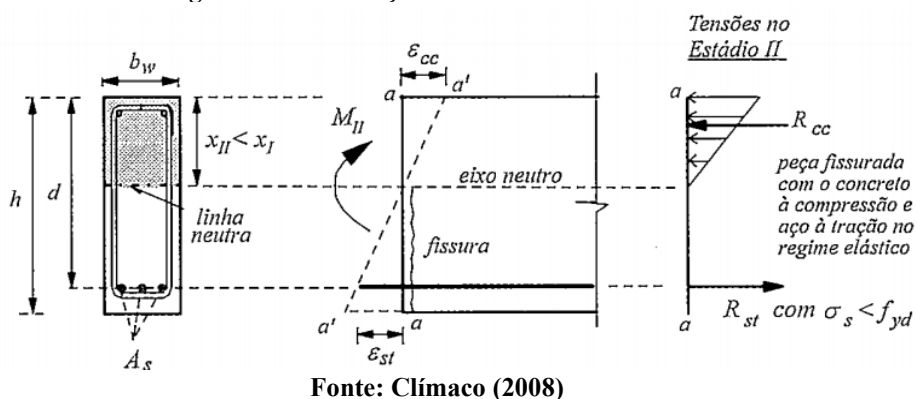
Figura 8 - Distribuição de tensões no Estádio I.



Denominada Estádio II, a segunda fase começa quando a resistência à compressão é superada pelas tensões de tração, culminando em fissuras e forçando a armadura a absorver as tensões de tração, enquanto o concreto continua na fase elástica em sua zona comprimida. Esse estágio possui dois momentos diferentes. No primeiro, as fissuras se formam na proporção em que a carga aumenta e no segundo é quando as fissuras se estabelecem e não surgem novas; somente as aberturas e extensões das existentes aumentam. As fissuras caminham em direção às linhas de compressão, levando a uma distribuição dos esforços para as armaduras de cisalhamento e para as diagonais comprimidas de concreto (ABNT, 2014; SAVARIS, 2016; PINHEIRO *et al.*, 2016).

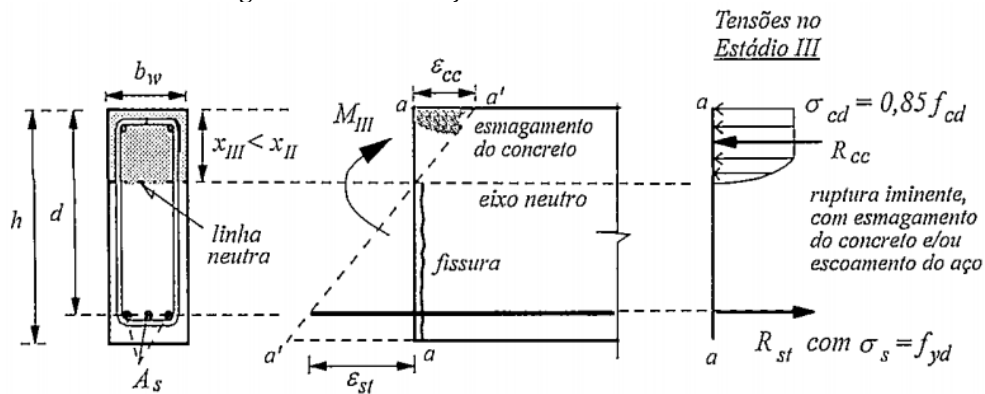
De acordo com os cálculos dos Estados Limites de Serviço, esse é o comportamento elástico previsto de uma viga submetida à flexão, ou seja, a peça fissurada. Assim sendo, a tensão tangencial, na área abaixo da linha neutra, é estipulada pelo momento estático da armadura, considerando-a constante entre a linha neutra e a armadura, de acordo com a Figura 9. Este estágio termina com o começo da plastificação do concreto comprimido (CLÍMACO, 2008).

Figura 9 - Distribuição de tensões no Estádio II.



Quando se inicia a plastificação do concreto, a seção passa para o Estádio III, no qual a estrutura se apresenta muito fissurada. Nesta etapa, a ruptura por esforço cortante pode acontecer, como é demonstrado na Figura 10, com a distribuição das tensões na seção transversal da peça de concreto armado (SAVARIS, 2016).

Figura 10 - Distribuição de tensões no Estádio III.



A linha neutra se encaminha em direção à zona comprimida e ocorre o escoamento do aço e/ou esmagamento do concreto. A determinação do momento fletor da viga nesse estágio é correspondente à verificação do Estado Limite Último (ELU). Ao dimensionar uma viga de concreto armado à flexão no ELU, estabelece-se um adequado coeficiente de segurança para que a peça não atinja esse estágio (CLÍMACO, 2008).

2.5.2 Resistência ao Cisalhamento em Vigas de Concreto com Armadura Transversal

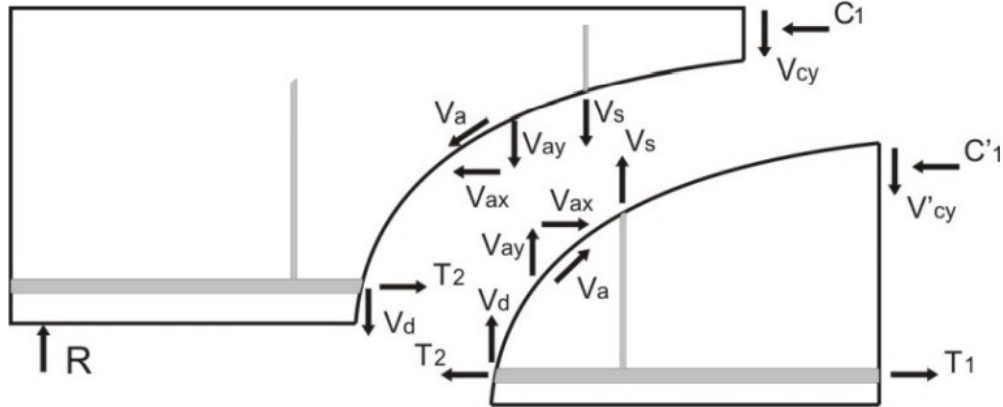
A parcela de resistência última ao cisalhamento é reduzida pela fissuração da viga provocada pela flexão, capaz de chegar a valores menores que a resistência à flexão. Com isso, o dimensionamento só garante a segurança das estruturas utilizando uma área de armadura transversal mínima (ABNT, 2014; SAVARIS, 2016).

Os estribos sofrem, no início do carregamento, as mesmas deformações que o concreto a sua volta, não evitando que as fissuras apareçam. Porém, o uso de estribos limita a abertura de fissuras e incrementa a resistência última, por causa do engrenamento dos agregados (DESNERCK *et al.*, 2009).

De acordo com Wight e MacGregor (2009), em vigas de concreto com armadura transversal o equilíbrio das forças atuantes, depois de uma fissura inclinada, dá-se pelas componentes da força cortante no concreto não fissurado ou na zona comprimida (V_c), a passagem de forças pelos agregados engrenados nas superfícies das fissuras inclinadas (V_a) e o

efeito de pino da armadura longitudinal (V_d). Da mesma forma que vigas sem armadura transversal, mas com uma componente a mais, a de tração (V_s), pois a presença dessa área de aço que atravessa a fissura dificulta sua expansão, conforme é possível ver na Figura 11.

Figura 11 - Forças internas em uma viga fissurada com armadura de cisalhamento.



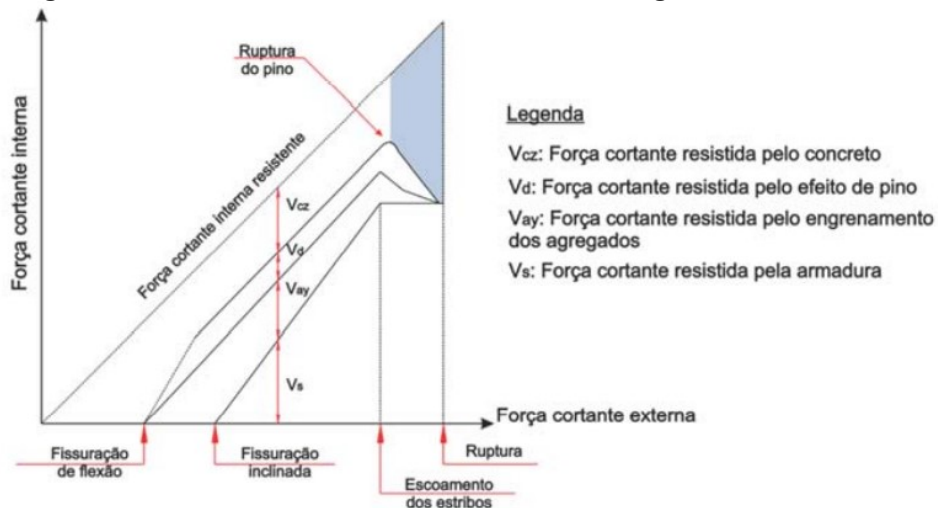
Fonte: Wight e MacGregor (2009)

Assim, a resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado com estribos (V_n) é constituída pelas duas parcelas, conforme a Equação (1).

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

Wight e MacGregor (2009) analisaram o processo gradativo do início do carregamento até a ruptura de uma viga de concreto armado ao cisalhamento, durante a formação e solicitação dos meios de resistência, conforme é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Distribuição da força cortante interna em viga de concreto armado.



Fonte: Wight e MacGregor (2009)

À medida que as tensões de cisalhamento aumentam, as faixas de resistência variam na estrutura. Desta forma, toda a tensão cisalhante é resistida pelo concreto não fissurado, antes da formação de fissuras de flexão (WIGHT e MACGREGOR, 2009).

2.5.3 Método de Dimensionamento de Vigas de Concreto Armado ao Cisalhamento

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) mantém a hipótese básica de comparar a viga fissurada com uma treliça de banzos paralelos. Possibilita também considerar inclinações diferentes de 45° para as bielas de compressão (diagonais comprimidas), a adoção de novos valores para a força cortante absorvida por mecanismos complementares da treliça e incluir a resistência do concreto à compressão pela região fissurada (f_{cd2}).

De acordo com as recomendações da norma, o dimensionamento da armadura transversal das vigas lineares de concreto armado é para resistir aos esforços da força constante, de acordo com a treliça de Mörsch, com bielas inclinadas a 45°. A tensão convencional de cisalhamento na alma da viga é feita pela Equação (2) (MACHADO, 2015).

$$\tau_{wd} = \frac{V_d}{b_w \cdot d} \quad (2)$$

onde:

V_d : esforço cortante de cálculo;

b_w : largura da alma da viga;

d : distância do centroide da armadura tracionada à fibra oposta mais comprimida;

τ_{wd} : tensão de cálculo de cisalhamento.

A fim de assegurar que não haja esmagamento de biela comprimida do concreto, o valor de τ_{wd} é limitado em relação ao valor de τ_{wu} (tensão nominal última de cisalhamento), apresentando os valores de acordo com a inclinação da armadura longitudinal.

- Para peças lineares com $b_w \leq 5 \cdot h$, com toda armadura transversal inclinada a 45° em relação ao eixo da peça, tem-se a Equação (3).

$$\tau_{wu} = 0,30 f_{cd} \leq 5,5 \text{ MPa} \quad (3)$$

- Para peças lineares com $b_w \leq 5 \cdot h$, em todos os outros casos, tem-se a Equação (4).

$$\tau_{wu} = 0,25f_{cd} \leq 4,5 \text{ MPa} \quad (4)$$

onde:

f_{cd} : resistência de cálculo do concreto à compressão (kgf/cm²);

h : altura da seção transversal da viga.

Se τ_{wd} for maior que τ_{wu} , utilizar $\tau_{wd} = \tau_{wu}$.

A minoração da tensão de cálculo (τ_d) é dada pela Equação (5).

$$\tau_d = 1,15 \cdot \tau_{wd} - \tau_c \geq 0 \quad (5)$$

Sendo:

τ_c : tensão de correção do valor de τ_d no cálculo da resistência do concreto ao cisalhamento.

Assim, para encontrar o valor de τ_c , deve-se utilizar a Equação (6).

$$\tau_c = \Psi_1 \sqrt{f_{ck}} \quad (6)$$

onde:

$\Psi_1 = 0,07$ para $\rho_1 \leq 0,001$;

$\Psi_1 = 0,14$ para $\rho_1 \geq 0,015$;

f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão (kgf/cm²);

ρ_1 : menor taxa de armadura longitudinal de tração no trecho de comprimento $2 \cdot h$ marcado a partir da face apoio.

Para se obter essa taxa de armadura, utiliza-se a Equação (7).

$$\rho_1 = \frac{A_{s,apoio}}{b \cdot h} \quad (7)$$

Sendo:

$A_{s,apoio}$: área da seção transversal de armadura de apoio (cm²);

b : largura da seção de concreto (cm).

O esforço cortante atuante pode ser absorvido de duas formas (ABNT, 2014):

- a. Totalmente absorvida pelos estribos;

- b. Por meio da atuação conjunta de estribos e barras dobradas, ficando a responsabilidade de absorver ao menos 40% do esforço aos estribos.

A contribuição da armadura de cisalhamento existente na viga (A_{sw}) é calculada a partir da Equação (8).

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_d}{z(\sin \alpha + \cos \alpha)f_{yd}} \quad (8)$$

onde:

α : ângulo de inclinação da armadura transversal (barras e estribos) relativamente ao eixo longitudinal da peça;

s : espaçamento dos estribos;

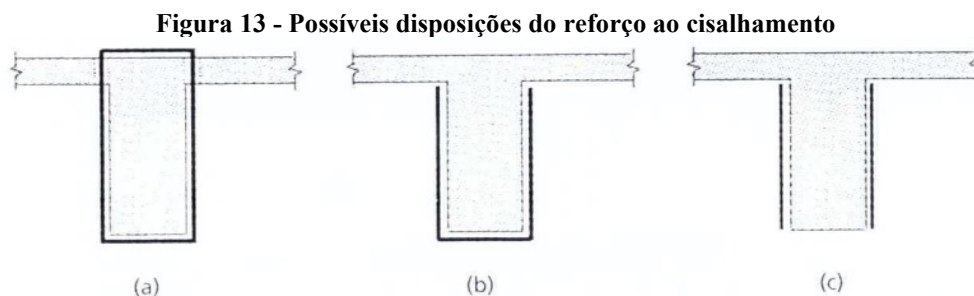
f_{yd} : resistência de cálculo do escoamento do aço (kgf/cm^2);

z : distância entre os centroides da armadura longitudinal de tração e da região comprimida do concreto.

Com isso, a Equação (1) representa a capacidade resistente das peças ao esforço cortante, somando as parcelas de força cortante resistida pelo concreto na seção estudada e a força cortante resistida pelo aço transversal existente na seção.

2.6 REFORÇO AO CISALHAMENTO COM FIBRAS DE CARBONO

Os sistemas estruturados com fibras de carbono possibilitam a aplicação do reforço ao cisalhamento do elemento de concreto armado de diversas maneiras. As seções de concreto armado são envolvidas pelos sistemas com as fibras ordenadas transversalmente com a finalidade de incrementar as diagonais da treliça de Morsch, similar aos estribos de aço (MACHADO, 2002). As disposições mais comuns para o reforço ao cisalhamento estão apresentadas na Figura 13.



Fonte: Machado (2002)

A configuração do envolvimento depende muito da geometria e seção da peça, mas existem basicamente três disposições possíveis em uma viga. A representada pela Figura 13(a) demonstra o envolvimento total da seção com a manta ou lâmina de CFRP. Esta configuração é mais utilizada quando não há lajes em sua parte superior ou inferior que impeçam o fechamento da peça.

Estudos experimentais demonstram que a grande maioria das vigas reforçadas com envolvimento completo rompem devido à ruptura do polímero. Embora o descolamento ocorra antes, é a ruptura que controla a resistência ao cisalhamento (CHEN e TENG, 2003). Esse fato se deve à maior eficácia da ancoragem presente nesse método de colagem, levando o compósito a sua máxima capacidade de suporte. Além disso, a contribuição do CFRP à resistência ao cisalhamento depende da sua configuração e orientação (BUKHARI *et al.*, 2010).

No entanto, Teo *et al.* (2017) observaram que o reforço com a manta disposta na forma de “U” apresentou um aumento de 48% na capacidade de carga e auxiliou na preservação da integridade dos estribos.

Na Figura 13(b) é demonstrado o envolvimento do tipo U, que abrange três lados da estrutura de concreto (duas laterais e a base). Esta aplicação é geralmente utilizada em vigas com laje na parte superior ou na impossibilidade da abertura de rasgos na laje para permitir a passagem da fibra. Onde existem momentos positivos na viga, essa solução é a mais eficiente, já que em momentos negativos, as fissuras de tração começam pelo topo das seções.

A disposição do reforço mostrada na Figura 13(c) ocorre quando não há a possibilidade de envolver totalmente a peça e o fundo da seção, restando apenas as duas laterais para a aplicação do reforço. Este é o método menos eficiente dos três, mas ainda assim é possível a aplicação dessa solução, evitando dobras.

O reforço ao cisalhamento de uma estrutura de concreto armado tem sua eficiência baseada em fatores como (MACHADO, 2015):

- a resistência do concreto existente;
- a natureza do carregamento;
- as condições de apoio da peça;
- a disposição possível de aplicação do reforço;
- a quantidade e o tipo de fibra de carbono utilizada.

Khaliffa *et al.* (1998) propuseram algoritmos de projeto para calcular a contribuição dos polímeros reforçados com fibras para o cisalhamento de peças de concreto armado. No

estudo, foram analisados dois modos de ruptura, sendo estes a falha na fibra de carbono e a ruptura pela delaminação da manta com a superfície do substrato.

Uma variável que influencia o desempenho do reforço ao cisalhamento com fibras de carbono é a utilização de ancoragens nas extremidades. Nesse sentido, Araújo (2002.b) observou que a utilização de ancoragem efetuada com uma faixa horizontal na alma da viga, junto à extremidade do reforço, aumenta a capacidade de carga da viga quanto ao cisalhamento. Porém, a carga atingida resultou, em média, em 90% da carga prevista em projeto utilizando o método de dimensionamento do ACI 440.2R (2017). O autor também cita que a utilização de duas camadas de reforço não conduziu a um aumento da capacidade de carga da viga. Já para reforço envelopando as vigas, o autor observou uma capacidade de carga 23% acima do estimado pelo ACI 440.2R (2017).

Em um estudo teórico e experimental, utilizando vigas com concreto de resistências de 30 MPa e de 90 MPa, Galvéz (2003) observou que, apesar de as vigas reforçadas aumentarem em mais de 53% a capacidade de carga em relação às vigas não reforçadas, para as vigas com concreto de 30 MPa, a capacidade de carga obtida no experimento ficou abaixo do valor calculado pelo método do ACI 440.2R (2017), sendo próximo de 50% do valor estimado para a resistência do reforço utilizando as fibras de carbono.

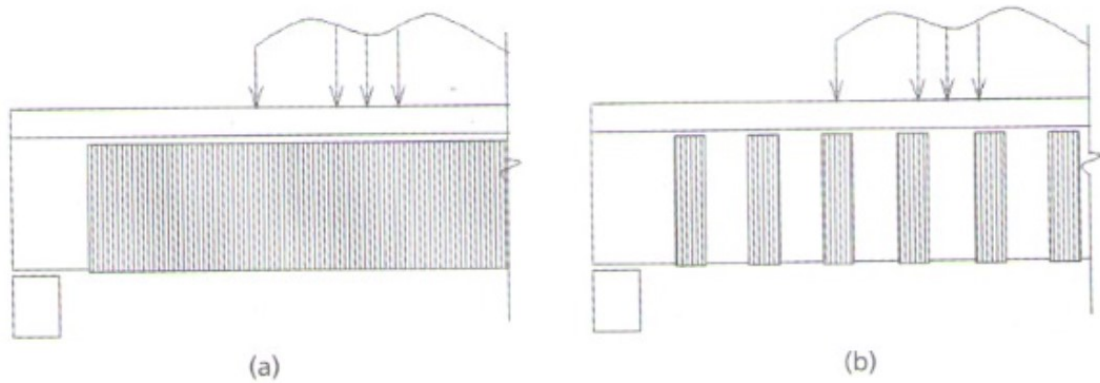
Já para o concreto com resistência de 90 MPa, a capacidade de carga observada experimentalmente no reforço se apresentou igual ao valor calculado pelo modelo ACI 440.2R (2017), exceto a viga que foi totalmente envelopada, cuja resistência experimental foi três vezes maior que o valor calculado pelo modelo.

2.6.1 Espaçamento do Reforço ao Cisalhamento

Analogamente aos estribos de aço, o reforço da seção transversal com CFRP ao cisalhamento pode ser disposto em lâminas de pequena largura com espaçamentos previamente calculados, ou ainda, através da cobertura contínua da peça (MACHADO, 2015). Estabelecer espaçamento entre as lâminas de reforço pode levar a uma economia de material, mas deve-se considerar os cálculos realizados.

Conforme é mostrado na Figura 14, o reforço pode ser feito de forma contínua (a) ou com espaçamentos calculados (b).

Figura 14 - Distribuição do reforço ao cisalhamento contínuo e com espaçamentos.



Fonte: Machado (2002)

Se for necessário utilizar o reforço contínuo e estender-se por toda a peça, deve-se tomar cuidados especiais para se certificar do controle da umidade interna da viga, bem como, casual percolação de água (MACHADO, 2002).

O espaçamento máximo entre as faixas de reforço deve ser calculado pela Equação (9).

$$S_{fm\acute{a}x} = w_f + \frac{d}{4} \quad (9)$$

Sendo:

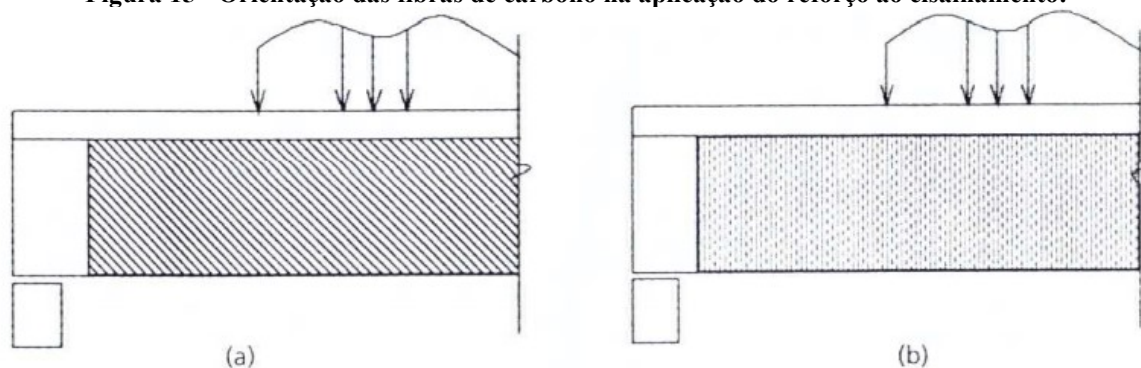
w_f : largura da lâmina de fibra de carbono.

2.6.2 Orientação das Fibras de Carbono

O tecido da fibra de carbono deve estar orientado na forma que proporcione a maior eficiência possível no reforço necessário ao cisalhamento. Isto acontece quando as fibras são aplicadas inclinadas em relação ao eixo longitudinal da peça, de maneira análoga aos estribos de aço das estruturas de concreto armado (MACHADO, 2015).

Na Figura 15(a) demonstra-se a aplicação do reforço com orientação de 45° com o eixo longitudinal da viga (horizontal) e a Figura 15(b) mostra o reforço com orientação de 90° com a horizontal.

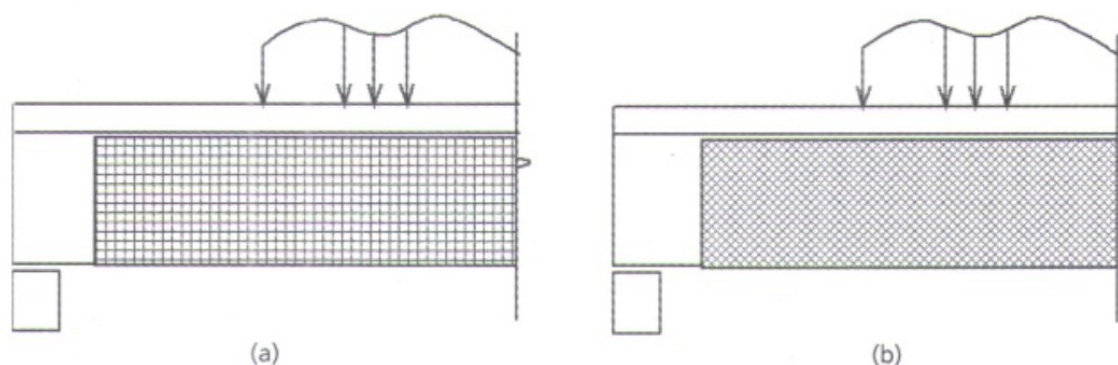
Figura 15 - Orientação das fibras de carbono na aplicação do reforço ao cisalhamento.



Fonte: Machado (2002)

De acordo com Ferreira e Cunha (2013), a melhor disposição para aplicação do reforço ao cisalhamento com CFRP é o posicionamento das fibras a 45° , pois há maior economia de material. Algumas vezes faz-se necessário o uso de uma distribuição bi-axial das fibras de carbono, com o objetivo de melhorar o comportamento geral do sistema. Isso é possível através da colocação de duas lâminas unidirecionais do tecido sobrepostas e ortogonalmente orientadas uma em relação à outra. Na maioria das vezes, a primeira camada retém a maior parte dos esforços solicitantes, enquanto a segunda limita a abertura de fissuras de cisalhamento e aumenta a aderência da camada de baixo ao concreto. As duas disposições possíveis estão apresentadas na Figura 16.

Figura 16 - Orientação bi-axial das fibras de carbono a 45° e 90° .



Fonte: Machado (2002)

Hadhood *et al.* (2019) pesquisaram a aplicação de ancoragens mecânicas ao reforço de CFRP em vigas de concreto armado, que demonstraram um impacto significativo na melhoria da capacidade resistente da viga. A aplicação híbrida de reforço externo com ancoragem mecânica obteve ganhos entre 29% e 65% de carga de cisalhamento, quando comparadas às vigas apenas com CFRP coladas sem ancoragem.

O uso de lâminas de CFRP inclinadas a 45° em vigas levou a um aumento de 33% da capacidade de carga em relação à viga sem reforço e à redução da flecha da peça para o mesmo nível de carga (AVILA *et al.*, 2021).

2.7 MODOS DE RUPTURA

Em estruturas de concreto armado, rupturas por cisalhamento costumam ser abruptas e catastróficas, de acordo com Beber (2003). Devido a isto, vigas são dimensionadas para romperem a flexão, para depois ser verificada a resistência ao cisalhamento, pois rupturas por flexão são mais dúcteis, o que permite a redistribuição de tensões e percepção dos sinais de ruínas.

Vigas com reforço de fibra de carbono ao cisalhamento rompem, principalmente, por tração do CFRP ou descolamento do reforço nas laterais da viga. A deformação do material do reforço acontece em razão da deformação excessiva do compósito, tracionado por uma abertura de fissura diagonal de cisalhamento nas laterais da viga. Ao atingir a deformação máxima, a fibra mais tracionada se rompe e a quebra se propaga ao longo da fissura de cisalhamento, levando ao colapso da peça estrutural (CHEN e TENG, 2003).

Devido ao descolamento da fibra, a ruptura acontece nas interfaces CFRP com adesivo, adesivo com concreto ou até mesmo no próprio concreto ou no próprio adesivo. Segundo Chen e Teng (2003), os descolamentos entre as interfaces dos distintos materiais não ocorrem com tanta frequência quanto a ruptura no interior do substrato do concreto, a pouca distância da interface adesivo/concreto. Ao utilizar mecanismos de ancoragem no reforço, é possível que a ruptura aconteça em suas adjacências, como em reforços do tipo “U”, onde o descolamento se dá por uma delaminação na junção entre a alma da viga e a laje. Em alguns estudos (LEONI, 2016; PIVATTO, 2017; SCHNEIDER *et al.*, 2017), a ruptura do reforço externo ocorreu na interface entre a resina epóxi e o concreto, resultando no descolamento da lâmina.

Além disso, não se descarta a ocorrência de ruptura dos modos clássicos de vigas não reforçadas, que podem ser de cisalhamento, por um sistema de reforço ineficiente ou de flexão. Quando se aplica o reforço em uma viga, em geral, a sua capacidade resistente ao cisalhamento é elevada de tal forma que o modo de ruptura passe a ser por flexão (GUEDES *et al.*, 2019). Sendo assim, os principais modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com CFRP coladas externamente são as rupturas clássicas de flexão e cisalhamento e a ruptura no sistema de reforço aplicado.

Dentre as rupturas de flexão e cisalhamento que classicamente ocorrem em vigas de concreto armado, podem-se citar a deformação plástica excessiva da armadura longitudinal, o esmagamento do concreto, a ruptura por tração e o esmagamento da diagonal comprimida de concreto.

As falhas no sistema de reforço ao cisalhamento podem ocorrer por ruptura na fibra de carbono, por descolamento no concreto, por descolamento na interface concreto/adesivo, por descolamento na interface adesivo/compósito, por descolamento no adesivo, ou seja, falha na coesão da resina) e por falha no mecanismo de ancoragem (GUEDES *et al.*, 2019).

Triantafillou (1998) observou que a eficiência do reforço com fibras de carbono coladas externamente aumenta conforme a orientação das fibras se aproxima da direção perpendicular às fissuras. No estudo, as vigas testadas evidenciaram um modo de ruptura por cisalhamento frágil, demonstrando um desenvolvimento de fissuras diagonais de tração no vão de cisalhamento constante. O aumento de carga resistida pelas vigas reforçadas foi entre 65% e 95% sobre as vigas de controle.

2.8 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO AO CISALHAMENTO

De acordo com Gamino *et al.* (2010) existem diversos modelos de dimensionamento de reforço com fibras de carbono em que os autores citam os modelos de Chen e Teng (2003), Khalifa *et al.* (1998), Chaallal *et al.* (1998), Taljsten (2003), ACI 440.2R e CEB-FIP: *Bulletin* 14, sendo apenas os dois últimos de normas internacionais. Pellegrino e Modena (2006) ressaltam que os modelos especificados nas normas internacionais consideram o efeito isolado do concreto, do aço e do reforço com fibra de carbono, porém citam que existe uma interação entre o aço e o reforço que não é considerada nos modelos. Chen e Teng (2003) apresentaram um modelo de projeto que considera uma distribuição de tensões não uniforme no reforço com fibras de carbono ao longo das fissuras de cisalhamento, sendo os resultados do modelo condizentes com resultados experimentais.

Outro estudo comparando o desempenho de experimentos laboratoriais com modelos de dimensionamento foi feito por Menon (2008), que estudou a utilização de reforços ao cisalhamento colados nas laterais, embutidos nas laterais e em forma de “U” com os resultados dados pelos modelos do ACI 440.2R e CEB-FIP: *Bulletin* 14, observando que na maioria dos casos os resultados experimentais foram maiores que os valores dados pelos modelos, exceto

os laminados colados nas duas laterais, em que o modelo do CEB-FIP: *Bulletin* 14 foi igual ao experimental.

Panigrahi (2013) observou que a disposição das fibras em “U” apresentou o melhor desempenho e que a utilização de ancoragem na extremidade evita a delaminação da fibra, além do que a colocação da fibra em ângulo de 45°/135° é mais efetiva que a fibra colocada a 90°. O autor também comparou os resultados experimentais com o modelo ACI 440.2R, sendo os resultados experimentais sempre maiores que os valores dado pelo modelo, ou seja, apresentou valores mais conservadores.

A seguir são apresentados três métodos de cálculo de dimensionamento do reforço ao cisalhamento com fibras de carbono, baseadas em normas.

2.8.1 Método ACI *Committe* 440.2R (2017)

Segundo a norma norte americana - ACI 440.2R (2017), caso o esforço solicitante de cisalhamento seja maior que a capacidade resistente da peça ao esforço cortante, faz-se necessário o uso de reforço. Neste caso, o sistema estruturado com compósitos reforçados de fibra de carbono também faz parte da capacidade resistente do concreto, de forma que a resistência ao esforço cortante passa a ser calculada de acordo com a Equação (10).

$$V_{nR} = V_c + V_s + \Psi_f V_f \quad (10)$$

onde:

V_{nR} : resistência nominal ao esforço cortante da viga após o reforço com CFRP;

V_f : esforço cortante da fibra de carbono;

Ψ_f : coeficiente de minoração do sistema CFRP, recomendado como 0,85 para reforços de três ou dois lados da peça. Para vigas totalmente embaladas ainda não há estudos notáveis, por isso, recomenda-se o valor de 0,95 para este caso (DENIAUD e CHENG, 2001; BOUSSELHAM e CHAALLAL, 2006).

O projeto de resistência ao cisalhamento de uma peça de concreto armado com reforço em fibras precisa considerar que a capacidade resistente deve ser maior que a força cortante solicitante, conforme descreve a Equação (11), de acordo com a norma ACI 318.R-05 (2004).

$$\phi V_n \geq V_u \quad (11)$$

onde:

ϕV_n : resistência ao cisalhamento com fator de segurança;

V_u : esforço cortante solicitante.

Após o reforço, deve-se obedecer a Equação (12), com coeficiente de minoração.

$$V_{nR} = \phi V_n \quad (12)$$

onde:

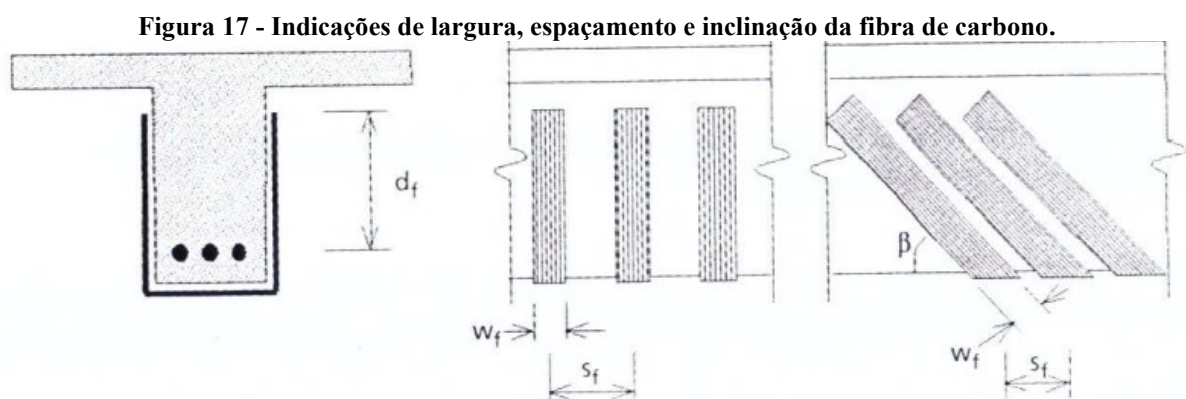
ϕ : coeficiente de minoração da capacidade resistente da viga ao cisalhamento.

Com isso, tem-se, a Equação (13).

$$V_{nR} = \phi(V_c + V_s + \Psi_f V_f) \geq V_u \quad (13)$$

Nos estudos de Khalifa *et al.* (1998), a contribuição do sistema CFRP para a resistência ao cisalhamento de um membro de concreto armado é baseada na orientação das fibras e um assumido estado de fissuras. Através da fissura resultante da força de tração no sistema de reforço é possível conhecer a resistência ao cisalhamento gerada pela peça.

Na Figura 17, há a indicação de uma seção transversal reforçada com fibra de carbono em formato “U”, onde são mostrados largura, espaçamento e inclinação das lâminas.



Fonte: Machado (2002)

A contribuição ao cisalhamento dado pelo reforço à força cortante na viga pode ser dada pela Equação (14), sendo limitado a $0,332\sqrt{f_{cd}} \cdot b_w \cdot d$,

$$V_f = \frac{A_f \cdot f_f (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} \leq 0,332 \sqrt{f_{cd}} \cdot b_w \cdot d \quad (14)$$

onde:

A_f : área da seção transversal de uma lâmina de fibra de carbono;

f_f : tensão limite de ruptura na fibra de carbono (kgf/cm²);

β : ângulo, da inclinação das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça;

d_f : altura da lâmina de CFRP para reforço ao cisalhamento na lateral da viga;

s_f : espaçamento calculado entre as lâminas de fibra de carbono.

A área da seção transversal de uma lâmina deve ser calculada pela Equação (15).

$$A_f = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \quad (15)$$

onde:

n : número de camadas de CFRP;

t_f : espessura de uma camada de fibra de carbono.

Segundo Machado (2015), normalmente se encontra $\beta = 90^\circ$. Assim, a expressão mais comum para se calcular o esforço cortante da parcela da fibra de carbono é conforme a Equação (16).

$$V_f = \frac{A_f \cdot f_f \cdot d_f}{s_f} \quad (16)$$

Finalmente, como expressão mais utilizada no dimensionamento da resistência ao esforço cortante da fibra de carbono, tem-se a Equação (17) (MACHADO, 2015).

$$\frac{w_f}{s_f} = \frac{V_f}{2 \cdot n \cdot t_f \cdot d_f \cdot f_f} \quad (17)$$

Neste caso, as duas variáveis de projeto vão ser o espaçamento e a largura das lâminas de fibra de carbono, ficando visível a relação w_f/s_f . Utilizando alguns valores adequados na expressão, encontram-se as seguintes possibilidades:

- Se $w_f/s_f < 1,0$, podem ser utilizadas lâminas com larguras determinadas e calcula-se o espaçamento;

- Se $w_f/s_f = 1,0$, utilizam-se lâminas contínuas;
- Se $w_f/s_f > 1,0$, uma camada de reforço não é suficiente; deve-se refazer os cálculos.

De acordo com a norma ACI 440.2R (2017), a tensão nominal de tração na fibra de carbono ao cisalhamento, é diretamente proporcional ao nível de deformação que pode ser desenvolvido no reforço ao cisalhamento CFRP, conforme a Equação (18).

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (18)$$

onde:

f_{fe} : esforço efetivo na fibra de carbono;

ε_{fe} : deformação no reforço de fibra de carbono atuante na falha;

E_f : módulo de elasticidade da fibra de carbono.

Em sistemas não totalmente encapsulados, ou seja, com dois ou três lados reforçados com CFRP, foi observado que a delaminação da fibra com o concreto acontece antes da perda de contato entre os agregados na seção. Desta maneira, tensões de colagem foram analisadas por Triantafyllou (1998), para determinar a utilidade desses sistemas e a eficácia do nível de tensão que pode ser alcançado pelo reforço. Para impedir este modo de falha, a deformação máxima usada para cálculo deve ser limitada a 0,4%. Assim, a deformação efetiva deve ser calculada utilizando um coeficiente de redução de ligação, aplicável ao cisalhamento (K_v), conforme apresentada na Equação (19).

$$\varepsilon_{fe} = K_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (19)$$

onde:

ε_{fu} : deformação última da fibra de carbono.

O coeficiente de redução quanto à aderência é dado em função da resistência do concreto, do tipo de aplicação do sistema de compósitos com fibras poliméricas e da rigidez do laminado. Este pode ser calculado, em unidades do Sistema Internacional, pela Equação (20).

$$K_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (20)$$

O comprimento sobre o qual a maior parte da tensão é mantida (L_e) é o comprimento de ligação ativa, dado pela Equação (21).

$$L_e = \frac{23300}{(n.t_f.E_f)^{0,58}} \quad (21)$$

O comprimento efetivo de aderência é inversamente proporcional ao número de camadas de reforço. Quanto maior a espessura do compósito, menor é a efetiva aderência dela ao concreto (MACHADO, 2015).

Além do comprimento de ligação efetiva, o coeficiente de redução também depende de dois fatores de modificação, k_1 e k_2 , responsáveis pela parcela de resistência do concreto e pela configuração da aplicação das fibras de carbono, respectivamente. As expressões para esses coeficientes são dadas nas Equações (22) e (23), em MPa.

$$k_1 = \left(\frac{f_{cd}}{27}\right)^{2/3} \quad (22)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} & \text{para envolvimento tipo "U"} \\ \frac{d_f - 2L_e}{d_f} & \text{para reforço nas laterais} \end{cases} \quad (23)$$

O processo para determinação da constante K_v considerou regiões de alto cisalhamento e baixo momento, próximos aos apoios em vigas simplesmente apoiadas com cargas invariáveis. Então, define-se que K_v seja suficientemente conservador para todos os casos.

Para desenvolver forças de tração maiores, podem ser utilizadas ancoragens mecânicas em determinados pontos (KHALIFA *et al.*, 1999). A eficácia dessas ancoragens deve ser comprovada por meio de ensaios físicos representativos.

No final, a resistência ao cisalhamento total após o reforço de fibra de carbono deve levar em consideração a soma de todas as contribuições. Assim, segundo os critérios da ACI 318-05 (2004), deve-se obedecer aos limites de verificação.

2.8.2 Método CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001)

Assume-se que no estado limite último de cisalhamento, tensão diagonal do concreto, o sistema CFRP desenvolve uma deformação efetiva na direção principal do material. A deformação efetiva (ε_{fe}), geralmente, é menor que a deformação de ruptura à tração (ε_{fu}). A capacidade ao cisalhamento de uma peça reforçada passa a ser calculada de acordo com a Equação (24).

$$V_{nR} = \min(V_c + V_s + V_f, V_{Rd2}) \quad (24)$$

A contribuição da capacidade resistente ao cisalhamento da fibra de carbono (V_f) pode ser descrita na forma da Equação (25).

$$V_f = 0,9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_f \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (25)$$

onde:

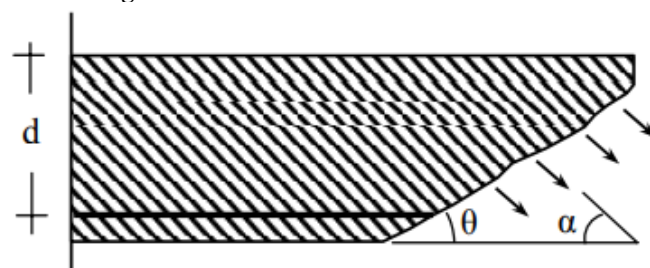
$\varepsilon_{fd,e}$: deformação efetiva de cálculo da fibra de carbono;

θ : ângulo da fissura diagonal em relação ao eixo longitudinal da peça, assumindo-se igual a 45°;

α : ângulo entre o eixo longitudinal da peça e a orientação da fibra principal.

As indicações dos ângulos e dimensões da viga utilizadas no cálculo para dimensionamento do reforço de fibra de carbono estão descritas na Figura 18.

Figura 18 - Ângulos das fibras de carbono e das fissuras no reforço.



Fonte: CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001)

A taxa de reforço do sistema (ρ_f), citada na Equação (25), pode ser calculada de duas formas, conforme Equações (26) e (27).

$$\rho_f = \frac{2t_f \sin \beta}{b_w} \quad \text{para reforço contínuo} \quad (26)$$

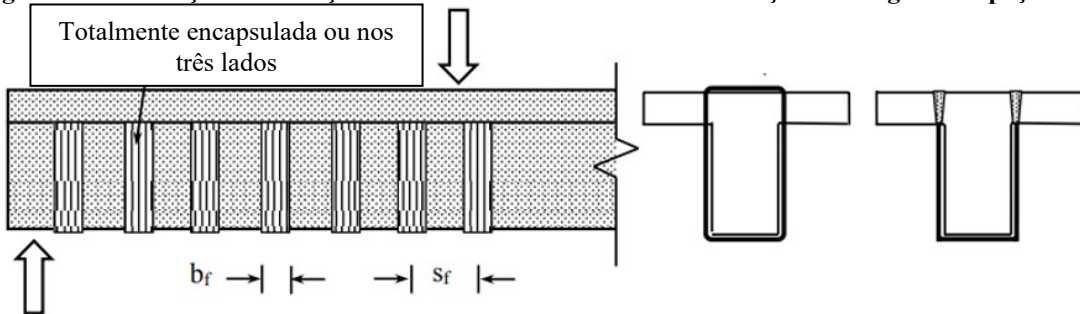
$$\rho_f = \frac{2t_f}{b_w} \cdot \frac{b_f}{s_f} \quad \text{para reforço em forma de tiras ou "U"} \quad (27)$$

onde:

b_f : largura da folha de fibra de carbono.

A ilustração esquemática do concreto armado reforçado com CFRP demonstrando a largura e o espaçamento do reforço está apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Ilustração do reforço ao cisalhamento com CFRP e indicações de largura e espaçamento.



Fonte: CEB-FIP: *Bulletin 14* (2001)

O valor da deformação efetiva de projeto da fibra de carbono é igual ao valor da deformação característica ($\varepsilon_{fk,e}$) dividido por um fator parcial de segurança (γ_f). Devido à falta de dados suficientes, a deformação característica pode ser aproximada pela multiplicação do valor médio da deformação efetiva ($\varepsilon_{f,e}$) por um fator de redução (k), de acordo com a Equação (28).

$$\varepsilon_{fk,e} = k \cdot \varepsilon_{f,e} \quad (28)$$

O fator parcial de segurança, a partir de características do material, envolvendo a fratura do sistema CFRP, estipula-se como $\gamma_f = \gamma_{fb} = 1,30$, se a falha de aderência levar ao descolamento. Diante disso, considera-se $k = 0,80$.

Conforme alguns estudos, limita-se a tensão efetiva a 0,6% (PRIESTLEY e SEIBLE, 1995; KHALIFA *et al.*, 1998; ANTONOPOULOS e TRIANTAFILLOU, 2003).

A CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) relata algumas expressões para o cálculo do valor médio da deformação efetiva do sistema CFRP, de acordo com a configuração de aplicação do reforço.

Para vigas totalmente encapsuladas, ou devidamente ancoradas, com controles de fratura da fibra, tem-se a Equação (29).

$$\varepsilon_{f,e} = 0,17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \quad (29)$$

Em reforços de fibras de carbono nas duas laterais ou em forma de “U”, tem-se a Equação (30).

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[0,65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \times 10^{-3}; 0,17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \right] \quad (30)$$

Na maioria dos casos, as expressões citadas para a tensão efetiva no CFRP apresentam valores acima da tensão de rendimento dos estribos internos.

2.8.3 Método CNR-DT 200.R1 (2013)

O reforço ao cisalhamento com sistema CFRP, segundo as recomendações italianas, deve ser verificado apenas no estado limite último e a capacidade de cisalhamento deve ser avaliada de acordo com a Equação (31).

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c}\} \quad (31)$$

Onde $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,f}$ são as contribuições do aço e das fibras de carbono, sucessivamente, enquanto que $V_{Rd,c}$ é a parcela de resistência do concreto. Para o reforço aplicado nas laterais da viga de concreto, utiliza-se a Equação (32).

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \min\{0,9d, h_w\} f_{fe} \cdot 2t_f \left(\frac{\sin \beta}{\sin \theta} \right) \frac{b_f}{p_f} \quad (32)$$

onde:

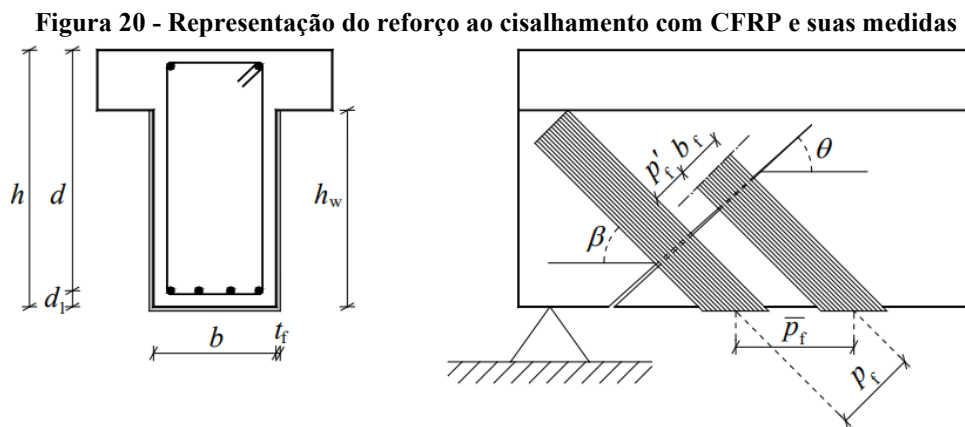
γ_{Rd} : tabelado pela norma, sendo igual a 1,20;

p_f : espaçamento de centro a centro entre as lâminas.

Para reforço nos três lados de uma seção retangular (tipo “U”), a resistência efetiva de projeto deve ser calculada de acordo com a Equação (33).

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0,9d \cdot f_{fed} \cdot 2t_f (\cot \theta + \cot \beta) \frac{b_f}{p_f} \quad (33)$$

Na Figura 20, são descritos os ângulos e as dimensões utilizados nas Equações (32) e (33).



Fonte: CNR-DT 200.R1 (2013)

Observa-se que p_f pode ser substituído por $\bar{p}_f \cdot \sin \beta$, onde \bar{p}_f é o espaçamento da lâmina de fibra de carbono medida ao longo do eixo horizontal da peça.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O terceiro capítulo apresenta a aplicação dos procedimentos descritos nas normas ACI 440.2R (2017), CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) e CNR-DT 200.R1 (2013) em um caso real de uma viga onde foi realizado o reforço ao cisalhamento e uma comparação paramétrica entre os métodos envolvendo os parâmetros referentes à geometria da fibra, sendo estes a largura da manta (w_f), espaçamento entre mantas (s_f), altura de aplicação da manta (d_f) e número de camadas (n) em relação à carga resistente do reforço.

3.1 APLICAÇÃO PRÁTICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

A Figura 21 se refere a uma parte do projeto estrutural de uma residência no qual estão representadas as formas do pavimento superior e na Figura 22 é apresentado o projeto de armaduras da referida viga.

Figura 21 - Planta de formas da viga em estudo.

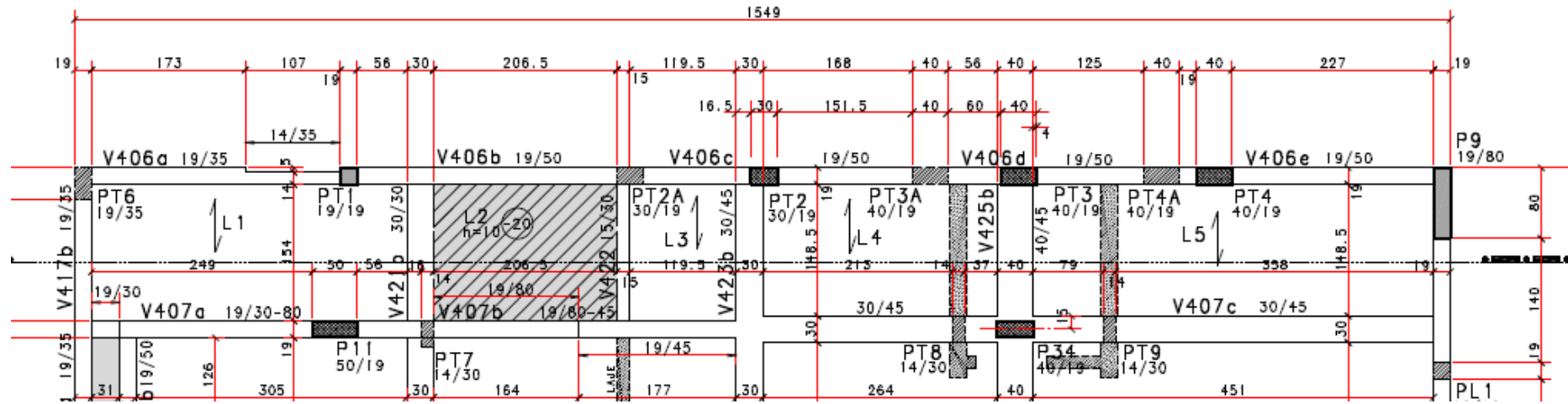
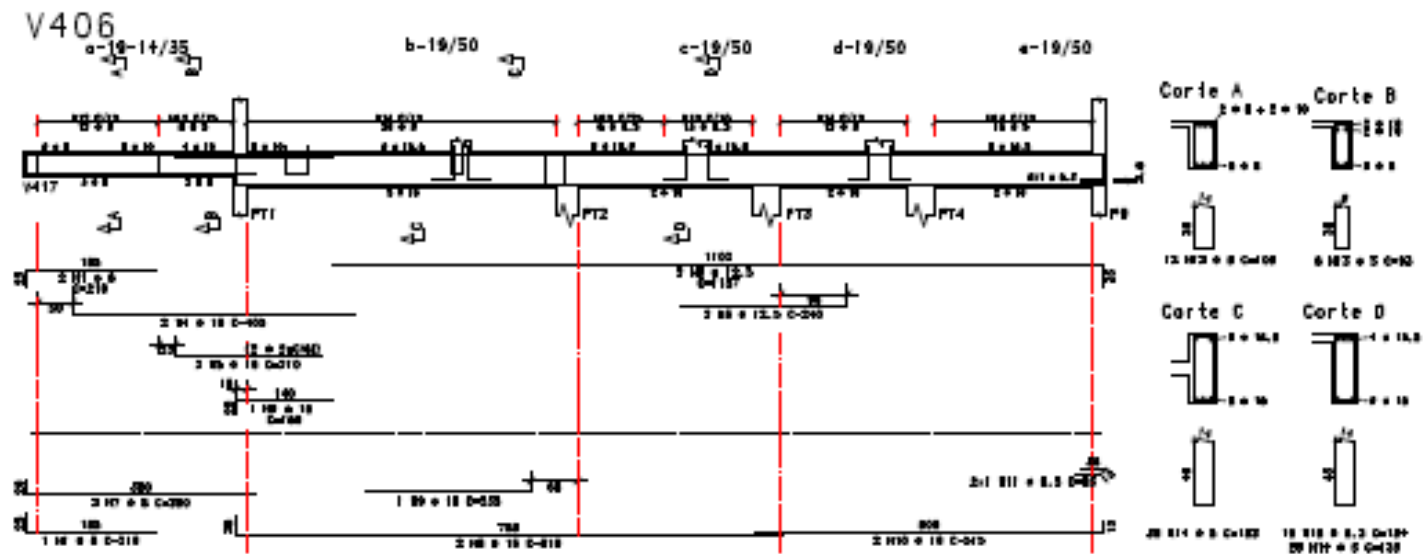


Figura 22 - Representação das armaduras da viga em estudo.



O projeto previa a execução de uma piscina acima dessa estrutura, no pavimento ático, na região das lajes L2, L3 e L4. Porém, durante a execução da obra a piscina foi aumentada, envolvendo também a laje L1, além do aumento de 30 cm na sua profundidade, passando de 1,00 m para 1,30 m. Essa modificação na execução gerou um aumento no carregamento da estrutura. Entre os elementos que tiveram aumento de carga estão os pilares PT1, PT2A e PT3A, sendo que os dois últimos nascem na viga V406, de modo que essa sobrecarga gerou um aumento nas tensões de cisalhamento da viga, exigindo um reforço ao cisalhamento.

Os aumentos de carga foram de 7700 N no PT1, de 21000 N no PT2A e de 8000 N no PT3A. Para o dimensionamento do reforço foi considerado que ele deveria suportar todo o carregamento excedente, uma vez que a viga já estava dimensionada para suportar a carga original, foram utilizados os três métodos de dimensionamento para efeito de comparação.

3.2 VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Para avaliação dos parâmetros referentes à geometria do reforço para cada norma foi necessário fixar os demais parâmetros. Os parâmetros que foram variados e a faixa de variação de cada um destes é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis utilizadas na análise paramétrica.

Parâmetro	Faixa de variação	Intervalo de variação
Largura da manta - w_f (cm)	5 a 50	5
Espaçamento entre mantas - s_f (cm)	5 a 30	5
Número de camadas - n	1 a 5	1
Comprimento da manta - d_f (cm)	20 a 40	5

Fonte: Autora (2021)

A faixa de variação escolhida para a largura da manta se refere à largura mínima existente em lâminas de fibra de carbono, que corresponde a 5 cm, e a largura máxima existente para a manta, que é de 50 cm. Sendo o intervalo de variação de 5 cm foi escolhido por ser o mais utilizado em casos práticos. Para o espaçamento entre mantas, foi escolhido o mínimo de 5 cm para não caracterizar a aplicação de manta contínua e o máximo de 30 cm que corresponde a um espaçamento máximo recomendado ($h/2$) para vigas usuais, assim como o intervalo de variação corresponde a valores práticos para execução. O número de camadas foi fixado no máximo em 5, pois para mais camadas existe dificuldade de aplicação. Para o comprimento da manta foi fixado um máximo correspondente à altura da viga subtraída a espessura da laje.

Para fazer a análise foi necessário fixar alguns parâmetros, considerando a fibra de carbono em manta de uso geral, com características apresentadas na Tabela 4. Em todos os casos foi considerada a fibra aplicada na vertical, a 90°.

Tabela 4 - Características técnicas de manta de fibra de carbono de uso geral.

Característica	Especificação	Unidade
Espessura	0,165	mm
Resistência máxima à tração	3790	MPa
Módulo de elasticidade	220	GPa
Deformação máxima	1,2	%
Gramatura	300	g/m ²

Fonte: Fabricante (2018)

Ainda foi necessário fixar alguns parâmetros referentes à geometria da viga e ao concreto. Foram adotados seção transversal hipotética de 20 cm x 40 cm e resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) de 30 MPa.

Para a análise de variação de cada parâmetro foram adotados os seguintes critérios:

O primeiro parâmetro analisado foi o número de camadas, variando de um a cinco e para cada caso, a resistência ao cisalhamento do reforço de fibra de carbono, fixando-se os valores de largura da lâmina em 10 cm, espaçamento entre lâminas de 25 cm e altura da lâmina de 30 cm, conforme dados apresentados na Tabela 5. Com isso, calculou-se a área de fibra aplicada.

Tabela 5 - Dados para a análise paramétrica do número de camadas de reforço.

Número de camadas (n)	Largura da lâmina (w_f) cm	Área (A_f) cm ²	Espaçamento (s_f) cm	Relação w_f/s_f	Altura (d_f) cm
1	10	0,330	25	0,4	30
2	10	0,660	25	0,4	30
3	10	0,990	25	0,4	30
4	10	1,320	25	0,4	30
5	10	1,650	25	0,4	30

Fonte: Autora (2021)

O segundo parâmetro analisado foi a largura do reforço de CFRP. Definiu-se a aplicação de apenas uma camada e demais parâmetros iguais ao item anterior, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Dados para a análise paramétrica da largura de reforço.

Número de camadas (n)	Largura da lâmina (w_f) cm	Área (A_f) cm ²	Espaçamento (s_f) cm	Relação w_f/s_f	Altura (d_f) cm
1	5	0,165	25	0,200	30
1	10	0,330	25	0,400	30
1	15	0,495	25	0,600	30
1	20	0,660	25	0,800	30
1	25	0,825	25	1,000	30
1	30	0,990	25	1,200	30
1	35	1,155	25	1,400	30
1	40	1,320	25	1,600	30
1	45	1,485	25	1,800	30
1	50	1,650	25	2,000	30

Fonte: Autora (2021)

O terceiro parâmetro analisado foi a distância entre os centros das faixas de lâminas aplicadas no reforço (espaçamento), com demais itens iguais aos cálculos anteriores. Desta forma, a área de reforço aplicado foi sempre a mesma, mudando apenas a relação entre largura e espaçamento, o que irá variar a capacidade resistente da fibra, conforme Tabela 7. De acordo com Ferreira e Cunha (2013), o espaçamento mínimo utilizado deve ser de 5 cm.

Tabela 7 - Dados para a análise paramétrica do espaçamento do reforço.

Número de camadas (n)	Largura da lâmina (w_f) cm	Área (A_f) cm ²	Espaçamento (s_f) cm	Relação w_f/s_f	Altura (d_f) cm
1	10	0,332	5	2,000	30
1	10	0,332	10	1,000	30
1	10	0,332	15	0,667	30
1	10	0,332	20	0,500	30
1	10	0,332	25	0,400	30
1	10	0,332	30	0,333	30

Fonte: Autora (2021)

E por fim, o quarto parâmetro analisado foi a altura de reforço aplicado nas laterais da viga, que influencia diretamente na carga suportada pelo compósito, com demais parâmetros constantes, sendo uma camada de reforço, com 10 cm de largura e 25 cm de espaçamento, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados para a análise paramétrica da altura do reforço.

Número de camadas (n)	Largura da lâmina (w_f) cm	Área (A_f) cm ²	Espaçamento (s_f) cm	Relação w_f/s_f	Altura (d_f) cm
1	10	0,332	25	0,400	20
1	10	0,332	25	0,400	25
1	10	0,332	25	0,400	30
1	10	0,332	25	0,400	35
1	10	0,332	25	0,400	40

Fonte: Autora (2021)

Com base nos parâmetros apresentados nas Tabelas 5 a 8 foi calculada a carga resistente para cada caso.

As normas CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) e CNR-DT 200.R1 (2013) não especificam o número de camadas em suas formulações, porém é possível alterar a espessura da manta que pode ser simulada pela multiplicação do número de camadas pela espessura da manta.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 APLICAÇÃO PRÁTICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento do reforço da viga pelos três métodos conduziu aos resultados apresentados na Tabela 9, em termos da relação largura/espacamento do reforço.

Tabela 9 – Resultados da relação largura/espacamento do reforço.

Sobrecarga (kN)	ACI 440.2R	CEB-FIP: 14	CNR DT 200.R1
7,7	0,15	0,16	0,15
21,0	0,40	0,59	0,43
8,0	0,15	0,14	0,15

Fonte: Autora (2021)

Caso se opte por utilizar uma manta com 10 cm de largura (w_f/s_f), os espaçamentos entre as lâminas (s_f), em cm, seriam os apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Espaçamento entre lâminas para $w_f = 10$ cm.

Sobrecarga (kN)	ACI 440.2R	CEB-FIP: 14	CNR DT 200.R1
7,7	66,7	62,5	66,7
21,0	25,0	16,9	23,2
8,0	66,7	71,4	66,7

Fonte: Autora (2021)

Os resultados indicam que os três modelos apresentam resultados similares, condizentes com o obtido por Rojas *et al.* (2017) que compararam as normas ACI 440.2R (2017) com a norma CNR-DT 200.R1 (2013) e também obtiveram resultados próximos.

Uno *et al.* (2016) compararam as normas ACI 440.2R (2017), CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) e CNR-DT 200.R1 (2013) e observaram que para laminados colados nas laterais e em “U”, modelo simulado neste trabalho, o modelo CNR-DT 200.R1 (2013) se apresentou mais conservador, ou seja, a favor da segurança, enquanto os demais modelos os autores consideraram mais arrojados.

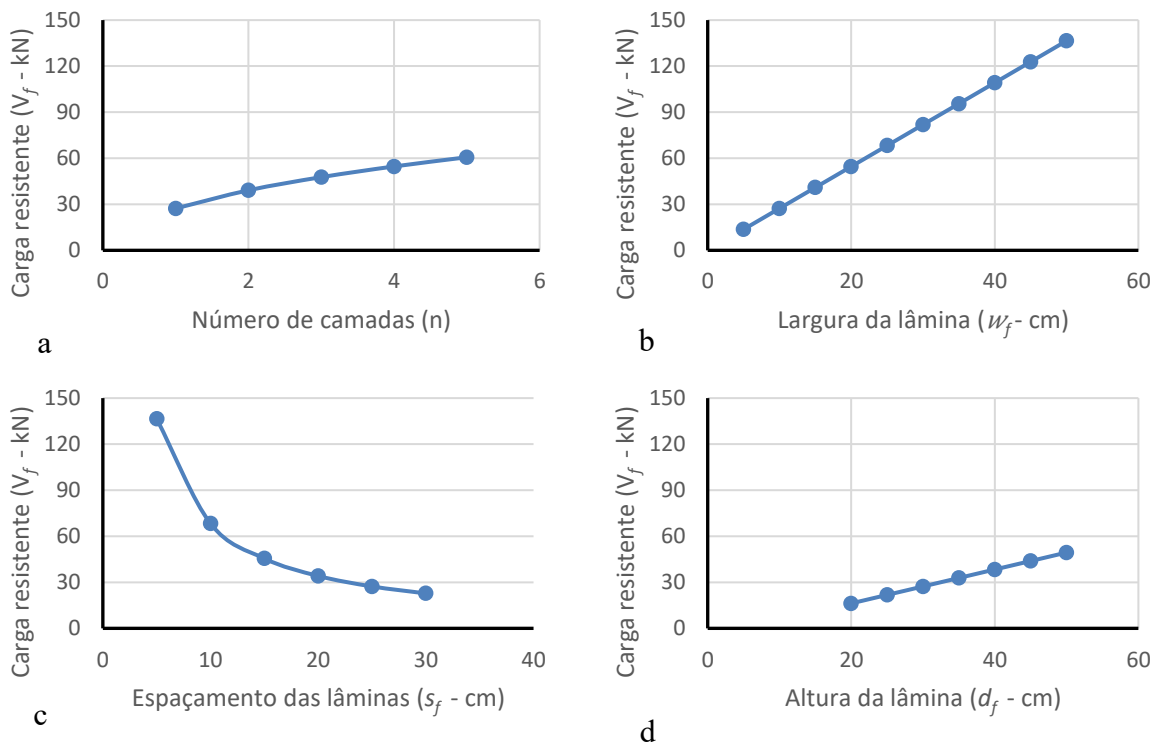
4.2 VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

A seguir são apresentados os dados obtidos com as variações paramétricas em cada uma das normas internacionais aqui estudadas.

4.2.1 Modelo ACI 440.2R (2017)

Na Figura 23 são apresentadas as variações da capacidade resistente do reforço ao cisalhamento com fibras de carbono para os parâmetros analisados, como número de camadas, espaçamento da lâmina, espessura do reforço e altura, de acordo com a normatização norte americana ACI 440.2R (2017).

Figura 23 - Análises da capacidade de carga para o método ACI 440.2R (2017).



Fonte: Autora (2021)

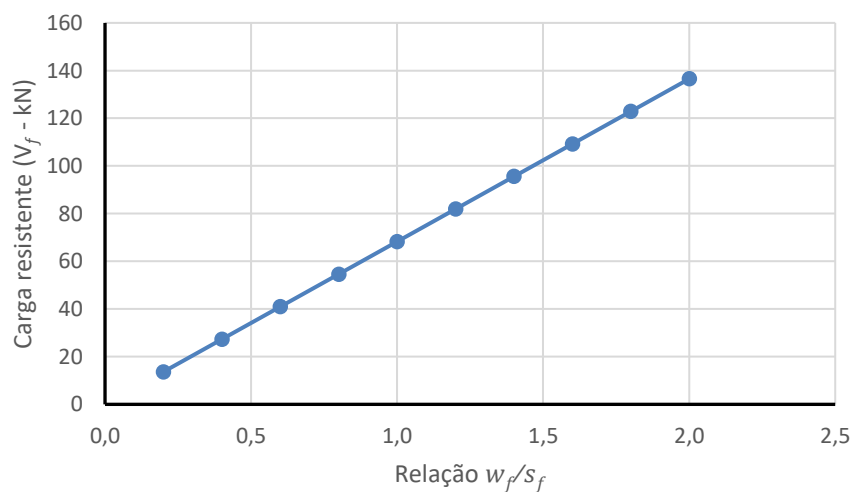
Na Figura 23(a) é possível observar que o aumento da capacidade resistente não é linear em relação ao aumento do número de camadas de reforço. Pois a colocação de uma camada de manta aumentou a capacidade de carga em 43,25%; já com duas camadas o aumento total foi de 74,60% e a utilização de cinco camadas de reforço conduziu a um aumento da capacidade resistente de 122,07%.

Observando as Equações (15) e (16), vê-se que o número de camadas é diretamente proporcional à carga resistente. No entanto, esse comportamento não linear é esperado porque entre as camadas existe a interposição de resina epóxi para a colagem e devido à diferença de resistência dos materiais não existe a linearidade entre a carga e o número de camadas.

Já nas Figura 23(b) e (d), observa-se uma relação linear entre o aumento da capacidade de carga e o aumento da largura e da altura da lâmina de reforço. Na Figura 23(c) é possível observar que o aumento do espaçamento entre as lâminas conduz a uma perda da capacidade resistente. Algo esperado, pois o aumento do espaçamento reduz a área de fibra de carbono, no entanto a queda de resistência é bastante acentuada para espaçamentos menores e essa diferença é reduzida conforme aumenta o espaçamento. Isso se explica porque quanto menor é o espaçamento existe uma maior área de fibra por metro linear de viga e o aumento desse espaçamento produz uma maior redução percentual da área de reforço, enquanto que para espaçamentos maiores essa perda percentual de área de reforço é menor. A título de exemplo, o aumento do espaçamento de 5 cm para 10 cm conduz a uma redução da área de reforço em 25,0% enquanto que o aumento do espaçamento de 25 cm para 30 cm produz uma redução na área de fibra de 12,5%.

No processo de dimensionamento do reforço ao cisalhamento de uma viga é comum determinar a relação largura/espaçamento das lâminas (w_f/s_f). Desse modo, na Figura 24 é apresentada a variação da carga resistente em função desse parâmetro.

Figura 24 - Variação da carga resistente em função de w_f/s_f .



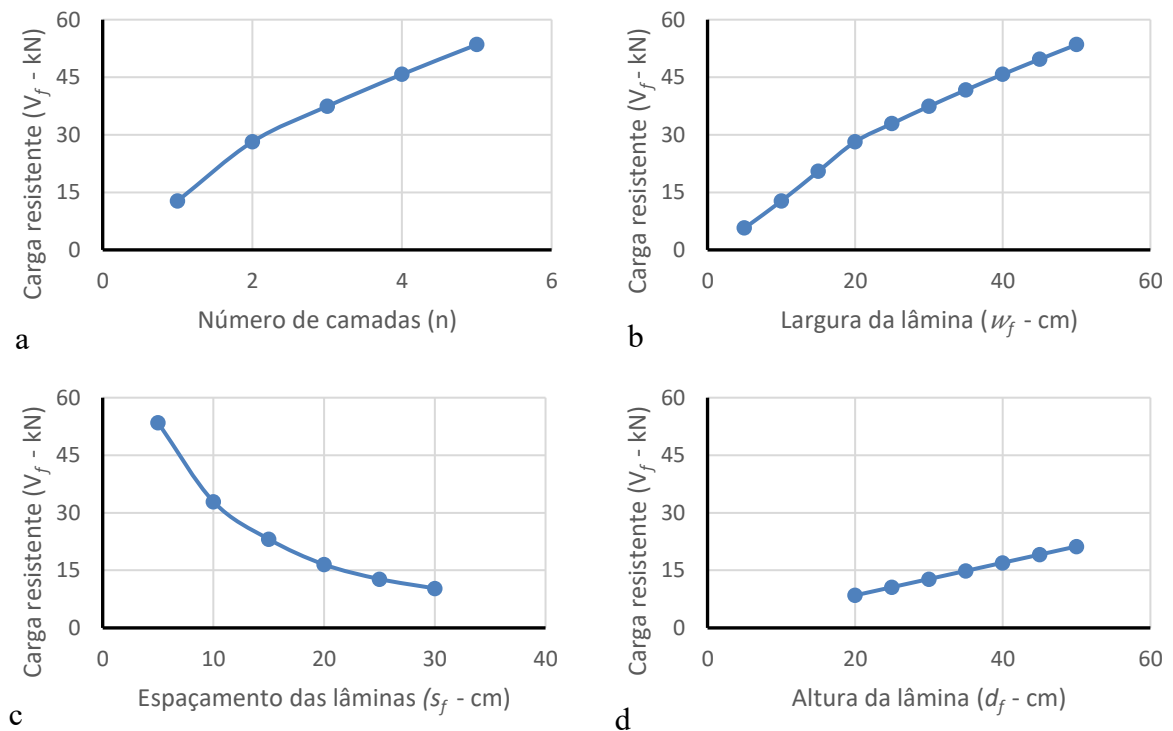
Fonte: Autora (2021)

Observa-se a variação linear existente entre a relação w_f/s_f com a capacidade de carga do reforço, sendo esse fato condizente com a Equação (16), que apresenta uma relação direta e linear entre a relação w_f/s_f e a capacidade de carga do reforço.

4.2.2 Modelo CEB-FIP: *Bulletin 14* (2001)

As relações entre as variáveis estudadas e a capacidade de carga do reforço considerando o modelo CEB-FIP: *Bulletin 14* (2001) são apresentadas na Figura 25.

Figura 25 - Análises da capacidade de carga para o método CEB-FIP: *Bulletin 14* (2001).



Fonte: Autora (2021)

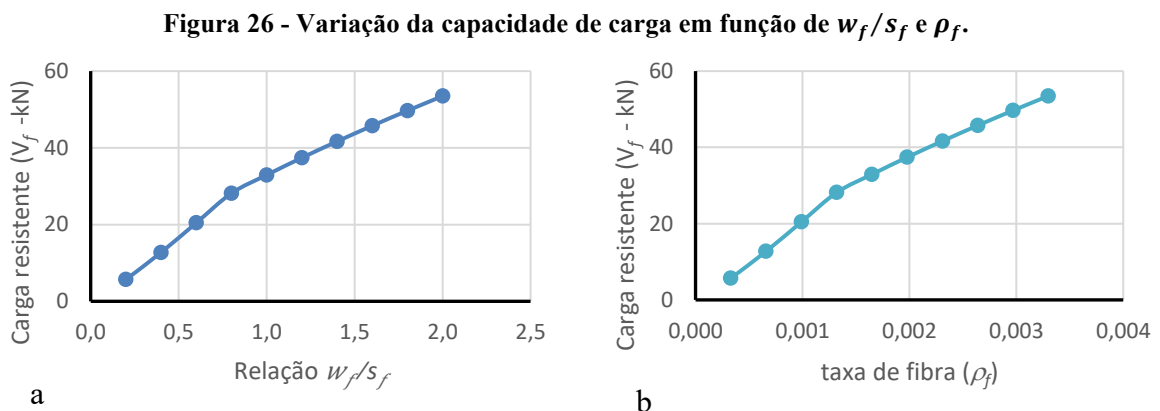
Assim como no modelo do ACI 440.2R (2017), o modelo CEB-FIP: *Bulletin 14* (2001) também apresenta uma relação não linear entre o número de camadas e a capacidade de carga do reforço, como pode ser observado na Figura 25 (a). O aumento de uma camada para duas camadas de reforço gerou um aumento de 121,0% na capacidade de carga e para cinco camadas o aumento foi de 319,9%.

Quanto à largura da lâmina (w_f) é possível observar na Figura 25(b) a existência de um ponto de inflexão na largura da lâmina correspondente à largura da viga. Em outras simulações foi observado esse ponto de inflexão sempre quando a largura da lâmina é igual à largura da viga. Esse fato pode ser explicado pela formulação do modelo, onde pode ser

observado, na Equação (30), que a existe um critério de escolha da deformação específica onde deve ser adotado o mínimo valor entre duas possibilidades. Essas equações dependem da taxa de fibra de carbono, que por sua vez depende da relação w_f/b_w e quando a largura da fibra se iguala ou supera a largura da viga, o valor mínimo ocorre na equação diferente, mudando o critério de escolha da deformação específica da fibra de carbono.

Já o espaçamento entre as lâminas também apresenta uma redução não linear da capacidade de carga em função de seu aumento, de modo similar ao método do ACI-440.2R, assim como o aumento da altura da lâmina gera um aumento linear da capacidade de carga.

Na Equação (25), ao substituir a taxa de fibra pela sua expressão, dada pela Equação (27), é possível relacionar a capacidade de carga do reforço com a relação w_f/s_f . A influência da relação w_f/s_f na capacidade de carga do reforço, assim como o efeito da taxa de fibra são apresentados na Figura 26.



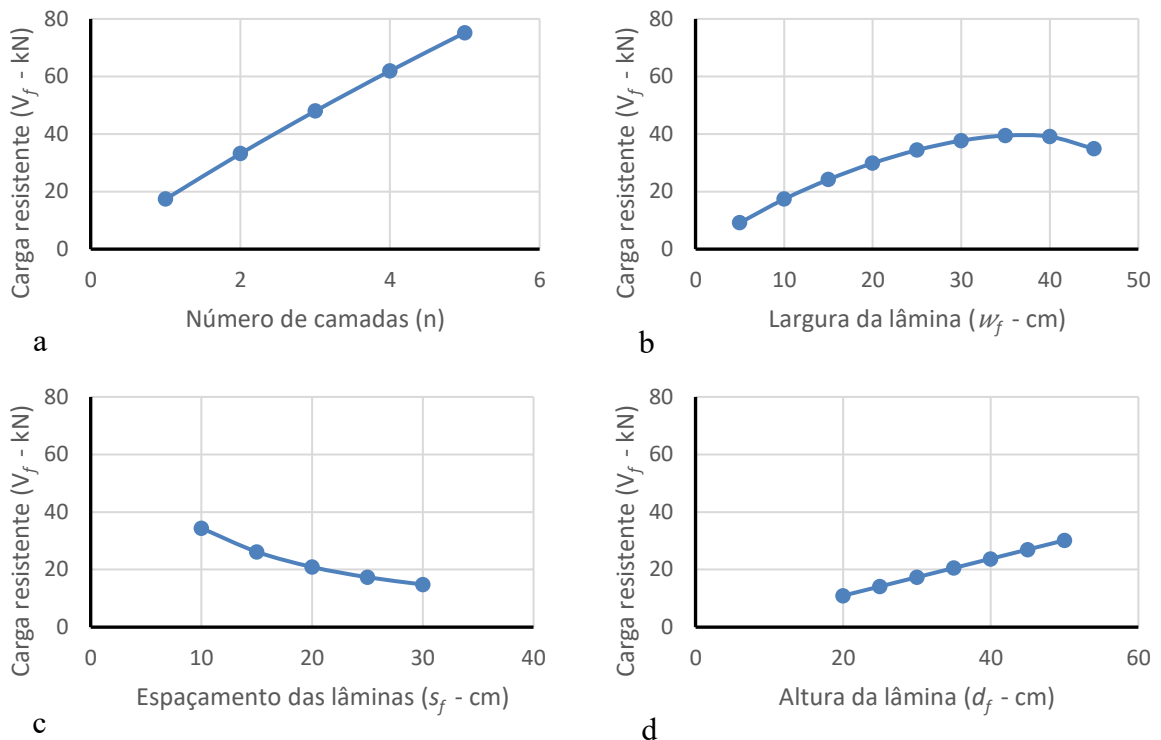
Fonte: Autora (2021)

Em ambos os casos é possível observar o ponto de inflexão das retas e estes ocorrem nos valores de w_f/s_f e ρ_f correspondentes ao valor de largura do reforço igual à largura da viga. Este fato ocorreu também nas simulações com outras larguras de vigas, isso porque a deformação específica é calculada em função da taxa de fibra, que por sua vez depende da relação w_f/s_f .

4.2.3 Modelo CNR-DT 200.R1 (2013)

Na Figura 27 são apresentados os resultados da análise paramétrica para o modelo CNR-DT 200.R1 (2013).

Figura 27 - Análises da capacidade de carga para o método CNR-DT 200.R1 (2013).



Fonte: Autora (2021)

Neste modelo o aumento do número de camadas gera um aumento linear na capacidade de carga, apresentando um comportamento diferente dos modelos anteriores. Isto ocorre porque a formulação do modelo não considera o número de camadas utilizadas. Deste modo, isto é simulado pelo aumento da espessura da lâmina na formulação.

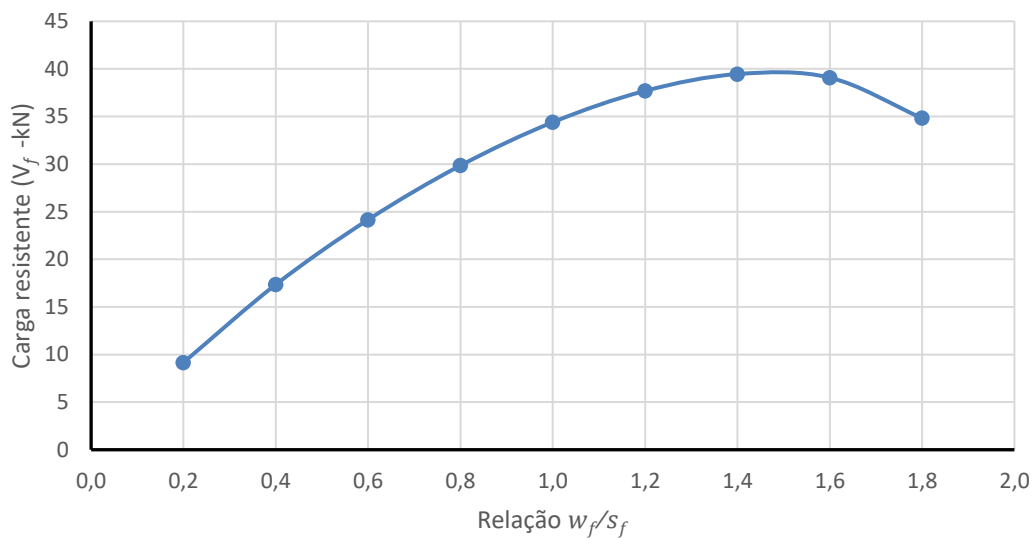
O simples aumento da espessura incorre em um erro porque as diferentes camadas são coladas umas às outras e a cola possui uma resistência menor que a fibra de carbono, fazendo com que o aumento da capacidade resistente na prática não seja linear. Deste modo, o modelo deveria ser utilizado para apenas uma camada de reforço.

Para a relação largura da lâmina (w_f) com a carga resistente (V_f) pode ser observado um aumento da capacidade de carga até um certo limite, quando a relação w_f/s_f é 1,50. Após esse limite, ocorre uma redução na capacidade resistente. Esse fato pode ser atribuído a um fator de forma utilizado no modelo que relaciona a largura da lâmina com uma largura do elemento estrutural onde pode ocorrer a distribuição das tensões de aderência entre o laminado e o concreto. Sendo que a largura do elemento estrutural é limitada pela existência de outras lâminas paralelas e quanto maior a largura da lâmina maior deverá ser a tensão de aderência. Entretanto, com a limitação da largura do elemento estrutural, pode ocorrer a sobreposição de esforços e diminuição da capacidade resistente.

Quanto ao espaçamento das lâminas, pode ser observado um comportamento similar aos demais modelos, com a diminuição da capacidade de carga com o aumento do espaçamento. O aumento da altura da lâmina apresenta um aumento linear da capacidade de carga, de modo similar aos demais modelos.

Como para efeito de dimensionamento se utiliza o parâmetro w_f/s_f , na Figura 28 é apresentada a relação desse parâmetro com a carga resistente do reforço.

Figura 28 - Variação da capacidade de carga em função de w_f/s_f .



Fonte: Autora (2021)

Como explicado na análise da relação w_f/s_f versus V_f , é possível observar a diminuição da resistência para valores de w_f/s_f iguais ou superiores a 1,60, uma vez que essa relação está diretamente vinculada à tensão de aderência entre o elemento de concreto e a lâmina de fibra de carbono.

4.2.4 Comparação entre os modelos

Na Tabelas 11 a 14 são apresentados os resultados obtidos para as cargas resistentes nos modelos para cada parâmetro analisado, mantendo constantes os demais parâmetros.

Tabela 11 – Carga resistente em função do número de camadas (em kN).

n	ACI 440.2R	CEB-FIP: 14	CNR DT 200.R1
1	27,30	12,74	17,35
2	39,11	28,16	33,15
3	47,67	37,40	47,94
4	54,64	45,75	61,92
5	60,63	53,48	75,19

Fonte: Autora (2021)

Tabela 12 – Carga resistente em função da largura da lâmina (em kN).

w_f (cm)	ACI 440.2R	CEB-FIP: 14	CNR DT 200.R1
5	13,65	5,67	9,16
10	27,30	12,74	17,35
15	40,95	20,45	24,16
20	54,60	28,16	29,85
25	68,26	32,92	34,40
30	81,91	37,40	37,69
35	95,56	41,67	39,46
40	109,21	45,75	39,09
45	122,86	49,68	34,83
50	136,51	53,48	-

Fonte: Autora (2021)

Tabela 13 – Carga resistente em função do espaçamento da lâmina (em kN).

s_f (cm)	ACI 440.2R	CEB-FIP: 14	CNR DT 200.R1
5	136,51	53,48	-
10	68,26	32,92	34,40
15	45,50	23,13	26,18
20	34,13	16,53	20,90
25	27,30	12,74	17,35
30	22,75	10,29	14,82

Fonte: Autora (2021)

Tabela 14 – Carga resistente em função da altura da lâmina (em kN).

d_f (cm)	ACI 440.2R	CEB-FIP: 14	CNR DT 200.R1
20	16,26	8,49	10,94
25	21,78	10,61	14,15
30	27,30	12,74	17,35
35	32,82	14,86	20,55
40	38,35	16,98	23,76
45	43,87	19,11	26,96
50	49,39	21,23	30,16

Fonte: Autora (2021)

Com base na análise paramétrica efetuada é possível observar que o modelo CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) se apresentou o mais conservador em todos os casos, enquanto o modelo do ACI 440.2R (2017) apresentou os resultados mais arrojados, com exceção para o caso de 4 e 5 camadas de lâminas, onde o modelo CNR-DT 200.R1 (2013) apresentou cargas resistentes superiores. Estes resultados diferem dos resultados apresentados por Uno *et al.* (2016) que consideram o modelo CNR-DT 200.R1 (2013) o mais conservador e os modelos ACI 440.2R (2017) e CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) mais arrojados. Por outro lado, Gamino *et al.* (2010) compararam os resultados teóricos dos modelos ACI 440.2R (2017) e CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) com dados experimentais e observaram que o modelo CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) se apresentou muito mais conservador que o modelo ACI 440.2R (2017), sendo que em alguns casos a capacidade de carga dada pelo modelo CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) foi menos da metade da carga dada pelo modelo ACI 440.2R (2017) e ambos os modelos apresentaram valores inferiores aos ensaios laboratoriais.

Em termos de formulação, todos os modelos, naturalmente, consideram as propriedades do material de reforço, no caso as fibras de carbono, e a resistência à compressão do concreto. No entanto, somente o modelo da norma CNR-DT 200.R1 (2013) considera a resistência à tração do concreto para o cálculo da energia de fratura e da tensão de aderência entre o concreto e o reforço, podendo ser este o motivo que conduz a resultados mais conservadores.

Quando se comparam os resultados apresentados na influência do número de camadas vê-se que o modelo CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) apresenta uma resistência inferior à metade da resistência dada pelo modelo ACI 440.2R (2017). Ao aumentar o número de camadas essa diferença diminui, sendo que o modelo CNR-DT 200.R1 (2013), com duas camadas de reforço já apresenta resultados da mesma ordem de grandeza do modelo ACI 440.2R (2017).

Ao se analisar a influência da largura da lâmina, os modelos CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) e CNR-DT 200.R1 (2013) apresentam resultados similares, sendo esta última com resultados inferiores à metade dos resultados apresentados pelo modelo da ACI 440.2R (2017). O mesmo comportamento é observado na análise da influência do espaçamento entre lâminas. Porém, quando se considera a altura das lâminas, o modelo CNR-DT 200.R1 (2013) apresenta resultados intermediários, sendo o modelo ACI 440.2R (2017) o mais arrojado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo comparar diferentes normas técnicas quanto ao reforço de vigas ao cisalhamento utilizando compósitos reforçados com fibras de carbono, a análise da influência de alguns parâmetros comuns utilizados pelos modelos, comparando esses resultados e fazendo a aplicação dos diferentes modelos em caso real, através do estudo de reforço das vigas anteriormente apresentadas.

Os parâmetros analisados foram o número de camadas de reforço, largura da lâmina, espaçamento entre lâminas e altura da lâmina. Quanto ao número de camadas, todos os modelos indicaram que o aumento da capacidade de carga não é linear com o aumento do número de camadas, sendo o modelo adotado pelo CNR-DT 200.R1 (2013) o mais próximo de uma reta. Isso ocorre porque esta norma não considera o número de camadas em suas formulações, sendo necessária uma multiplicação linear da espessura de uma lâmina vezes o número de vezes em que foi aplicada.

Considerando o parâmetro largura da lâmina, os três modelos apresentam comportamentos distintos, sendo que o modelo do ACI 440.2R (2017) indica uma relação linear entre o aumento da capacidade de carga e o aumento da largura da lâmina, enquanto o modelo CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) apresenta dois trechos lineares com um ponto de inflexão quando a largura da lâmina coincide com a largura da viga e o modelo CNR-DT 200.R1 (2013) indica um comportamento não linear.

Quando se analisa a influência do espaçamento entre lâminas observa-se um comportamento não linear, similar, nos três modelos, porém o modelo do ACI 440.2R (2017) é o que apresenta a maior redução na capacidade de carga em função do aumento do espaçamento.

Já para a influência da altura da lâmina, os três modelos apresentam um comportamento linear, indicando que o aumento da altura da lâmina gera um aumento na capacidade de carga do reforço. Com isso, a relação dos valores obtidos é que a norma americana apresentou valores maiores, a italiana, valores intermediários. Enquanto a francesa resultou em valores mais baixos entre as três, demonstrando o seu comportamento mais conservador, a favor da segurança.

Quando se comparam os diferentes modelos estudados, o modelo do ACI 440.2R (2017) se apresenta mais arrojado que os demais modelos, enquanto o modelo

CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) é o mais conservador. Em termos de consideração de parâmetros dos modelos, o destaque ocorre para o modelo CNR-DT 200.R1 (2013) que considera a tensão de aderência entre o substrato e o reforço.

Na aplicação prática dos modelos para o dimensionamento do reforço ao cisalhamento de uma viga real foi observado que os resultados apresentados pelo modelo do ACI 440.2R (2017) foram mais arrojados, porém o modelo CNR-DT 200.R1 (2013) apresentou resultados similares, enquanto o modelo CEB-FIP: *Bulletin* 14 (2001) indicou a maior relação w_f/s_f e para uma dada largura de lâmina apresentou os menores espaçamentos entre elas.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se:

- Comparação dos modelos teóricos apresentados pelas três normas estudadas com ensaios laboratoriais.
- Análise da influência da tensão de aderência entre o substrato e o reforço ao cisalhamento.

REFERÊNCIAS

ALI, N.; SAMAD, A. A. A.; MOHAMAD, N.; JAYAPRAKASH, J. Shear Behaviour of Pre-cracked Continuous Beam Repaired using Externally Bonded CFRP Strips. **Procedia Engineering**, v.53, p. 129 – 144, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318.R-05**. Building code requirements for structural concrete and commentary. ACI Committee 318. Also Technical Corrigendum 1, 2004.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-66**. Guide the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI Committee 440, Detroit, Michigan, 2017.

ANDREOLLI, I. Modelo analítico para avaliação do reforço à flexão de vigas com seção retangular e T. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 22-47. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000100003>.

ANTONOPOULOS, C. P.; TRIANTAFILLOU, T. C. Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints. **Journal of Composites For Construction**, p. 39- 49. 2003.

ARAÚJO, A. S. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, 2002b.

ARAÚJO, C. M. **Reforço ao cisalhamento de vigas “T” de concreto armado com fibras de carbono com dois tipos de ancoragem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília – UNB, 2002a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575:2013**: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

AVILA, F. G; ABREU, A. M. A. J.; CARNEIRO, L. A. V. Dimensionamento do reforço ao cisalhamento com compósitos de resina e fibras em vigas-parede de concreto. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 37, n. 3, 2021.

BALAGURU, P.; NANNI, A.; GIANCASPRO, J. **FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures: a guide to fundamentals and design for repair and retrofit**. 1st ed. New York, 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.

BATISTA, J. T. M.; SILVA, V. A.; REZENDE, E. C. L.; MONTEIRO, E. C. B. **Reforço com compósitos de fibra de carbono: alternativa moderna no cotidiano das obras**. CONPAR2017, Recife, 2017.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BOUSSELHAM, A.; CHAALLAL, O. Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer - an experimental study. **ACI Structural Journal**. Vol 103. Issue 3, p. 339-347. 2006.

BUKHARI, I. A.; VOLLUM, R. L.; AHMAD, S.; SAGASETA, J. Shear strengthening of reinforced concrete beams with CFRP. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, No. 1, p. 65- 77. 2010. <https://doi.org/10.1680/mac.2008.62.1.65>.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Traduzido por Sérgio Murilo Stamile Soares. 7ª Edição. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2008.

CHAALLAL, O.; NOLLET, M. J.; PERRATON, D. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fibre-reinforced-plastic plates: Design guidelines for shear and flexure. **Journal of Composites for Construction**, v. 2, Issue 2. 1998. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:2\(111\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:2(111))

CHASTRE, C. **Materiais e Tecnologias de Reforço de Estruturas de Betão - Potencialidade e Limitações**. Santander (Espanha): Rehabend, p. 1-4, 2014.

CHEN, J. F.; TENG, J. G. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. **Construction and Building Materials**, v. 17, p. 27–41, 2003.

CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2ª ed. Revisada. Brasília: Editora Universidade de Brasília: Finatec. 2008.

DANIEL, I. M; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. Oxford University Press, 1994.

DENIAUD, C.; CHENG, J. J. R. Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets. **ACI Structural Journal**, 98(3), 386–394. 2001.

DESNERCK, P.; DE SCHUTTER, G.; TAERWE, L. Shear friction of reinforced self-compacting concrete members. **American Concrete Institute, Special publication 261-9**, p. 133-143. 2009.

DUIC, J.; KENNO, S.; DAS, S. Performance of concrete beams reinforced with basalt fibre composite rebar. **Construction and Build Materials**, v. 176, p. 470-481, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.208>.

EL-SAYED, A. K.; EL-SALAKAWY, E.; BENMOKRANE, B. Mechanical and structural characterization of new carbon FRP stirrups for concrete members. **Journal of Composites for Construction**;11(4), p. 352–362. 2007.

ELSHAFEY, A. A.; MOHAMMED, M.; EL-SHAMI, M. M.; KANDIL, K. S. Strengthening of concrete beams using FRP composites. **Concrete Research Letters**, 5 (1), p. 740-759, 2014. <https://doi.org/10.20528/cjcr1>.

FAKHARIFAR, M.; DALVAND, A.; SHARBATDAR, M. K.; CHEN, G.; SNEED, L. Innovative hybrid reinforcement constituting conventional longitudinal steel and FRP stirrups for improved seismic strength and ductility of RC structures. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, p 44-62. V. 10, 2016.

FARIA, P. E. de. **Estudo Sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi Reforçado com Fibras de Vidro**. 2007. 231. Tese – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

FEDÉRATION INTERNACIONALE DU BÉTON – FIB. CEB – FIP. **Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures**. Technical Report. 2001.

FERNÁNDEZ, A. P. **Reforço de vigas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (PRFC)**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

FERREIRA, A. C. R. P.; CUNHA, J. Análise da distribuição do reforço com fibras de carbono em vigas de concreto armado. **Ciência & Engenharia**, v. 22, n. 2, p. 47 – 56, 2013. <https://doi.org/10.14393/19834071.2013.24095>.

GALVÉZ, L. E. M. **Reforço estrutural a força cortante em vigas de concreto armado por meio de colagem externa de mantas flexíveis de fibras de carbono (PRFC)**. Dissertação de mestrado. UNICAMP, 2003.

GAMINO, A. L.; SOUSA, J. L. A. O.; MANZOLI, O. L.; BITTENCOURT, T. N.; Estruturas de Concreto Reforçadas com PRFC Parte II: Análise dos Modelos de Cisalhamento. **IBRACON Structures and Materials Journal**, vol. 3, nº 1, 2010.

GUEDES, D. M. R.; PÉREZ, A. F.; SANTANA, P. F.; GONÇALVES, L. G.; MELO, G. S.; OLIVEIRA, M. H. Análise de modelos de cálculo de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com PRFC. ANAIS DO 61º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2019-IBRACON. Fortaleza, 2019.

HADHOOD, A.; AGAMY, M. H.; ABDELSALAM, M. M.; MOHAMED, H. M.; EL-SAYED, T. A. Shear strengthening of hybrid externally-bonded mechanically-fastened concrete beams using short CFRP strips: Experiments and theoretical evaluation. **Engineering Structures**, v. 201, Canadá, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109795>.

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

HOLLAWAY, L. C. **Polymer composites for civil and structural engineering**. Glasgow, Blackie Academic and Professional, 1993.

IRSHIDAT, M. R.; AL-SALEH M. H.; AL-SHOUBAKI, M. Using carbon nanotubes to improve strengthening efficiency of carbon fiber/epoxy composites confined RC columns. **Composites Structures**, Amsterdã, v. 134, p. 523-532, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.108>.

JUVANDES, L.; MARQUES, A. T.; FIGUEIRAS, J. A. **Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996. 112p. Notas de Aula.

JUVANDES, L. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”**. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.

JUVANDES, L.; HENRIQUES, A. A.; AZEVEDO, D. M. M. Modelos de dimensionamento do FIB e do ACI para o Reforço à flexão com CFRP. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**. Mecânica Experimental, v. 20, p. 1-12, 2012.

KARBHARI, V. M.; ZHAO, L. Use of composites for 21 st century civil infrastructure. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, p. 433-454, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)90270-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)90270-0).

KHALIFA, A.; ALKHRDAJI, T.; NANNI, A.; LANSBURG, S. Anchorage of surface-mounted frp reinforcement. **Concrete International**, V. 21, No. 10, pp. 49-54. 1999.

KHALIFA, A.; GOLD, W. J.; NANNI, A.; AZIZ, A. Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members. **Journal of Composites For Construction**, p. 195-202. 1998. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:4\(195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(195)).

KIM, D. J.; KIM, M. S.; CHOI, J.; KIM, H.; SCANLON, A.; LEE, Y. H. Concrete beams with fiber reinforced polymer shear reinforcement. **ACI Structural Journal**. Vol. 111, Issue 4, p. 903-911. 2014. <https://doi.org/10.14359/51686633>.

LEE, H.; JUNG, W. T.; CHUNG W. Field test of an old RC bridge before and after NSM strengthening. **Composites Structures**, Amsterdam, v. 202, p.793-801. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.024>

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto, vol. 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.

LEONI, R. I. **Reforço de estruturas utilizando fibras de carbono: comparação do desempenho de vigas reforçadas com as técnicas EBR e NSM**. 2016. 72 f. Monografia (Especialização) – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

LI, W.; LEUNG, C. K. Y. Shear span–depth ratio effect on behavior of RC beam shear strengthened with full-wrapping FRP strip. **Journal of Composites for Construction**, v. 20, Issue 3. 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000627](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000627).

LOPES, L. S. Patologias em construções que utilizam concreto armado e técnicas de reparo e manutenção. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente – FAEMA**. Ariquemes, v. 10, n. 1, p. 23-33, 2019. <https://doi.org/10.31072/rcf.v10i1>.

LOPES, R.; NETTO, R. M. **Detalhes construtivos visando à prevenção de fissuras em alvenarias de vedação e alvenarias estruturais**. Techsys Engenharia. 2014. Disponível em: <http://techsysengenharia.blogspot.com/2014/03/prevencao-de-fissuras-em-alvenarias-de.html>> Acesso: 19 out 2020.

MACHADO, A. P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2002.

MACHADO, A. P. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP**. Teoria e Prática. 1 ed. São Paulo: PINI, 2015.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design**. New York: Marcel Dekker. 1993.

MANO, E. B. **Polímeros como material na engenharia**. São Paulo: Edgar Blücher, 1991.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**. 2ª Edição. Ed.: IBRACON. ISBN.:978-85-98576213. 2014.

MENDES, A. P.; CLIVATTI, N.; ARAÚJO, S. K.; MAZER, W. Análise da eficiência de compósitos de fibra de carbono utilizados como reforço estrutural em pilares esbeltos de concreto armado. **SODEBRAS**, v. 12, n. 139, p. 127- 131, 2017.

MENON, N. V. **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. 2008. 332 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **CNR-DT 200.R1**. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Materials, RC and PC structures, masonry structures. Roma, CNR. 2013.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre. ISBN.: 978-85-8260-071-9. Ed. Bookman, 2013.

PANIGRAHI, A. K. Strengthening of shear deficient RC T-Beams with externally bonded FRP sheets. Master of Technology (Research). **National Institute of Technology**, INDIA, 2013.

PELLEGRINO, C.; MODENA, C. Fiber-Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams: Experimental Study and Analytical Modeling. **ACI Structural Journal**. September-October 2006.

PÉREZ, C. E.; ESPERT, L. G. Refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado con tejidos y matrices base cemento. Análisis y comparativa. **International Center For Numerical Methods In Engineering**. Barcelona, Spain. 1.ed. ISBN: 978-84-945077-9-3. 2016.

PIANCASTELLI, E. M. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado**. Ed. Depto. Estruturas da EEUFMG. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1998. 160p. Notas de Aula.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

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.

PIVATTO, A. B. **Análise experimental e computacional de vigas biapoiadas de concreto armado reforçadas com CFRP**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão da vida útil de estruturas de concreto armado em ambiente urbano**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

PRIESTLEY, M. J. N.; SEIBLE, F. Design of seismic retrofit measures for concrete and masonry structures. **Construction and Building Materials**. V. 9, Issue 6, p. 365-37. 1995.

PRUDENTE, R. R. Análise e classificação de solicitações de assistência técnica em empreendimentos residenciais verticais pelo método FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). **Revista Especialize On-line IPOG**. Goiânia. Ano 10, Edição nº 17. Vol. 01. 2019.

RASHEED, H. A. **Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP**. Boca Raton: CRC Press, 2014. 248 p. ISBN 9781482235593.

RIZKALLA, S. H.; MUFTI, A. **Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers**. Design manual (ISIS Canada), Canadá, n. 3, 2011.

ROJAS, N. R.; ALBUQUERQUE, N. G. B.; MELO, G. S. S. A.; NARVÁEZ, N. S. Avaliação de métodos de cálculo quanto às contribuições do reforço ao cortante de vigas de concreto armado através de colagem externa por compósitos de CFRP. **REEC**. D.O.I. 10.5216/reec.V13i2.42828. REEC, 2017.

SALAH-ELDIN, A.; MOHAMED, H. M.; BENMOKRANE, B. Axial-flexural performance of highstrength-concrete bridge compression members reinforced with basalt-FRP bars and ties: experimental and theoretical investigation. **ASCE. Journal of Bridge Engineering**. Vol. 24, Issue 7. 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001448](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001448).

SARTURI, F. D. M. **Simulação computacional de estruturas de concreto reforçadas com aço e compósitos de fibra de carbono**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2014.

SAVARIS, G. **Resistência ao cisalhamento do concreto autoadensável**. 2016. 247 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação e Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

SCHNEIDER, F. H.; SCHULTZ, J. L.; WIERZBICKI, L. R.; MAZER, W. Análise do desempenho da ancoragem do reforço de fibras de carbono em vigas submetidas à flexão. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, ISSN 2358-5420. Edição especial, p. 1-17, 2017.

SCHWARTZ, M. M. **Composite materials handbook**. New York: Mc-Graw-Hill, 1984.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. 5. tiragem. São Paulo: PINI, 2009.

TALJSTEN, B. Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. **Construction and Building Materials**, V. 17, n. 1, pp. 15-26, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00088-0)

TENG, J. G. **Failure modes of FRP-strengthened restructures**. 26th Conference on Our World in Concrete e Structures, Singapura, 2001.

TEO, W.; HING, K. L. M.; LIEW, M. S. Interaction between Internal Shear Reinforcement and External FRP Systems of RC Beams: Experimental Study. **The Open Civil Engineering Journal**, v. 11, p. 143-152. DOI: 10.2174/1874149501711010143. 2017.

TRIANTAFILLOU, T. C. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites. **ACI Structural Journal**. V. 95(2), p. 107-115. 1998.

UNO, L. A.; RISSON, A. V.; MENON, N. V. Avaliação dos coeficientes de segurança dos códigos normativos para reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado reforçadas com PRFC. **REEC**, D.O.I. 10.5216/reec. Vol. 11i3.35586, 2016.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete: mechanics and design**. 6th ed. New Jersey: Pearson, 2009.

ZHENG, Y.; ZHOU, L.; TAYLOR, S. E.; MA, H. Serviceability of one-way high-volume fly ash self-compacting concrete slabs reinforced with basalt FRP bars. **Construction and Building Materials**. Vol. 217, p. 108-127. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.044>