

BRUNO VALENTE VERDERAMO

**Planilha eletrônica para dimensionamento de reforço estrutural de vigas
de concreto armado com compósito de fibra de carbono**

Bruno Valente Verderamo

**Planilha eletrônica para dimensionamento de reforço estrutural de vigas
de concreto armado com compósito de fibra de carbono**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni

V483p Verderamo, Bruno Valente
Planilha eletrônica para dimensionamento de reforço estrutural de vigas de concreto armado com compósito de fibra de carbono / Bruno Valente Verderamo. – Guaratinguetá, 2018.
125 f. : il.
Bibliografia : f. 123-125

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni

1. Concreto armado. 2. Otimização estrutural. 3. Fibras de carbono.
4. Planilhas eletrônicas I. Título

CDU 624.012.45

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

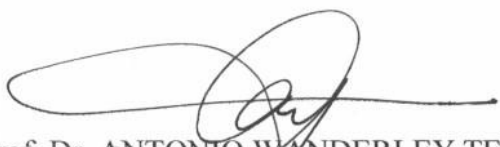
BRUNO VALENTE VERDERAMO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


Prof. Dra. MÁRCIA REGINA DE FREITAS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANTONIO WANDERLEY TERNI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. LUIZ GUILHERME FERNANDES LOPES
UNESP-FEG


Eng. WILLIAM FARIA SHIROMOTO
Membro Externo

Novembro de 2018

dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, minha grande incentivadora.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me possibilitou, entre todas as coisas, saúde para a realização do curso e do trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni, que me incentivou a todo momento e que, através de sua orientação, atenção e auxílio, possibilitou a confecção desse trabalho.

Aos meus familiares, em especial minha mãe Rita, meu pai Marcello, minha irmã Mariana e meu cachorro Rocky, que sempre estiveram ao meu lado, apesar de todas as dificuldades encontradas.

E, por fim, aos meus colegas de faculdade, principalmente meus amigos Pedro e Leonardo e minhas amigas Nathalia e Juliana, que tornaram a caminhada durante o curso muito mais prazerosa e tranquila.

RESUMO

Uma das principais matérias-primas do setor da Construção Civil no Brasil é o concreto armado e, desde o advento desse material nas construções, diversas técnicas foram desenvolvidas tornando o processo de construção e manutenção de edifícios de concreto armado mais avançado. Apesar disso, o surgimento de patologias nas construções vem se tornando cada vez mais frequente e, com isso, a necessidade de intervenções também. Dentre as intervenções possíveis de serem realizadas, destacam-se a recuperação, o reparo e o reforço estrutural da construção. Tendo em vista essa questão, existem muitas técnicas e materiais no mercado que possibilitam a recuperação ou reforço do desempenho da construção, desde de as mais tradicionais até as mais inovadoras. Entre as inovadoras, ressalta-se a utilização de materiais poliméricos na estrutura, principalmente, a aplicação do compósito de fibra de carbono que se apresenta como uma técnica eficaz com diversas vantagens de uso. Entretanto, o dimensionamento de reforço estrutural com compósitos de fibra de carbono, especialmente para vigas de concreto armado à flexão, se mostra um processo complexo, demorado e impreciso. Levando isso em consideração, esse estudo se baseia no desenvolvimento de uma planilha eletrônica com interface amigável ao usuário, através de pesquisas em artigos e livros especializados na aplicação desse material e nas considerações normativas acerca do dimensionamento de vigas de concreto armado, que torne o processo de dimensionamento do reforço mais rápido, seguro e preciso. Por meio da apresentação de estudos de casos e pela discussão de resultados que compara os resultados alcançados pelo dimensionamento manual e através da planilha, torna-se evidente a eficácia e precisão da planilha, bem como se atinge os objetivos desejados. De tal maneira que, com o auxílio do manual de uso presente no estudo, essa planilha computacional se mostra uma ótima ferramenta para uso em casos de dimensionamento de reforço estrutural de vigas de concreto armado à flexão com compósitos de carbono. Por outro lado, destaca-se também que nos casos de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono, a planilha não se mostra tão eficaz, uma vez que seu processo de dimensionamento manual já se configura como um método rápido, seguro e preciso. Ficando como recomendação, assim, o uso da planilha em casos de reforços de viga à flexão ou, em casos em que haja a necessidade de dimensionamento integrado de reforço à flexão e ao cisalhamento.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto armado. Patologia. Reforço estrutural. Compósito de fibra de carbono. Dimensionamento de reforço. Planilha eletrônica.

ABSTRACT

One of the main raw materials in the Civil construction sector in Brazil is reinforced concrete, and since the advent of this material in constructions, several techniques have been developed, making the construction and maintenance process of reinforced concrete buildings more advanced. Despite this, the emergence of pathologies in the constructions is becoming more and more frequent and, therefore, the necessity of interventions as well. Among the possible interventions to be carried out are the recovery, repair and structural reinforcement of the construction. In view of this issue, there are many techniques and materials in the market that enable the recovery or reinforcement of construction performance, from the most traditional to the most innovative. Among the innovators, the use of polymeric materials in the structure is emphasized, mainly, the application of the carbon fiber composite that presents itself as an effective technique with several advantages of use. However, the dimensioning of structural reinforcement with carbon fiber composites, especially for flexural reinforced concrete beams, is a complex, time-consuming and inaccurate process. Taking this into consideration, this study is based on the development of an electronic spreadsheet with a user-friendly interface, through researches in articles and books specialized in the application of this material and in the normative considerations about the dimensioning of reinforced concrete beams, that makes the process faster, safer and more accurate sizing. Through the presentation of case studies and the discussion of results comparing the results achieved by manual sizing and through the spreadsheet, it becomes evident the effectiveness and accuracy of the worksheet, as well as if it achieves the desired objectives. In such a way that, with the help of the use manual of use present in the study, this computational spreadsheet is an excellent tool for use in structural reinforcement dimensioning cases of flexural reinforced concrete beams with carbon composites. On the other hand, it is also worth noting that in the cases of reinforcement dimensioning of reinforced concrete beams with carbon fiber composites, the spreadsheet is not so effective, since its manual sizing process is already configured as a fast, safe and accurate method. Thus, the use of the spreadsheet in cases of flexural reinforcement or, in cases where there is a need for integrated stiffening of shear and flexural reinforcement, is recommended.

KEYWORDS: Reinforced concrete. Pathology. Structural reinforcement. Carbon fiber composite. Reinforcement sizing. Spreadsheet.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Densidade de probabilidade da resistência à compressão do concreto.....	18
Figura 2 – Diagrama tensão x deformação idealizado.....	20
Figura 3 – Diagrama tensão x deformação para aços de armaduras passivas.....	21
Figura 4 – Classes de agressividade ambiental.....	24
Figura 5 – Distribuição das tensões no concreto.....	28
Figura 6 – Domínios de estado limite último de uma seção transversal.....	29
Figura 7 – Equilíbrio em flexão simples de uma seção.....	30
Figura 8 – Domínios possíveis em flexão simples.....	30
Figura 9 – Configuração das deformações na seção.....	31
Figura 10 – Configuração, resultantes e deformações da seção retangular com armadura dupla.....	36
Figura 11 – Analogia da treliça de Morsch.....	38
Figura 12 – Gráfico para cálculo de V_c no modelo de cálculo II.....	41
Figura 13 – Variação do desempenho de uma estrutura de concreto armado ao longo do tempo.....	43
Figura 14 – Diferentes desempenhos de uma estrutura, com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos.....	44
Figura 15 – Diagrama tensão x deformação de fibras e aço CA-50.....	53
Figura 16 – Esmerilagem da superfície de concreto.....	63
Figura 17 – Superfície de concreto preparada para a aplicação do reforço.....	63
Figura 18 – Compósito de fibra de carbono em sua forma comercial.....	65
Figura 19 – Diagrama da configuração de equilíbrio da seção transversal da peça com o reforço.....	68
Figura 20 – Determinação do estado Inicial de deformação.....	70
Figura 21 – Forças atuantes na seção transversal resistente com reforço.....	71
Figura 22 – Possíveis configurações de um reforço ao cisalhamento.....	74
Figura 23 – Exemplos de distribuição do reforço com CFC.....	75
Figura 24 – Exemplos de orientação das fibras de carbono.....	75
Figura 25 – Relação entre largura e espaçamento do CFC em uma viga.....	77
Figura 26 – Comprimento d_f do compósito aplicado na viga.....	79
Figura 27 – Parte 1 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.....	93

Figura 28 – Parte 2 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.....	94
Figura 29 – Parte 3 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.....	94
Figura 30 – Parte 4 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.....	95
Figura 31 – Parte 5 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.....	95
Figura 32 – Parte 6 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.....	96
Figura 33 – Parte 7 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.....	96
Figura 34 – Parte 8 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.....	97
Figura 35 – Parte 9 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.....	97
Figura 36 – Parte 1 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC.....	98
Figura 37 – Parte 2 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC.....	98
Figura 38 – Parte 3 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC.....	99
Figura 39 – Parte 1 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC alimentada.....	106
Figura 40 – Parte 2 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC alimentada.....	107
Figura 41 – Parte 3 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC alimentada.....	108
Figura 42 – Parte 4 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.....	109
Figura 43 – Parte 5 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.....	110
Figura 44 – Parte 6 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.....	110

Figura 45 – Parte 7 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.....	111
Figura 46 – Parte 8 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.....	112
Figura 47 – Parte 9 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.....	113
Figura 48 – Parte 1 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC preenchida.....	114
Figura 49 – Parte 2 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC preenchida.....	115
Figura 50 – Parte 3 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC preenchida.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de algumas resinas.....	52
Tabela 2 – Propriedades típicas das fibras de carbono à tração.....	55
Tabela 3 – Características das fibras de carbono e fibra de vidro comercializadas pelo sistema MBrace™.....	57
Tabela 4 – Propriedades típicas dos sistemas compósitos de fibra de carbono de acordo com a orientação das fibras.....	58
Tabela 5 – Principais características e aspectos de instalação de sistemas de reforços com CFC.....	61
Tabela 6 – Valores aceitáveis de irregularidades do substrato.....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	ASPECTOS GERAIS.....	13
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.3	JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	14
1.4	METODOLOGIA.....	14
1.5	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	17
2.1.1	Conceitos.....	17
2.1.1.1	Concreto.....	17
2.1.1.2	Aço.....	20
2.1.1.3	Concreto armado.....	22
2.1.1.4	Durabilidade das estruturas.....	23
2.1.2	Histórico.....	25
2.1.3	Dimensionamentos.....	25
2.1.3.1	Considerações importantes.....	25
2.1.3.2	Hipóteses básicas.....	27
2.1.3.3	Modelo de cálculo de armaduras longitudinais em vigas de seção retangular.....	32
2.1.3.4	Modelo de cálculo de armaduras transversais em vigas.....	37
2.2	PATOLOGIAS, RECUPERAÇÕES E REFORÇOS.....	41
2.2.1	Conceitos e considerações importantes.....	41
2.2.2	Recuperação e reparo de estruturas.....	45
2.2.2.1	Materiais utilizados.....	45
2.2.2.2	Técnicas aplicadas.....	46
2.2.3	Reforço de estruturas.....	48
2.3	COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO.....	49
2.3.1	Considerações iniciais.....	50
2.3.2	Composição, características e propriedades.....	51
2.3.3	Histórico.....	59
2.3.4	Processo de aplicação em estruturas.....	60

2.3.5	Modelo de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado à flexão com fibras de carbono.....	67
2.3.6	Modelo de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado ao cisalhamento com fibras de carbono.....	73
3	ESTUDOS DE CASOS DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO.....	80
3.1	ESTUDO DE CASO 1 – DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO.....	80
3.2	ESTUDO DE CASO 2 – DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO AO CISALHAMENTO.....	89
4	APRESENTAÇÃO DA PLANILHA ELETRÔNICA PARA DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITO DE FIBRA DE CARBONO.....	93
5	MANUAL DE USO DA PLANILHA ELETRÔNICA APRESENTADA.....	100
6	ESTUDOS DE CASOS DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO DESENVOLVIDOS PELA PLANILHA ELETRÔNICA.....	105
6.1	ESTUDO DE CASO 1 – DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE VIGA À FLEXÃO COM CFC DESENVOLVIDO PELA PLANILHA ELETRÔNICA.....	105
6.2	ESTUDO DE CASO 2 – DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE VIGA AO CISALHAMENTO COM CFC DESENVOLVIDO PELA PLANILHA ELETRÔNICA.....	113
7	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	117
8	CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS.....	121
	REFERÊNCIAS.....	123

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

A construção civil é uma área de atuação dentro da Engenharia que dispense de inúmeros materiais construtivos para a realização de suas obras e, conseqüentemente, de seus objetivos finais. Entretanto, é mais frequente o uso do concreto armado como matéria-prima principal da maioria das obras existentes no Brasil e no mundo.

Assim como todos os outros materiais construtivos disponíveis, o concreto armado possui um tempo de vida útil, que varia de acordo com o grau de uso de sua estrutura em serviço e de sua finalidade, e, caso sua manutenção não seja realizada de modo correto e frequente, seu projeto e execução forem realizados de maneira insatisfatórias, haja sobrecargas de utilização incompatíveis com as dimensionadas no projeto ou outros motivos, pode não atingir esse tempo de vida útil. Apresentando deteriorações e patologias que prejudicam a integridade e a finalidade da estrutura e que, com isso, exigem intervenções estruturais específicas (Lima, 1998).

Contudo, mesmo as estruturas corretamente projetadas e utilizadas podem apresentar deteriorações que impõem a necessidade de intervenções. Além disso, podem haver casos em que se queira postergar o tempo de uso de uma estrutura ou que se necessite ter sua capacidade resistente aumentada também gerando a necessidade de uma intervenção (Souza & Ripper, 1998).

E, para que essas intervenções, tanto as voltadas para a recuperação das estruturas quanto as voltadas para o reforço das estruturas, ocorram corretamente é de suma importância que o engenheiro responsável possua o conhecimento das técnicas, dos procedimentos, dos materiais existentes e dos materiais que estão surgindo aos poucos.

Tendo em vista essa necessidade e o crescente avanço da tecnologia e dos incentivos em pesquisas pelo mundo, há o desenvolvimento de novos materiais que começaram a apresentar vantagens de uso em relação às técnicas tradicionais já utilizadas. Um exemplo disso são os materiais poliméricos e seus crescentes usos na construção civil decorrentes do barateamento dessa matéria-prima e dos custos em projetos de pesquisas e na produção (Machado, 2002).

Dentre os diversos materiais poliméricos avançados existentes e que podem ser usados na construção civil, destaca-se o sistema polimérico estruturado com fibra de carbono. Os avanços em pesquisas permitiram o uso desse material na produção de perfis estruturais e no reforço de estruturas, tornando-o relativamente competitivo quanto ao custo, tempo e qualidade.

Com isso, o procedimento de uso desse material passou a ser mais disseminado e seu uso, mais comum em obras estruturais pelo mundo.

Entretanto, o procedimento para o dimensionamento de reforço de estruturas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono possui algumas características específicas que o tornam dispendioso e complexo. Tendo em vista essas dificuldades, surge a necessidade de desenvolvimento de uma planilha eletrônica que torne o processo de cálculo do reforço da estrutura mais rápido e eficaz.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento e a elaboração de uma planilha eletrônica com uma interface amigável ao usuário para dimensionamento de reforço estrutural de vigas de concreto armado com compósito de fibra de carbono, a fim de se recompor as armaduras longitudinal e transversal da estrutura que, por ventura, foram sujeitas às perdas de seção resistente devido às patologias, especialmente por corrosão, ou também, a introdução de reforços com fibras de carbono para aumentar a capacidade resistente da viga.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A escolha do tema desse trabalho de conclusão de curso foi baseada nas dificuldades de cálculo de dimensionamento de recuperação ou reforço de estruturas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono a mão. Por meio da aplicação desta planilha eletrônica objetiva-se racionalizar os procedimentos de cálculo desse dimensionamento, tanto em relação ao tempo dispendido no dimensionamento em si, bem como na segurança e exatidão nos resultados a serem alcançados. Além disso, através desse trabalho, busca-se tornar mais evidente as vantagens deste tipo de reforço do ponto de vista estrutural de sua aplicação e do uso desse polímero nos processos de reforços estruturais.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia para desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso se deu através de pesquisas em referências bibliográficas sobre o assunto, fundamentalmente em artigos e livros que discorrem sobre o dimensionamento e a aplicação de reforços com fibras de carbono, e também em manuais de empresas que comercializam a fibra para este fim. Foi estudado o

modelo de dimensionamento das armaduras longitudinal e transversal de vigas de concreto armado, suas hipóteses e considerações normativas para que, em seguida, fossem entendidas as correlações como modelo de dimensionamento com o reforço com fibra de carbono e, assim fosse estabelecida a rotina e o algoritmo para o desenvolvimento da planilha eletrônica. Foi feita uma revisão sobre a confecção de planilha elaboradas em Excel e das instruções que permitiram deixá-la de maneira mais amigável ao usuário. Estudos de casos também foram desenvolvidos para exemplificar o uso da planilha e verificar sua eficácia.

1.5 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

A monografia será estruturada em 8 capítulos, conforme descrito a seguir:

O primeiro capítulo, é apresentada a introdução do tema proposto, com aspectos gerais do assunto discutido, objetivos da monografia, a justificativa do tema escolhido, a metodologia aplicada para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica do trabalho, abordando pontos essenciais para o desenvolvimento do trabalho. Tem-se a conceituação, o histórico e o dimensionamento de estruturas de concreto armado; Conceituação de patologias, recuperação e reforço, assim como os materiais e técnicas utilizadas para essas intervenções; E por fim, discute-se o compósito de fibra de carbono através de seus materiais constituintes, propriedades, histórico, aplicações e dimensionamento.

No terceiro capítulo, são divulgados alguns estudos de casos de dimensionamento de reforço estrutural de vigas de concreto armado com compósito de fibra de carbono.

No capítulo 4, tem-se a apresentação da planilha eletrônica desenvolvida para dimensionamento de reforço estrutural de vigas de concreto armado com compósito de fibra de carbono.

No quinto capítulo, expõe-se um manual de uso da planilha desenvolvida e apresentada no capítulo anterior, para facilitar uso da mesma pelo usuário.

No sexto capítulo, há a exposição dos mesmos estudos de casos, desenvolvidos anteriormente de forma manual, entretanto, dimensionados, nesse momento, através do uso da planilha eletrônica confeccionada.

No sétimo capítulo, tem-se a discussão dos resultados apresentados nos estudos de casos, com uma análise comparativa entre os métodos utilizados para o dimensionamento, verificando a eficácia da planilha eletrônica.

No oitavo e último capítulo, é apresentada a conclusão do trabalho de graduação, considerando tudo que fora exposto no desenvolvimento, como também algumas considerações finais acerca do tema trabalhado.

Por fim, explicita-se as referências bibliográficas utilizadas ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

2.1.1 Conceitos

2.1.1.1 Concreto

O concreto é um material resultante da mistura adequada de cimento, agregados e água. Os agregados que compõem o concreto são subdivididos em miúdos (o mais utilizado é a areia) e graúdos (brita ou pedra), podendo ser naturais ou britados. Ocasionalmente, de acordo com necessidades específicas, podem ser incorporados ao concreto alguns aditivos químicos ou minerais como polímeros ou escória de alto-forno que são utilizados para diversas funções como retardar ou acelerar o tempo de pega, superplastificantes e etc., melhorando as características do concreto fresco ou endurecido.

Como citado acima, o concreto possui duas fases durante a sua fabricação: fresco ou endurecido. O concreto fresco se dá logo após a mistura dos seus componentes, permitindo seu manuseio. Suas principais propriedades são a consistência (maior ou menor capacidade de se deformar); trabalhabilidade (conceito ligado à maneira de se efetuar o adensamento, dependente da granulometria dos materiais sólidos; e homogeneidade (distribuição dos agregados graúdos dentro da massa do concreto) (Carvalho & Rodrigues, 2009).

Já o concreto endurecido, se dá após algumas horas de sua produção e sua trabalhabilidade já não é mais possível. As principais características do concreto endurecido são as mecânicas: resistência à compressão e à tração. Essa resistência do concreto endurecido depende de alguns fatores ligados ao seu aspecto fresco como a relação água-cimento, o grau de adensamento, os tipos de agregados e de aditivos, etc. (Bronze, 2016).

Destaca-se dentre suas propriedades, a alta resistência do concreto à compressão, como também sua baixa resistência à tração (cerca de 10% do valor da resistência à compressão), segundo Carvalho & Rodrigues, 2009.

A resistência à compressão do concreto é determinada através de ensaios padronizados de curta duração, conforme a NBR 5739 (2007). No Brasil, são utilizados corpos cilíndricos de diâmetro de base de 15 cm e altura de 20 cm e corpos de base 10 cm e altura de 20 cm. Geralmente, esses ensaios são realizados em corpos de prova com a idade padrão de 28 dias,

pois, conforme a NBR 6118 (2014), convencionou-se que esta é a idade em que a estrutura deverá entrar em carga (Araújo, 2010).

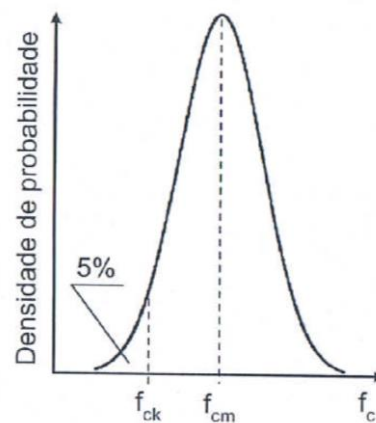
Para se obter corretamente o valor da resistência à compressão do concreto no ensaio, trabalha-se com a Teoria das Probabilidades, já que o valor da resistência f_c é uma variável aleatória que apresenta uma dispersão em seus resultados devidos a diversos fatores incontroláveis.

Com isso, admite-se, experimentalmente, que a função densidade de probabilidades das resistências se adequa a uma curva normal de Gauss, conforme indica-se abaixo. Através da análise da mesma, a NBR 6118 (2014) assume a chamada resistência característica do concreto f_{ck} ao valor cuja probabilidade de ser ultrapassado nos resultados dos ensaios é de 95%, ou seja, apresentando alto grau de confiança para os cálculos.

A resistência característica é, portanto, um valor estabelecido pelo projetista e deve ser garantido no concreto utilizado nas estruturas e comparado com o valor estabelecido no projeto a partir de corpos de provas moldados segundo os critérios da NBR 5738 (2015), que especifica a moldagem dos cilindros, para a estrutura a ser executada.

A resistência do concreto pode sofrer ainda variações que dependem de outros agentes externos antes da concretagem definitiva da peça. Nesse caso, para cálculos, trabalha-se com um coeficiente de minoração do concreto γ_c igual a 1,4 e obtém-se o valor da tensão de compressão de cálculo do concreto $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$.

Figura 1: Densidade de probabilidade da resistência à compressão do concreto.



Fonte: Araújo (2010).

Quanto a resistência à tração do concreto, ela pode ser obtida por meio de três ensaios diferentes: ensaio de tração axial, ensaio de compressão diametral e de flexão, segundo José

Milton de Araújo (2010). Entretanto, no dimensionamento de elementos estruturais seu valor é desprezado. Já que, como foi dito, é baixo (cerca de 10% em relação ao valor da resistência à compressão) tendo pouca relevância na capacidade de carga da estrutura e, portanto, não será destacado.

Outra propriedade importante do concreto e importante de se ressaltar para o desenvolvimento desse trabalho é o módulo de elasticidade ou deformação longitudinal do concreto ε_c e o correspondente diagrama tensão-deformação do concreto. O módulo de elasticidade deve ser obtido segundo ensaio descrito na NBR 8522 (2017), enquanto o diagrama tensão-deformação é obtido do ensaio de compressão simples de corpos de prova, com isso está normatizado pela NBR 6118 (2014).

O concreto apresenta um comportamento não linear, quando submetido a tensões de certa magnitude, por meio do diagrama tensão-deformação ($\sigma_c - \varepsilon_c$) observa-se que não há proporcionalidade entre tensão e deformação (Araújo, 2010).

Segundo a NBR 6118 (2014), é possível aferir o valor do módulo de elasticidade a partir da seguinte correlação com o valor da resistência à compressão característica, para casos nos quais os ensaios não tenham sido realizados ou não haja dados mais preciso sobre o concreto na idade de 28 dias:

$$\varepsilon_{ci} = 5600 \cdot f_{ck}^{1/2} \text{ (com } f_{ck} \text{ em MPa).}$$

Além disso, para análises estáticas de projeto, determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, deve-se utilizar o módulo de elasticidade secante, que a norma sugere o cálculo pela seguinte expressão:

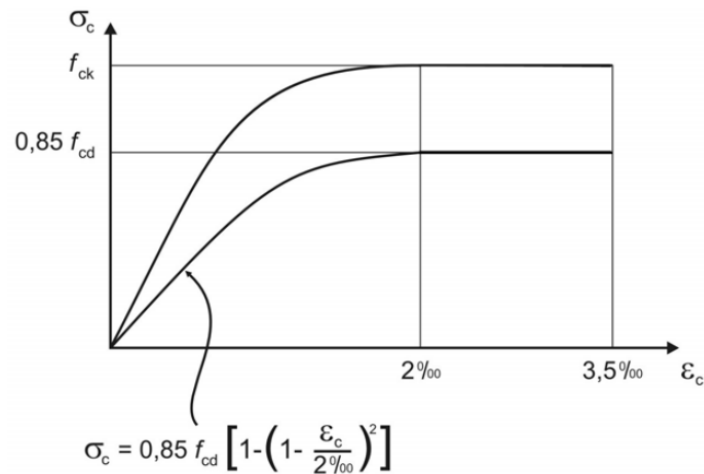
$$\varepsilon_{cs} = 0,85 \cdot \varepsilon_{ci}$$

Na avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal pode ser adotado um módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo de elasticidade secante, segundo a NBR 6118 (2014).

Quanto ao diagrama tensão-deformação, ele fornece as relações entre tensões e deformações específicas do concreto. A partir do mesmo, tem-se os resultados das tensões de ruptura e a forma de como há a relação tensão x deformação. Servindo assim, de base para adoções impostas em um modelo de cálculo.

Nos casos em que a tensão de compressão é menor que $0,5f_c$, admite-se uma relação linear entre tensões e deformações, utilizando-se o valor do módulo de elasticidade secante citado acima. Já para análises no estado limite último, utiliza-se o diagrama exposto abaixo, no qual houve uma simplificação para diagrama de tensões retangular simplificado, adotado pela norma.

Figura 2: Diagrama tensão x deformação idealizado.



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Percebe-se, ao observar o diagrama, que o mesmo já engloba as relações tensões-deformações características e de cálculo do concreto, além de fornecer a equação de segundo grau para o cálculo da tensão nos casos em que a deformação seja menor que 2‰.

2.1.1.2 Aço

A norma NBR 7480 (2007) especifica os tipos, características e outros itens sobre as barras e os fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. A subdivisão entre barras e fios se dá da seguinte maneira: as barras possuem diâmetros mínimos de 6,3 mm, e são obtidas por laminação a quente, enquanto os fios apresentam diâmetros máximos de 10 mm, obtidos por trefilação ou laminação a frio (Araújo, 2010).

A principal característica do aço que o faz se agregar ao concreto nas estruturas de construção civil é a sua boa resistência à tração. O processo de obtenção do valor da resistência à tração do aço é semelhante ao processo descrito do concreto.

Realiza-se certo número de ensaios à tração com corpos de prova moldados. O ensaio deve ser realizado de acordo com a NBR ISO 6892-1 (2013), procede-se uma análise estatística dos resultados e percebe-se que as resistências obtidas no ensaio seguem uma distribuição normal de Gauss, de forma semelhante a apresentada no concreto.

Através da curva, obtém-se o valor da resistência à tração característica do aço f_{yk} , com o grau de confiabilidade de 95%, ou seja, 95% dos valores obtidos no ensaio estão acima desse valor adotado.

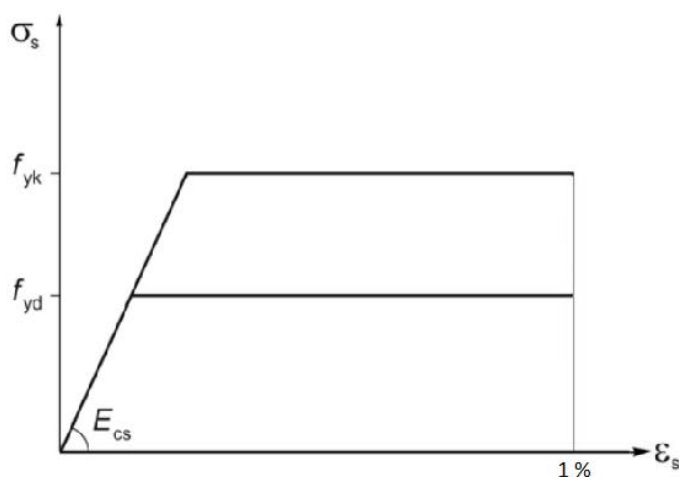
Do mesmo modo que citado no concreto, o valor da resistência característica pode sofrer algumas variações influenciadas por agentes externos. Para contornar isso, utiliza-se, nos cálculos, o valor da resistência de escoamento de cálculo do aço f_{yd} obtida através da razão entre o f_{yk} e o coeficiente de minoração da resistência do aço γ_s igual a 1,15.

O diagrama tensão-deformação do aço, também importante para o desenvolvimento desse trabalho, é obtido através do ensaio de tração com os corpos de prova já citado.

A forma do diagrama é influenciada pelo processo de fabricação. As barras, obtidas por laminação a quente, apresentam um patamar de escoamento no diagrama, enquanto os fios, obtidos por trefilação, não apresentam um patamar de escoamento definido (Araújo, 2010).

Para os casos de cálculo nos estados limite de serviço e último, a norma NBR 6118 (2014) permite, assim como permitiu no diagrama tensão-deformação do concreto, o uso do diagrama simplificado abaixo tanto para os aços com patamar como para os aços que não apresentam patamar de escoamento.

Figura 3: Diagrama tensão x deformação para aços de armaduras passivas.



Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Por fim, quanto aos aços, é importante ressaltar também, que para admissão em cálculos, o módulo de elasticidade do aço E_s é admitido como igual a 210.000 MPa. Além disso, os aços utilizados em estruturas de concreto armado recebem a designação CA seguido de um número que representa a designação da tensão de escoamento característica do aço em Kgf/mm^2 , como por exemplo, CA-50 indica $f_{yk} = 50 \text{ kgf/mm}^2$.

2.1.1.3 Concreto armado

O concreto armado trata-se de um material composto pela associação dos dois materiais citados e explanados acima, o concreto e o aço. As barras de aço são imersas na massa de concreto em quantidade e disposições que oferecem o combate às tensões geradas pelas ações.

Como já citado, o concreto possui uma boa resistência à compressão e uma baixa resistência à tração. As estruturas de concreto armado, assim, se valem das propriedades de seus materiais constituintes (a medida que o aço apresenta uma boa resistência à tração e maior deformabilidade) de tal maneira que a imersão da armadura na massa de concreto se dá, comumente, na região tracionada da peça.

A existência, portanto, desta configuração e o funcionamento conjunto desses dois materiais se dá, primeiramente, pela aderência. Devido à aderência, as deformações das barras de aço são praticamente iguais às deformações do concreto que as envolve. Em decorrência da baixa resistência à tração, o concreto fissa na zona tracionada do elemento estrutural. A partir desse momento, os esforços de tração passam a ser absorvidos pela armadura (Araújo, 2010). Caracterizando, assim, o conceito de armadura passiva em estruturas de concreto armado, como também o conceito de ruptura dúctil, que ocorre após a extensa deformação plástica da estrutura, apresentando patologias que indicam a possível ruína da mesma. Diferentemente do que viria a ocorrer em uma estrutura de concreto simples, por exemplo, na qual a ruptura seria frágil, sem dar avisos de sua iminente ruína.

Outro ponto importante, que permite a aplicabilidade de estruturas de concreto armado é o fato do concreto não atacar quimicamente a armadura, e pelo contrário, a proteger de possíveis corrosões. Isso se dá, desde que a abertura das fissuras seja limitada e que haja um revestimento mínimo de concreto, de acordo com o meio no qual a estrutura esteja inserida, para garantir a preservação das armaduras.

Destaca-se também, que os coeficientes de dilatação térmica do concreto e do aço são praticamente iguais ($\alpha_{\text{conc}} = 1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $\alpha_{\text{aço}} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Com isso, para variações de temperatura no ambiente as deformações são praticamente as mesmas tanto no concreto como no aço podendo, portanto, serem desprezíveis no dimensionamento.

Por fim, como todos os materiais utilizados para fins específicos, o concreto armado possui vantagens e desvantagens quanto ao seu uso. A seguir se apresentarão essas vantagens e desvantagens de acordo com Carvalho & Rodrigues (2009).

Como vantagens, o concreto armado possui boa resistência à maioria das solicitações; boa trabalhabilidade, se adaptando a várias formas; economia; as técnicas de execução são

razoavelmente dominadas em todo o país; é um material durável, caso bem executado; é resistente ao fogo, choques, vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e desgastes mecânicos.

Como desvantagens, temos o elevado peso das construções (decorrência do elevado peso específico $\gamma_{ca} = 25 \text{ kN/m}^3$), limitando o uso em determinadas situações ou aumentando o custo da construção; reformas e demolições são de difíceis execuções; é um bom condutor de calor e som, o que exige ocasionalmente associação a outros materiais; e necessita de um sistema de fôrmas e a utilização de escoramentos que precisam permanecer no local até o concreto atingir a resistência adequada.

2.1.1.4 Durabilidade das estruturas

A durabilidade das estruturas de concreto é um dos aspectos de maior relevância hoje em dia para os engenheiros projetistas. Segundo a NBR 6118 (2014), as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto conservem suas segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

Diante do atual cenário do mercado da indústria da construção civil, muitos engenheiros projetistas deixam de considerar da forma adequada as exigências das normas quanto a durabilidade das estruturas. Essa desatenção contribui para acelerar o processo de deterioração da construção, e conseqüentemente, reduzir o tempo de vida útil da estrutura.

O tempo de vida útil de uma estrutura, de acordo com a NBR 6118 (2014), é o período de tempo durante o qual se mantém as características das estruturas de concreto, atendendo os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e construção, como também de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

A agressividade do ambiente no qual a estrutura está inserida é um dos principais aspectos responsáveis pela diminuição na qualidade e na durabilidade da mesma. A norma indica que a agressividade do meio ambiente está associada às ações físicas e químicas que atuam sobre a estrutura. Abaixo, apresenta-se uma tabela na qual a agressividade ambiental é classificada para eventuais avaliações e medidas admitidas pelos projetistas.

Figura 4: Classes de agressividade ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Para garantir a durabilidade da estrutura por toda sua vida útil e evitar a ocorrência de possíveis deteriorações inesperadas, deve-se observar diversos critérios frente ao tipo e nível de agressividade previsto para a estrutura de acordo com a tabela acima.

Dentre esses critérios, destacam-se a qualidade apropriada do concreto, a necessidade de cobrimentos mínimos para as armaduras, a verificação da abertura das fissuras e o correto detalhamento das armaduras (Carvalho & Rodrigues, 2009).

A qualidade do concreto utilizado está diretamente associada a relação água-cimento, já que esta possui ligação com a resistência à compressão do concreto. E a NBR 6118 (2014) permite a escolha da resistência à compressão do concreto a partir da classe de agressividade ambiental.

O revestimento mínimo, como já dito, impede o contato das armaduras com o ambiente e, conseqüentemente, da corrosão da mesma garantindo sua aplicabilidade na estrutura. Assim como a abertura das fissuras, desde que as mesmas não ultrapassem valores na ordem de 0,2 a 0,4 mm (Araújo, 2010).

E, enfim, o correto detalhamento das armaduras, pois, desde que dispostas da maneira correta, as barras permitem e facilitam o lançamento e o adensamento do concreto. O contrário

disso acarretaria na segregação do concreto e comprometeria sua qualidade, facilitando a deterioração.

Vale destacar algumas medidas adicionais que podem ser tomadas para garantir a durabilidade das estruturas, como a aferição de sistema de drenagem eficiente que evite o acúmulo de água na superfície de concreto; definição de um plano de inspeção e manutenção preventiva; e a prevenção da estrutura por meio de espessuras de sacrifício ou revestimentos protetores em regiões de alta agressividade do ambiente (Araújo, 2010).

2.1.2 Histórico

Será indicado agora um pequeno histórico da utilização do concreto armado e os principais fatos que marcam o uso desse material, segundo Carvalho & Rodrigues (2009).

Como ponto inicial, tem-se em 1824 a invenção do cimento Portland pelo francês J. Aspdin. Em 1855, o também francês J.L. Lambot construiu um barco com argamassa de cimento reforçada com ferro. Já em 1861, ainda na França, Monier construiu um vaso de flores de concreto com armadura de arame enquanto Coignet, publicava os princípios básicos para as construções de concreto armado. Na década de 60 mesmo, Monier obtém a patente para seu vaso como também para tubos, placas, etc. E Coignet apresenta em uma exposição internacional em Paris, vigas e tubos de concreto armado. Em 1873, agora nos Estados Unidos da América, Ward construiu em Nova Iorque uma casa de concreto armado. Em 1900, inicia-se o desenvolvimento da teoria do concreto armado por Koenen, posteriormente, evoluída por Morsch. Por fim, em 1904, na Alemanha, as “Instruções provisórias para preparação, execução e ensaio de construções de concreto armado” são publicadas.

No Brasil, as primeiras construções deste tipo apareceram com a execução de casas em Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro. O uso vasto deste material em nossas cidades parece ser resultado da chamada “tecnologia formal adaptada”, ou seja, uma tecnologia influenciada tanto pelos materiais como pelos procedimentos, normas e tipologias dos países centrais, entretanto, aplicados de modo apenas parcial e incompleto.

2.1.3 Dimensionamentos

2.1.3.1 Considerações importantes

O dimensionamento de uma estrutura é um procedimento que visa garantir que ela suporte, dentro de um nível de segurança preestabelecido, ou seja, de forma segura, estável e sem deformações excessivas, todas as solicitações que lhe são impostas durante sua vida útil. De tal maneira, que o dimensionamento tem por objetivo impedir a ruína da estrutura, que engloba não só a ruptura da mesma como também as condições que garantam o seu perfeito uso.

Com isso, tem-se que o cálculo de uma estrutura consiste em comprovar que uma seção já conhecida atende aos requisitos necessários, suportando as solicitações que lhe são impostas ou dimensionar uma estrutura com a finalidade de fazer com que ela suporte possíveis solicitações máximas que lhe possam ser impostas (Carvalho & Rodrigues, 2009).

O método geralmente mais utilizado para o dimensionamento de uma estrutura é o método de cálculo na ruptura (ou dos estados-limites). A segurança e o bom desempenho da estrutura, nesse método, são garantidos fazendo com que as solicitações de cálculo sejam menores que as solicitações últimas, tais quais levariam a estrutura a ruína.

Segundo Carvalho & Rodrigues (2009), o método consiste em adotar os valores característicos para as resistências e para as ações (qualquer influência capaz de produzir estados de tensão ou deformação em uma estrutura); admite-se que as resistências efetivas possam ser menores que as características, assim como as ações possam ser superiores aos seus valores característicos; com isso, minoram-se as resistências e majoram-se as ações através de coeficientes de ponderações e combinações que levem ao dimensionamento da estrutura em sua situação mais desfavorável, garantindo a segurança da mesma.

Os estados-limite que são analisados nesse método de cálculo são: os estados-limite último e estados-limite de utilização. O primeiro está relacionado ao colapso, ou a outra qualquer forma de ruína da estrutura que determine sua paralisação. A segurança da estrutura deve ser verificada em relação aos seguintes estados-limite últimos: perda do equilíbrio da estrutura; esgotamento da capacidade resistente, por solicitações normais e tangenciais; esgotamento da capacidade resistente da estrutura, considerando efeitos de segunda ordem; estado-limite último provocado por solicitações dinâmicas; e colapso progressivo.

Já os estados-limites de utilização correspondem à durabilidade da estrutura, à aparência, ao conforto do usuário e à boa utilização de suas funções, conforme diz a NBR 6118 (2014). Verifica-se quanto a este estado-limite a formação de fissuras, a abertura de fissuras, a deformação excessiva, a descompressão ou compressão excessiva e a vibração excessiva da estrutura.

2.1.3.2 Hipóteses básicas

Como dito no tópico anterior, o dimensionamento de uma estrutura é feito, geralmente, através do método dos estados-limites, considerando efetivamente para garantir a segurança da estrutura o estado-limite último (ruína), impondo, desse modo, as deformações-limite dos materiais na seção mais solicitada da estrutura. Com isso, o estado-limite último pode ocorrer tanto pela ruptura do concreto comprimido como pela deformação excessiva da armadura tracionada (Carvalho & Rodrigues, 2009).

O detalhamento das peças de concreto armado passa principalmente pelo cálculo de armadura necessária para que a mesma resista a um momento fletor ocasionado pelas solicitações de cálculo impostas. O momento fletor é o principal responsável pela flexão nos elementos estruturais.

O foco desse trabalho é o dimensionamento de reforço estrutural em vigas, portanto, irá se restringir a análise das vigas de concreto armado. Nas vigas, o esforço normal é geralmente desprezível, o que leva conseqüentemente aos casos de flexão simples, pura e normal que ocorrem quando não há esforço normal atuando na seção.

Para o dimensionamento das armaduras à flexão, a norma estabelece algumas hipóteses e simplificações que são as seguintes:

A primeira é chamada de hipótese das seções planas de Navier-Bernouilli, que diz que as seções planas antes da deformação permanecem planas após a deformação. Em consequência disso, tem-se que o diagrama de deformações ao longo da altura de uma viga, por exemplo, é linear.

A aderência perfeita entre os materiais é outra hipótese, admite-se que não haja nenhum escorregamento da armadura, com aderência perfeita entre o aço e o concreto. Assim, as armaduras estarão sujeitas às mesmas deformações do concreto que as envolve (Araújo, 2010).

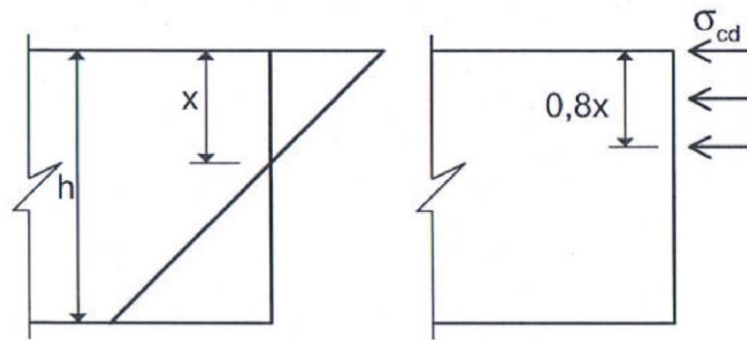
As tensões de tração no concreto, normais à seção transversal são desprezadas. De tal forma que todo o esforço de tração é resistido pelas armaduras.

A ruína da seção transversal para qualquer tipo de flexão no estado-limite último fica caracterizada por deformações específicas de cálculo do concreto (ϵ_c), na fibra menos tracionada, e do aço (ϵ_s), próximas ao bordo mais tracionado, em que uma delas ou ambas atingem seus valores máximos de deformação. Os diversos casos possíveis de distribuição das deformações do concreto e do aço definem os domínios de deformação que serão expostos mais abaixo.

Admite-se também o uso e as simplificações dos diagramas tensão-deformação do concreto e do aço, conforme já expostos. Como é possível analisar nos diagramas, a deformação máxima suportada pelo concreto é de 3,5 ‰, o início da deformação plástica do concreto se dá com o valor de 2,0‰, e o aço admite alongamento máximo de 10‰ ou, como exposto no diagrama, 1%.

Por fim, a norma NBR 6118 (2014) permite, para simplificação dos cálculos, a substituição do diagrama parábola-retângulo pelo diagrama retangular de tensões, exposto abaixo.

Figura 5: Distribuição das tensões no concreto.

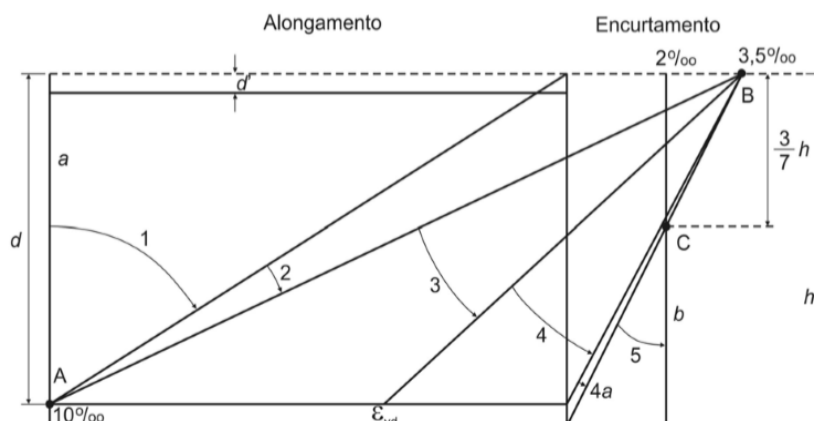


Fonte: Araújo (2010).

Como se observa na figura acima, a tensão no concreto é uniforme e igual a σ_{cd} , desde o bordo mais comprimido até uma distância $0,8x$, onde x é a profundidade da linha neutra. A tensão σ_{cd} equivale a $0,85f_{cd}$ nas zonas comprimidas constantes ou crescentes, no sentido das fibras mais comprimidas, a partir da linha neutra. E equivale a $0,80f_{cd}$ nos casos contrários ao anterior, porém com menor frequência de ocorrência.

Serão apresentados agora, finalmente, os domínios de deformação do concreto e do aço, quando um ou ambos atingem seus valores máximos de deformações específicas gerando a ruína da seção transversal, e as consequentes classificações das peças de concreto armado em função do tipo de ruptura em flexão simples.

Figura 6: Domínios de estado limite último de uma seção transversal.



Ruptura convencional por deformação plástica excessiva:

- reta a: tração uniforme;
- domínio 1: tração não uniforme, sem compressão;
- domínio 2: flexão simples ou composta sem ruptura à compressão do concreto ($\epsilon_c < 3,5\text{‰}$ e com o máximo alongamento permitido);

Ruptura convencional por encurtamento limite do concreto:

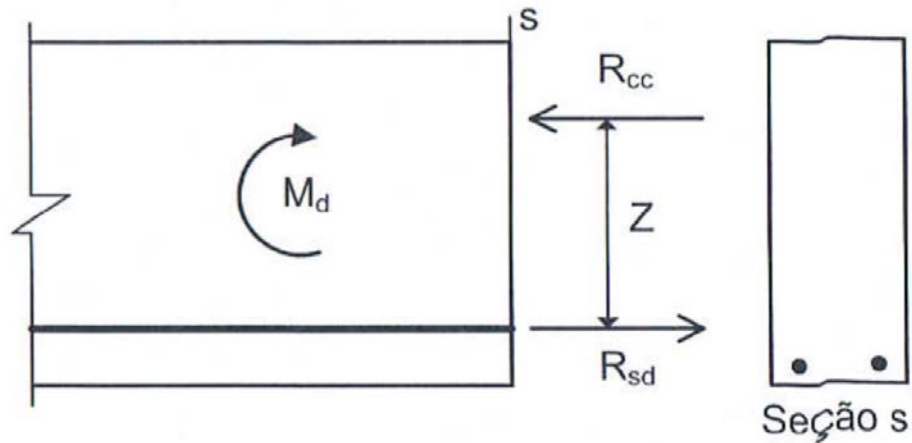
- domínio 3: flexão simples (seção subarmada) ou composta com ruptura à compressão do concreto e com escoamento do aço ($\epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$);
- domínio 4: flexão simples (seção superarmada) ou composta com ruptura à compressão do concreto e aço tracionado sem escoamento ($\epsilon_s < \epsilon_{yd}$);
- domínio 4a: flexão composta com armaduras comprimidas;
- domínio 5: compressão não uniforme, sem tração;
- reta b: compressão uniforme.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Como se observa na figura, os domínios 1 e 2 englobam a deformação excessiva da armadura, ou seja, a deformação na armadura mais tracionada atingir o valor de 10‰. Os domínios 3, 4 e 4a caracterizam-se pelo esmagamento do concreto em seções parcialmente comprimidas, a deformação na fibra mais comprimida atinge o valor de 3,5‰. E, por último, o domínio 5 ocorre quando há esmagamento do concreto em seções totalmente comprimidas, a deformação na fibra situada a $3h/7$ da borda mais comprimida atinge o valor de 2‰ (Araújo, 2010).

Nas peças submetidas à flexão simples, de ocorrência mais frequente, é necessário um equilíbrio de forças para que a estrutura suporte. Para que haja esse equilíbrio, é necessária que uma parte da seção seja comprimida e outra tracionada. Para que, com isso, forme-se um binário de forças da associação da resultante das tensões de compressão no concreto (R_{cd}) com a resultante de tração nas armaduras (R_{sd}), capaz de suportar o momento fletor gerador da flexão, como vemos abaixo. E isso só ocorre nos domínios 2, 3 e 4, que, portanto, serão foco maior de análises.

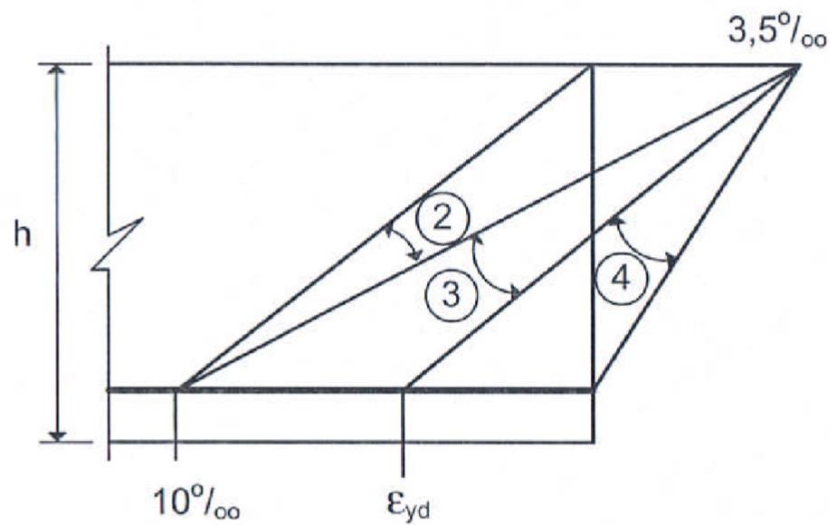
Figura 7: Equilíbrio em flexão simples de uma seção.



Fonte: Araújo (2010).

Assim, tem-se abaixo, os domínios correspondentes à flexão simples, onde ϵ_{yd} é a deformação de escoamento de cálculo do aço.

Figura 8: Domínios possíveis em flexão simples.



Fonte: Araújo (2010).

Assim, a classificação das peças de concreto armado quanto ao tipo de ruptura em flexão simples se dá da seguinte forma:

Seções normalmente armada: aquelas em que o concreto chegou ao seu estado-limite último e a armadura está no início do escoamento. Matematicamente, esta condição é representada por $\epsilon_{cd} = 3,5\text{‰}$ e $\epsilon_{sd} = \epsilon_{yd}$.

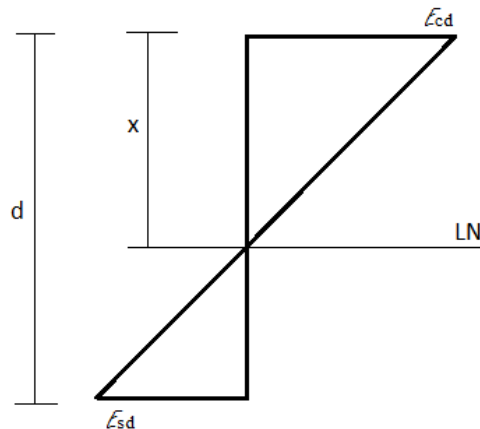
Seções sub-armadas: aquelas nas quais a armadura já escoou, isto é, a ruptura ocorre por deformação excessiva da armadura sem haver esmagamento do concreto. Trata-se de uma ruptura dúctil, com aviso prévio, já que há intensa fissuração pré-ruptura. Matematicamente, se dá através da seguinte expressão: $\epsilon_{sd} > \epsilon_{yd}$, ou mais especificamente, $\epsilon_{yd} < \epsilon_{sd} \leq 10\text{‰}$.

Nesse caso, pode-se definir dois domínios que englobam as seções sub-armadas. Domínio 2: $\epsilon_{sd} = 10\text{‰}$ e $\epsilon_{cd} < 3,5\text{‰}$; Domínio 3: $\epsilon_{yd} < \epsilon_{sd} < 10\text{‰}$ e $\epsilon_{cd} = 3,5\text{‰}$.

E por fim, as seções superarmadas: aquelas em que o concreto atingiu seu estado limite último e a armadura ainda não escoou, ou seja, ocorre uma ruptura frágil (sem aviso prévio), o que faz com que essas peças sejam evitadas através do uso de armaduras duplas (uma armadura tracionada e outra comprimida) (Araújo, 2010). Matematicamente, a representação ocorre por $\epsilon_{cd} = 3,5\text{‰}$ e $\epsilon_{sd} < \epsilon_{yd}$.

Para facilitar o entendimento dos domínios de deformação e das respectivas classificações das peças de concreto armado, pode-se introduzir o conceito do coeficiente Kx como sendo a razão entre a profundidade da linha neutra x com a altura útil d , ou seja, $Kx = x/d$.

Figura 9: Configuração das deformações na seção.



Fonte: Autor.

Com o diagrama de deformação da seção exposto acima, é possível obter o coeficiente Kx a partir das deformações de cálculo do concreto e do aço:

$$x / (d - x) = \epsilon_{cd} / \epsilon_{sd} \text{ a partir da semelhança de triângulos.}$$

$$\text{Como } Kx = x/d, \text{ temos: } Kx = 1 / (1 + (\epsilon_{sd}/\epsilon_{cd}))$$

Para aços CA-50, ou seja, com $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$ e módulo de elasticidade do aço $\epsilon_s = 210.000 \text{ Mpa}$, por exemplo, tem-se, em seção normalmente armada:

$$Kx_{lim} = x_{lim}/d = 1 / (1 + (\epsilon_{yd}/3,5\text{‰})) \text{ onde } \epsilon_{yd} = 435/210.000 = 2,07\text{‰}$$

Portanto, $K_{x_{lim}} = 0,628$.

Com isso tem-se que, para seções normalmente armadas: $K_x = K_{x_{lim}} = 0,628$;

Seções subarmadas: $K_x < K_{x_{lim}}$

Seções superarmadas: $K_x > K_{x_{lim}}$.

No modelo de dimensionamento das armaduras que será exposto a seguir, aparece nas deduções o coeficiente K_x . A partir dos dados iniciais, pode ser possível a determinação desse coeficiente, sua comparação com o valor limite e, conseqüentemente, a classificação da seção em normalmente armada, subarmada e superarmada. Vale lembrar que as seções superarmadas apresentam uma ruptura frágil e, portanto, necessitam do dimensionamento de armaduras duplas.

2.1.3.3 Modelo de cálculo de armaduras longitudinais em vigas de seção retangular

Armaduras Simples

Por meio dos conceitos, hipóteses, simplificações e admissões já apresentadas, é viável agora desenvolver o modelo de cálculo de armadura longitudinal em vigas de concreto armado, tal qual é responsável por combater os efeitos de tração oriundos do momento fletor.

O passo inicial para o cálculo é o equilíbrio de forças e momentos na seção. Como vemos na figura 7, as forças atuantes na seção são a resultante de compressão no concreto R_{cd} e a resultante da tração na armadura R_{sd} , além disso, atua na seção o momento fletor de cálculo solicitante M_d .

Com isso, temos:

$$\sum F_y = 0 \quad R_{sd} = R_{cd}$$

$\sum M_s = 0 \quad M_d = R_{cd} \cdot z = R_{sd} \cdot z$ onde z é o braço de alavanca entre as resultantes R_{cd} e R_{sd} .

Após isso, determina-se o valor da resultante R_{cd} :

$$R_{cd} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot y \text{ como } y = 0,8 x \text{ (Figura 5), temos:}$$

$$R_{cd} = 0,68 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot x \text{ se } K_x = x/d, \text{ então } x = K_x \cdot d, \text{ assim:}$$

$$R_{cd} = 0,68 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot K_x \cdot d$$

O ponto de atuação da resultante de compressão no concreto é o centro da região uniformemente distribuída no qual ele age, assim sendo igual a $0,4x$. Com isso, tem-se que:

$$z = d - 0,4 x, \text{ ou melhor, } z = d (1 - 0,4K_x)$$

A partir daí, define-se o coeficiente K_z como $K_z = (1 - 0,4K_x)$

Assim, $z = Kz \cdot d$

Tomando agora as quatro primeiras expressões, obtém-se:

$$Md = Rcd \cdot z = (0,68 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot Kx \cdot d) (1 - 0,4Kx) d$$

$$\text{Portanto, tem-se: } Md = 0,68 \cdot f_{cd} \cdot d^2 \cdot b_w \cdot Kx \cdot (1 - 0,4Kx)$$

$$\text{Ou melhor, } 0,68 \cdot Kx(1 - 0,4Kx) = Md / (b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd})$$

De tal maneira que se define o coeficiente Kc como:

$$Kc = Md / (b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd})$$

$$\text{Ou } Kc = 0,68 \cdot Kx(1 - 0,4Kx)$$

$$\text{E assim, } Kx = 1,25 - (1,5625 - 3,6765Kc)^{1/2}$$

Sabendo-se que a resultante de tração da armadura $Rsd = As \cdot \sigma_{sd}$, e utilizando as expressões obtidas, tem-se:

$$Md = Rsd \cdot z = As \cdot \sigma_{sd} \cdot (1 - 0,4 Kx)d$$

$$\text{Assim, } As = Md / (\sigma_{sd} (1 - 0,4Kx) d)$$

$$\text{Definindo o coeficiente } Ks \text{ como } Ks = 1 / (1 - 0,4Kx)$$

Finalmente, se obtém a seguinte expressão para As :

$$As = Ks \cdot Md / d \cdot \sigma_{sd}$$

Partindo do princípio que antes de se fazer a determinação da área da armadura longitudinal As , o projetista tem em mãos os valores referentes da largura b_w da viga, da altura útil d , da resistência à compressão de cálculo do concreto f_{cd} e do momento fletor de cálculo Md . E, observando a expressão obtida para o cálculo de As de armadura, percebe-se que o parâmetro referente à tensão de tração de cálculo da armadura σ_{sd} presente. Neste instante, pode-se fazer uma restrição quanto ao dimensionamento da armadura, impondo-se para a tensão σ_{sd} a tensão de escoamento de cálculo f_{yd} do aço da armadura, tornando a seção normalmente armada ou subarmada (o dimensionamento de peças superarmadas com armadura dupla será exposto a seguir), ou seja, fazendo-se com que $\sigma_{sd} = f_{yd}$. Assim,

$$As = Ks \cdot Md / (d \cdot f_{yd})$$

Em suma, pode-se então ter-se os seguintes passos para o dimensionamento da armadura:

- 1) adota-se ou determina-se os parâmetros Md , d , f_{cd} , b_w ;
- 2) calcula-se o coeficiente Kc por sua expressão;
- 3) calcula-se o coeficiente Kx ;
- 4) calcula-se o coeficiente Ks ;
- 5) obtém-se a área de aço pela última expressão.

Uma vez dimensionada a armadura As , os passos seguintes se limitam a detalhar a armadura na seção transversal.

Vale ressaltar que no modelo de cálculo apresentado a altura útil d (que se trata da distância entre o centro de gravidade da armadura, onde age a resultante de tração R_{sd} até o bordo mais comprimido) foi assumida como um dado. Entretanto, como o dimensionamento da armadura ainda não foi levado a termo, não se tem efetivamente a área da armadura A_s e, conseqüentemente, não se tem o número correspondente de barras de diâmetro comercial que corresponda a área da armadura A_s . Então, ainda não se tem a fórmula que estas barras se distribuem na seção o que implica não se ter a localização do centro de gravidade.

Portanto, em um primeiro instante, não se tem explicitamente o valor da altura útil d . Assim, para dar início ao dimensionamento faz-se uma adoção inicial da altura útil d . A experiência recomenda, para viga de edifícios, a adoção inicial para altura útil d fica em torno de 90% da altura nominal.

Com a altura útil adotada, realiza-se os cálculos e obtém-se a área de armadura A_s . Com esse valor em mãos, escolhe-se um diâmetro de barra comercial e, conseqüentemente o número de barras. É interessante tentar alojar o maior número de barras na região mais tracionada. Para tanto, deve-se colocar o maior número de barras possível por camadas (n_{max}). E, neste sentido, deve-se ter o espaçamento mínimo horizontal exigido pela norma (e_h).

$$N_{max} \leq (b_w - 2(cob + \Phi_t) + e_h) / (\Phi_l + e_h)$$

$$E_h \geq 1,2\Phi_{agreg} \text{ ou } \Phi_l \text{ ou } 2 \text{ cm.}$$

Para a correta distribuição da armadura, além do número máximo de barras por camada e do espaçamento horizontal mínimo, é necessário admitir o espaçamento vertical mínimo exigido pela norma para que a distância entre as camadas esteja de acordo com o exigido na normatização.

$$E_v \geq 0,5\Phi_{agreg} \text{ ou } \Phi_l \text{ ou } 2 \text{ cm.}$$

Assim, com o conhecimento desses conceitos é possível estabelecer a distribuição das armaduras. Uma vez estabelecida, pode-se fazer a localização do centro de gravidade y' em relação a um eixo x de referência que passa no ponto mais distante da linha neutra (eixo horizontal). Este ponto, pela distribuição das armaduras, é aquele em que a barra da primeira camada encosta no estribo.

A NBR 6118 (2014) considera que a resultante de cálculo da armadura é igualmente suportada pelas barras independentemente de sua posição desde que ocorra a seguinte condição:

$$y' \leq 0,10h$$

Se esta condição não for satisfeita, deve-se verificar se a distribuição proposta da armadura consegue resistir ao esforço de tração de cálculo da armadura R_{sd} . Para tanto, deve-

se verificar a posição de cada barra e avaliar a deformação de cálculo ε_{sd} de cada barra. Com o valor da deformação de cálculo ε_{sd} , entra-se no diagrama de cálculo tensão x deformação e retira-se a tensão correspondente de cada barra. A parcela de cada barra possui um esforço resistente de cálculo que, será obtido então, pela multiplicação do valor de cada área da barra pela tensão de cálculo obtida do diagrama. A soma de todas as parcelas de esforço resistente fornece o esforço resistente total de cálculo da armadura que deve ser igual ou superior a resultante de cálculo R_{sd} oriunda do momento fletor.

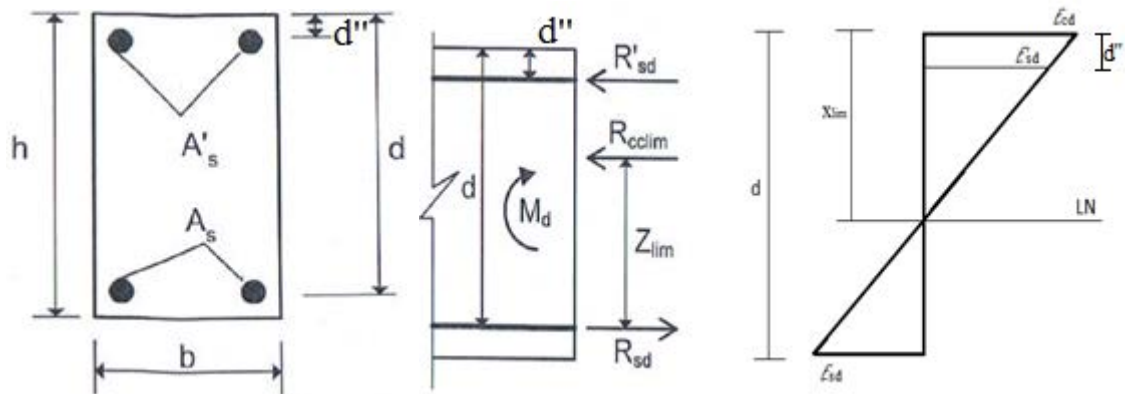
Armaduras duplas

Por vezes em um dimensionamento, pode ocorrer a necessidade de se manter as dimensões da seção transversal em uma certa estrutura. Pode ocorrer ainda que neste dimensionamento a condição $K_{x_{calc}} > K_{x_{lim}}$ (seção superarmada com ruptura frágil) se verifique para as adoções iniciais.

Assim, com as dimensões iniciais, pode-se fazer um dimensionamento valendo-se da composição chamada “armadura dupla” em que se insere armadura na região comprimida da viga auxiliando o concreto na resistência à compressão, permitindo avisos prévios como fissuras para eventuais rupturas da peça estrutural.

Desta forma, seja um dimensionamento que as condições iniciais sejam tais que $K_{x_{calc}} > K_{x_{lim}}$. Encaminha-se para a solução com a armadura dupla, mantendo-se as dimensões iniciais da seção transversal. Com isso, tem-se a seguinte configuração para a estrutura:

Figura 10: Configuração, resultantes e deformações da seção retangular com armadura dupla.



Fonte: Araújo (2010).

Ao analisar a configuração da estrutura, percebe-se alguns novos conceitos e símbolos inseridos. Na primeira figura, tem-se a configuração da seção retangular com a armadura dupla, onde A_s é a armadura final longitudinal tracionada, A'_s é a armadura final longitudinal comprimida e d'' , a distância do centro de gravidade da armadura comprimida até a fibra mais comprimida.

Na segunda figura, tem-se a configuração dos esforços resultantes da seção, com a introdução da resultante de esforço comprimido da armadura R'_{sd} . E na terceira, o diagrama de deformações em que é representada a deformação de cálculo da armadura comprimida ϵ'_{sd} medida no centro de gravidade da mesma, a uma distância d'' da fibra mais comprimida.

O dimensionamento das armaduras parte da imposição da seção que será tratada como normalmente armada (como é possível observar nas imagens, já que a profundidade da linha neutra x é equivalente ao seu valor limite) e com isso, há a necessidade de subdividir a área de armadura tracionada em parcelas. A_{s1} representa a primeira parcela da armadura tracionada e A_{s2} representa a segunda parcela da armadura tracionada. Assim, $A_{s1} + A_{s2} = A_s$.

Como o modelo de dimensionamento se baseia, inicialmente, na imposição da seção como normalmente armada, é necessário se calcular o valor de M_{dlim} associado. Vale lembrar que as expressões obtidas no modelo de cálculo da armadura simples também valem para as armaduras duplas.

$$M_{dlim} = K_{clim} \cdot b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}$$

Após isso, calcula-se o valor da primeira parcela da armadura tracionada, A_{s1} :

$$A_{s1} = K_{slim} \cdot M_{dlim} / (d \cdot f_{yd})$$

O terceiro passo se faz pelo cálculo do momento restante atuante na seção da peça estrutural ΔM :

$$\Delta M = M_d - M_{d_{lim}}$$

$$\text{Tem-se assim, } \Delta M_d = R_{sd} (d - d'') = R'_{sd} (d - d'')$$

Sabendo-se que $R_{sd} = \sigma_{sd} \cdot A_{s2}$ e que na condição normalmente armada $\sigma_{sd} = f_{yd}$, obtém-se:

$$A_{s2} = \Delta M_d / (f_{yd} \cdot (d - d''))$$

Com isso, é possível aferir A_s : $A_s = A_{s1} + A_{s2}$.

Por fim, calcula-se A'_s através da seguinte expressão:

$$A'_s = \Delta M_d / ((d - d'') \cdot \sigma'_{sd})$$

Onde σ'_{sd} é a tensão de cálculo na armadura comprimida, tal qual é determinada a partir da deformação de cálculo da armadura comprimida ε'_{sd} . Uma vez conhecida a deformação de cálculo, obtém-se, no diagrama tensão x deformação, a respectiva tensão de cálculo σ'_{sd} .

A deformação ε'_{sd} é possível de se obter a partir da seguinte expressão:

$$\varepsilon'_{sd} = [1 - d'' / (d \cdot K_{x_{lim}})] \cdot 3,5\%.$$

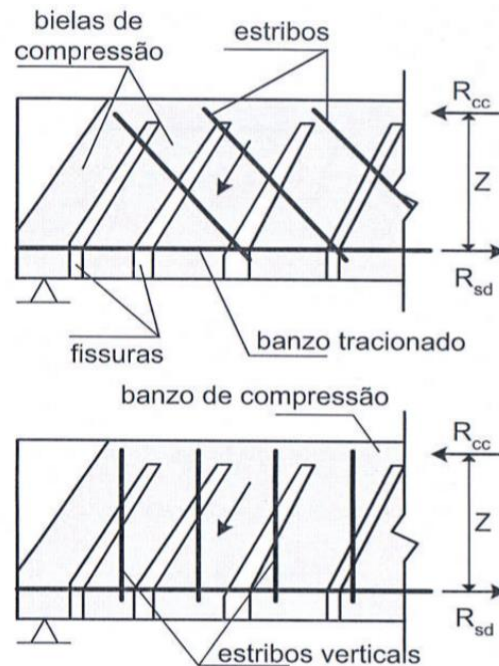
2.1.3.4 Modelo de cálculo de armaduras transversais em vigas

Como já visto nos tópicos anteriores, as armaduras longitudinais estão dispostas em paralelo ao eixo da peça e combatem as tensões oriundas do momento fletor. Já as armaduras transversais, que serão dimensionadas agora, são aquelas dispostas praticamente no plano da seção transversal e são responsáveis por combater as tensões de tração provenientes do efeito do esforço cortante na peça de concreto armado.

Analisando o comportamento de uma viga, no início do século passado, Morsch propôs um modelo de cálculo para armadura transversal. Alguns especialistas entendem que essa proposta de Morsch é o embrião do concreto armado, e originou toda a evolução, estudos e avanços nessa área.

Morsch idealizou que a viga de concreto armado pudesse ser representada por meio de um modelo de treliça. Nesse modelo, o banzo inferior tracionado seria representado pela armadura longitudinal, enquanto que o banzo superior comprimido seria representado por uma barra de concreto. Estes banzos, superior e inferior, seriam responsáveis por suportar os efeitos do momento fletor. Fica assim, portanto, para as diagonais da treliça (formadas pelas bielas de compressão de concreto e pelas armaduras transversais – estribos) suportar os efeitos do esforço cortante.

Figura 11: Analogia da treliça de Morsch.



Fonte: Araújo (2010).

No modelo inicialmente proposto por Morsch, a inclinação das diagonais comprimidas do concreto era definida pela inclinação θ e a inclinação da armadura transversal pela inclinação α . Como vemos na figura acima do modelo inicial, o valor de θ sempre corresponde a 45° e a inclinação da armadura α construtivamente pode assumir dois valores em relação ao eixo longitudinal da peça ($\alpha = 45^\circ$ ou $\alpha = 90^\circ$).

Vale destacar que o modelo de Morsch foi comprovado experimentalmente, ou seja, montou-se experimentos com e sem armadura transversal e verificou-se a existência ou não da forma, a quantidade de fissuras, e a abertura das mesmas.

Quanto ao dimensionamento da armadura transversal, tem-se dois grandes passos: o primeiro deles é verificar se a diagonal comprimida de concreto é aceita para a intensidade do esforço cortante. Já o segundo passo é o dimensionamento da armadura transversal propriamente dita desde que a diagonal do concreto comprimido tenha sido aceita.

Com o passar do tempo, e a evolução de técnicas e estudos acerca do assunto, o modelo proposto inicialmente por Morsch foi aperfeiçoado. Os ensaios demonstraram que a inclinação das diagonais é efetivamente menor que 45° e neste sentido, o modelo de Morsch foi ajustado para estas condições obtidas experimentalmente.

Além disso, deve-se considerar também a resistência inerente que a seção de concreto possui quanto ao cisalhamento. As versões recentes da norma atribuem a esta resistência de cisalhamento a chamada resistência dos mecanismos internos e é denotada por V_c . Por conta da inclinação da diagonal comprimida, inicialmente ser considerada $\theta=45^\circ$ e em seguida, observada que a inclinação inicial fica em torno de 30° . Com isso, o dimensionamento da armadura transversal pela NBR 6118:2014 pode ser feito indiferentemente por dois modelos, quais sejam:

A) Modelo I: $\theta = 45^\circ$

B) Modelo II: $30^\circ \leq \theta < 45^\circ$

Em cada modelo, verifica-se a diagonal comprimida do concreto e determina-se a área da armadura transversal por unidade de comprimento.

De certa forma, considerando a atuação do esforço cortante seja pelo modelo que for, tem-se sempre a necessidade inicial do cálculo da resistência.

A resistência do elemento estrutural, numa determinada seção transversal, deve ser considerada satisfatória, quando verificadas as seguintes condições:

$$V_{sd} < V_{rd2} \quad e$$

$$V_{sd} < V_{rd3} = V_c + V_{sw}$$

Onde, V_{sd} é a força cortante solicitante de cálculo, na seção;

V_{rd2} é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

V_{rd3} é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal;

V_c é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça (mecanismos internos);

V_{sw} é a parcela absorvida pela armadura transversal.

Modelo de cálculo I

O modelo I admite diagonais de compressão inclinadas de $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e admite ainda que a parcela complementar V_c , tenha valor constante, independente de V_{sd} .

A) Verificação da diagonal comprimida de concreto

$$V_{rd2} = 0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

Sendo $\alpha_v = 1 - f_{ck}/250$ (com f_{ck} em MPa)

Assim, é necessário que: $V_{sd} \leq V_{rd2}$

B) Cálculo da armadura transversal

$$(A_{sw}/s) = V_{sw} / (0,9 \cdot f_{ywd} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha))$$

O esforço cortante de cálculo V_{sd} é “combatido” a partir da introdução da armadura transversal que suporta uma parcela V_{sw} e também da contribuição dos mecanismos internos da seção de concreto quantificado pelo valor do esforço V_c .

$$V_{sd} = V_{sw} + V_c$$

$$V_c = V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad \text{onde } f_{ctd} = 0,15 \cdot f_{ck}^{2/3} \text{ (com } f_{ck} \text{ em Mpa)}$$

Modelo de cálculo II

O modelo II admite diagonais de compressão inclinadas de θ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, com θ variável livremente entre 30° e 45° . Admite ainda que a parcela complementar V_c sofra com o aumento de V_{sd} .

A) Verificação da diagonal comprimida

$$V_{rd2} = 0,54 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta (\cotg \alpha + \cotg \theta)$$

Sendo $\alpha_v = 1 - f_{ck}/250$ (com f_{ck} em MPa)

Assim, é necessário que $V_{sd} \leq V_{rd2}$.

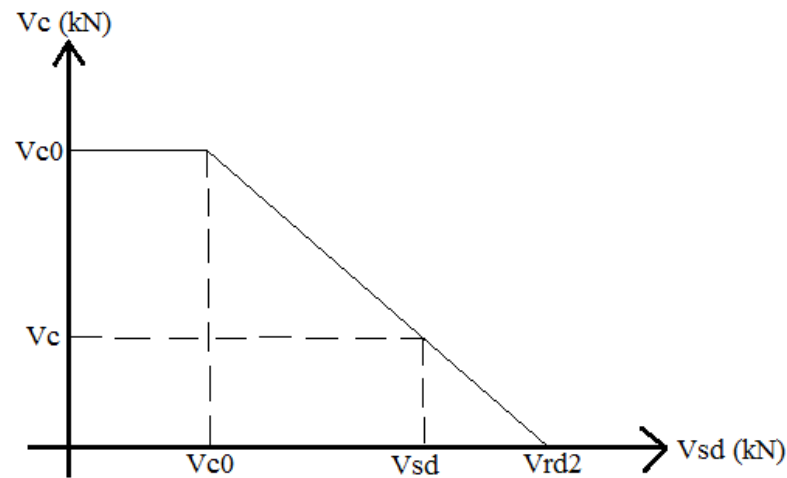
B) Cálculo da armadura transversal

$$(A_{sw}/s) = V_{sw} / (0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \sin \alpha)$$

Sendo $V_c = V_{c0}$ quando $V_{sd} \leq V_{c0}$, com V_{c0} igual ao modelo I

E $V_c = 0$ quando $V_{sd} = V_{rd2}$, interpolando-se linearmente para valores intermediários, conforme o gráfico a seguir.

Figura 12: Gráfico para cálculo de V_c no modelo de cálculo II.



Fonte: Autor.

Para $V_{c0} < V_{sd} < V_{rd2}$, tem-se: $V_c = (V_{rd2} - V_{sd}) / (V_{rd2} - V_{c0}) \cdot V_{c0}$

O espaçamento mínimo entre estribos, medido segundo o eixo longitudinal do elemento estrutural, deve ser suficiente para permitir a passagem do vibrador, garantindo um bom adensamento da massa. Já o adensamento máximo deve atender às seguintes condições:

Se $V_d \leq 0,67 V_{rd2}$, então $S_{m\acute{a}x} = 0,6 d \leq 300 \text{ mm}$;

Se $V_c > 0,67 V_{rd2}$, então $S_{m\acute{a}x} = 0,3 d \leq 200 \text{ mm}$;

Quanto a armadura transversal mínima constituída por estribos, tem-se:

$$(A_{sw}/s)_{\min} = \rho_{sw\min} \cdot b_w \cdot \text{sen } \alpha$$

Onde $\rho_{sw\min} = 0,06 \cdot f_{ck}^{2/3} / f_{ywK}$ (com f_{ywK} e f_{ck} em MPa).

2.2 PATOLOGIAS, RECUPERAÇÕES E REFORÇOS

2.2.1 Conceitos e considerações importantes

Tendo em vista os conceitos apresentados no tópicos 2.1.4 de Durabilidade de estruturas, assim como, a necessidade de dimensionamento das estruturas quanto as premissas do estado-limite de utilização, tem-se, no cenário atual, a grande necessidade por parte dos engenheiros em se ater as condições e critérios exigidos pelas normas para que as estruturas de concreto armado sejam projetadas e construídas para que atendam as condições necessárias de segurança, estabilidade e servicibilidade durante todo o período de vida útil designado a construção.

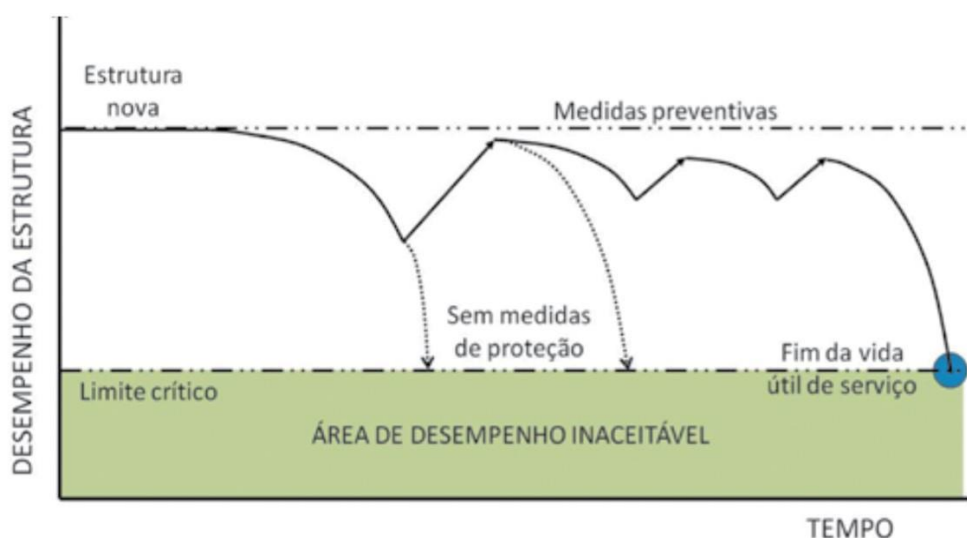
Além dos critérios que devem ser observados frente ao tipo e nível de agressividade do ambiente em que a estrutura se encontra já apresentados no tópico 2.1.4, é necessária também a manutenção preventiva da estrutura a fim de se evitar problemas quanto ao estado limite de serviço ou de utilização da estrutura que é aquele relacionado ao conforto do usuário em relação a aparência, e à durabilidade da mesma.

Conforme Souza & Ripper (1998) citam, entende-se por manutenção de uma estrutura o conjunto de atividades necessárias à garantia do seu desempenho satisfatório ao longo do tempo. Ainda segundo os mesmos autores, existem duas ramificações para a manutenção em estruturas de concreto: as estratégicas, previstas e relacionadas a prevenção e as esporádicas, tais quais são realizadas após a identificação de um determinado problema.

De toda forma, a manutenção de uma estrutura passa por inspeções e vistorias periódicas da estrutura associada a diagnósticos e laudos da estrutura e dos possíveis problemas observados, a fim de se evitar que um pequeno dano se torne um grande dano (cuja intervenção é maior e mais dispendiosa), assegurando o correto desempenho da estrutura.

Passa por desempenho, a ideia do comportamento em serviço do produto ao longo de sua vida útil. Conforme vemos na figura a seguir, o desempenho de uma estrutura decai ao longo do tempo e necessita da implantação de medidas preventivas (manutenção) previstas em projeto para que o desempenho permaneça satisfatório.

Figura 13: Variação do desempenho de uma estrutura de concreto armado ao longo do tempo.



Fonte: Helene (2011).

Entretanto, as estruturas e seus materiais se deterioram mesmo quando há a implementação das medidas preventivas e a manutenção estratégica está sendo realizada corretamente. Essa deterioração pode ter origem em diversos fatores aleatórios, desde o envelhecimento “natural” da estrutura até os acidentes, como também a irresponsabilidade ou descuido de profissionais que optam por materiais fora das especificações (muitas vezes por economia), pelo mal controle de qualidade desses mesmos materiais, ou mesmo pelo uso e dimensionamentos incorretos da estrutura.

A partir do surgimento dessas deteriorações e das preocupações, por parte dos engenheiros quanto ao desempenho e a durabilidade das estruturas, que surgiu o campo da Engenharia das Construções chamado por Patologia das Estruturas que se ocupa do estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas (Souza & Ripper, 1998).

Para facilitar o entendimento desse novo campo de estudo da Engenharia e tornar mais efetiva a busca pelo objetivo de se analisar o comportamento de uma estrutura e de suas degradações, Souza & Ripper propuseram uma sistematização que classifica os problemas patológicos como simples (diagnósticos claros e deteriorações visíveis nas peças) e complexos (exigem a necessidade de uma análise mais específica e profunda). Vale destacar que os problemas patológicos subdivididos e analisados nesse campo de estudo podem ter origem em falhas que ocorrem nas diversas fases do processo de uma obra estrutural: concepção ou planejamento, execução e utilização.

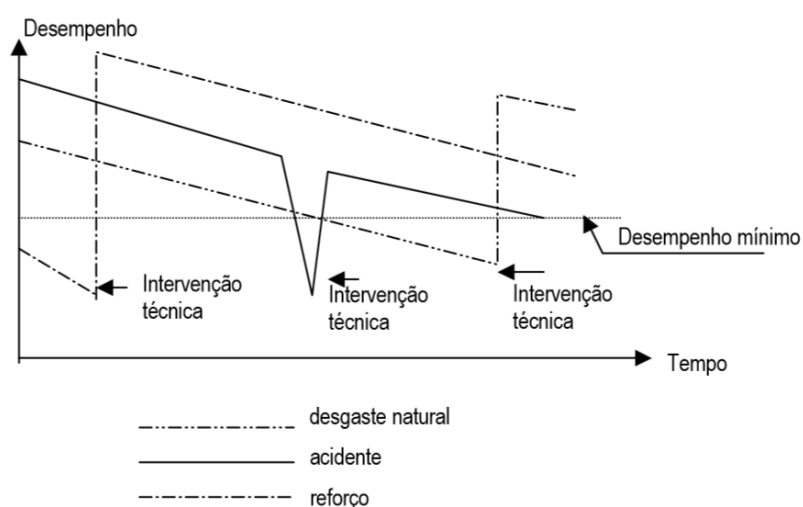
Ademais, é importante ressaltar que além da classificação das patologias e de sua origem, é vital ter conhecimento da causa da deterioração da estrutura antes de se realizar algum diagnóstico ou intervenção. Para que, não só a correta reparação da estrutura seja feita, como também se evite que a estrutura volte a apresentar a patologia analisada e exterminada.

Como citado, uma enfermidade ou deterioração de uma estrutura pode gerar apenas um pequeno dano a mesma, não levando seu desempenho a níveis insatisfatórios e podendo ser solucionada nas manutenções periódicas que se realizam. A intervenção que visa corrigir esse pequeno dano é chamada de reparo (Lapa, 2008).

Entretanto, algumas deteriorações podem ocasionar um maior dano a estrutura, levando-a a desempenhos insatisfatórios (abaixo do mínimo esperado para garantir segurança, estabilidade e servicibilidade). Todavia, não significa que a estrutura esteja comprometida ou condenada a demolição. Nesses casos, podem ser realizadas intervenções que devolvam a estrutura condições necessárias para seu uso.

As intervenções que buscam devolver à estrutura o desempenho original perdido são chamadas de recuperação, enquanto as intervenções que visam aumentar o desempenho, a capacidade resistente de uma estrutura, ou que são decorrentes de erros originais de projeto ou execução, são chamadas de reforço (Lapa, 2008). Tais intervenções podem se tornar vitais por diversos fatores que afetam a estrutura, como seu próprio desgaste natural, acidentes ou a necessidade de reforço (como vemos na figura abaixo).

Figura 14: Diferentes desempenhos de uma estrutura, com o tempo em função de diferentes fenômenos patológicos.



Fonte: Souza & Ripper (1998).

Abaixo, serão apresentados os principais materiais e técnicas utilizadas pelos engenheiros para os processos de recuperação ou reforço de estruturas de concreto armado.

2.2.2 Recuperações e reparo de estruturas

Antes de se apresentar os principais materiais e técnicas utilizadas pelos engenheiros para o processo de reparo e recuperação de estruturas de concreto, é importante destacar a necessidade de se realizar corretamente uma inspeção da estrutura seguida do correto laudo e diagnóstico dos problemas observados, suas origens e causas, pois, mediante a esses documentos que serão selecionados os materiais e, posteriormente, as técnicas que serão aplicadas na estrutura.

A escolha dos materiais e técnicas de correção, conforme Helene (1988) diz, deve estar coerente com o diagnóstico e as exigências de funcionamento da estrutura. Segundo Souza & Ripper (1998), apenas o perfeito conhecimento dos materiais poderá fazer com que o analista o utilize de forma adequada.

2.2.2.1 Materiais utilizados

Para o correto emprego dos materiais nas intervenções, Piancastelli (1998) sugere a observação quanto algumas características e propriedades como a resistência à compressão, à tração e ao cisalhamento; módulo de elasticidade; base química; resistência a fatores como fogo e abrasão; coeficiente de dilatação térmica; e outros.

Diante desse quadro, Souza & Ripper (1998) afirmam que, de forma coerente com a qualidade e economia, o maior destaque dentre os materiais para esses processos, é o de repor o concreto são onde era suposto que este assim existisse. Além do concreto usual, destaca-se também o uso de argamassa na estrutura por apresentar características e propriedades semelhantes ao material de origem. Deve se ater, entre outros pontos, ao traço e dosagem dos materiais para que se evite diferenças de retração entre o material aplicado e o material da peça a ser recuperada.

Seguindo nessa linha, podem ser utilizados concretos com aditivos que, de acordo com Cánovas (1988) têm por finalidade modificar ou implementar, em sentido positivo e permanentemente, certas propriedades da composição, para melhorar seu comportamento. Como também materiais elaborados previamente, que possuem como material base o concreto ou argamassa.

Destacam-se nesse ponto, o concreto com polímeros como os modificados por resinas epoxídicas (utilizadas como ligantes por apresentarem insensibilidade à umidade) utilizado para combater a corrosão de barras das armaduras. Além desse, outros materiais modificados como o concreto projetável, a pasta de cimento injetável, a argamassa seca, argamassas polimerizadas, e os concretos com sílica ativa, fibras ou cinza volante, são utilizados nas intervenções, de acordo com as características e propriedades dos materiais modificadores e a correta adequação à patologia que está sendo sanada.

Ressalta-se também alguns outros materiais existentes no mercado e utilizados pelos engenheiros nos processos de intervenção. Dentre eles, tem-se os adesivos que são usados para colar materiais a elementos estruturais, atuando como ponte de aderência, como os adesivos de base epóxi, que segundo Souza & Ripper (1998), são formados por um monômero e um catalisador e adquirem elevada resistência mecânica. E os *primers*, que, além de atuarem como ponte de aderência, fornecem proteção ao substrato. Tais materiais são aplicados em casos de reparos e reforços, reestabelecendo a monoliticidade do concreto e para colagem de chapas metálicas que serão citadas posteriormente.

Vale citar também, materiais para injeção no concreto como resinas sintéticas que também permitem o reestabelecimento da monoliticidade da estrutura e possuem alto poder adesivo. E o graute, que se trata de uma argamassa preparada a priori por empresas especializadas com fácil aplicação, elevada resistência mecânica e ausência de retração, utilizado para trabalhos de restauração de falhas (Souza & Ripper, 1998).

2.2.2.2 Técnicas aplicadas

Associado ao uso correto dos materiais, é importante a escolha da técnica adequada para se combater as patologias e as deteriorações observadas na estrutura. Entre outros pontos, a escolha adequada da técnica a ser aplicada passa, não só pela seleção dos materiais, como pela seleção dos equipamentos, da mão de obra e dos cálculos da capacidade de carga residual resistente pela peça.

As técnicas de intervenção mais utilizadas variam em complexidade de acordo com o dano causada pela patologia tratada. Intervenções na superfície do concreto, por exemplo, podem ser soluções para pequenos danos observados como fazer parte de um tratamento mais complexo necessário para combater uma deterioração de maior dano na estrutura.

Entre as principais intervenções na superfície de concreto utilizadas pelos engenheiros, tem-se: o polimento que é utilizado nos casos em que a superfície de concreto se apresenta

muito áspera; as lavagens que buscam eliminar qualquer impureza ou contaminante que possa estar contribuindo para o desempenho insatisfatório da estrutura e podem ser realizadas por meio de soluções ácidas, alcalinas, jatos de água, areia, vapor e ar; e também, pinturas de proteção, com o desenvolvimento de revestimentos, vernizes e pinturas, que visam proteger o concreto da ação de agentes agressivos.

Como citado, o preparo da superfície de concreto pode ser o passo inicial para o tratamento ou reparação de um dano estrutural que atinge em maior dano a peça. Entretanto, pode se dizer, que tal preparo é o responsável por grande parte do sucesso deste reparo, pois, para se atingir o objetivo da intervenção é necessário que o concreto possua a resistência adequada e solidez para receber o tratamento.

Porém, em alguns casos, a intervenção mais adequada devido aos riscos e danos é a demolição parcial ou total da estrutura por incapacidade de reaproveitamento ou por mudanças na destinação da estrutura e assim, parte dela não esteja integrada no processo de reconstrução ou melhoramento (Souza & Ripper, 1998).

Já em outros casos, a estrutura pode apresentar “doente” em alto grau, mas a intervenção pode torná-la novamente apta ao uso e com integridade garantida. Conforme Souza & Ripper (1998) citam, as intervenções que não passam pela introdução de materiais para aumentar ou reconstituir a capacidade portante da estrutura são chamados de reparos.

Os reparos são classificados em superficiais ou rasos, semi-profundos e profundos de acordo com a profundidade dos danos. Nos casos em que os danos possuem profundidade menor que 2,0 cm são chamados de rasos; entre 2,0 cm e 5,0 cm são chamados de semi-profundos; e acima de 5,0 cm de profundidade são conhecidos como reparos profundos (Souza & Ripper, 1998).

O correto reparo dos danos passa pela adequada utilização dos materiais disponíveis (como argamassa, concreto e graute), dos equipamentos e dos funcionários. Como Carmona Filho (2000) afirma, a reconstituição de uma seção passa pela imprimação do substrato para formação da ponte de aderência, o fechamento da cavidade, o acabamento da superfície reparada e a cura.

Destaca-se também, os tratamentos utilizados para solucionar uma das patologias mais comuns de ocorrerem em estruturas de concreto armado que são as fissuras. Os tratamentos visam reestabelecer o monolitismo da seção e passam pela perfeita identificação da causa da fissuração.

Entre outros, o tratamento de fissuras ocorre, principalmente, pela técnica de injeção de fissuras que garante o perfeito enchimento do espaço formados entre as bordas de uma fenda;

pela técnica de selagem das fissuras que busca a vedação dos bordos das fissuras ativas, por meio de um material com determinadas características para se adaptar a deformação da fenda, como resinas epoxídicas; e a técnica da costura das fissuras ou grampeamento que é utilizado nos casos de fissuras ativas com desenvolvimento em linhas isoladas e com deficiências localizadas de capacidade resistente nas quais se insere uma armadura adicional para resistir a tração que gerou a fissuração, tal armadura é chamada de grampo (Souza & Ripper, 1998).

2.2.3 Reforço de estruturas

No tópico anterior foram apresentadas as principais técnicas utilizadas pelos engenheiros para trabalhos de recuperação e reparo de estruturas. Neste tópico serão expostos os procedimentos mais utilizados em casos de reforço estrutural, mas que também podem ser usados em casos de recuperação e reparos das peças. Assim como, as técnicas já citadas podem ser úteis nos casos de reforço, principalmente em associação com outras, como por exemplo, as intervenções na superfície de concreto.

Conforme Souza & Ripper (1998) afirmam, os trabalhos de reforço em estruturas de concreto armado são solicitados quando se há a necessidade de: correção de falhas em projeto ou execução; aumento da capacidade resistente da estrutura; modificação da concepção estrutural; e outros.

Do mesmo modo que os procedimentos abordados nos processos de recuperação e reparo das estruturas, os profissionais responsáveis e capacitados para a realização dos trabalhos de reforço devem considerar diversos fatores como a disponibilidade e adequação dos materiais, da mão de obra, dos equipamentos, quanto a técnica escolhida a finalidade de uso da estrutura e sua arquitetura.

A técnica mais tradicional e comum de se utilizar em reforços de peças estruturais é o uso de armaduras de complementação ou de reforço com aumento da seção transversal, também chamada de encamisamento. Trata-se da mais usual por suas vantagens econômicas e facilidade de execução, além de permitir o uso de concreto projetado. Entretanto, apresenta desvantagens como a interferência na arquitetura da peça e o grande intervalo de tempo para que a estrutura volte a ser usada (Reis, 2001). Deve-se ter cuidado, nesse procedimento, com a aderência entre o concreto novo aplicado e o antigo já presente na estrutura, além da transferência de tensões entre eles, como também com as emendas e a ancoragem das barras de reforço inseridas.

O uso dessa técnica se dá em situações relativamente frequentes em que se há a necessidade de aumento da capacidade resistente da estrutura como também da recuperação da

mesma, quando, por corrosão, as barras já existentes perdem parte de sua seção original e assim, exigem complementação. Associada a essa técnica, tem-se o uso da lavagem da superfície dos materiais com a finalidade da remoção de qualquer impureza (Souza & Ripper, 1998).

Outra técnica tradicional e de uso frequente em trabalhos de reforço estrutural é a adição de chapas ou perfis metálicos. Faz-se uso desse procedimento em casos de emergência ou quando se há a necessidade de aumento da capacidade resistente das estruturas que não permitem grandes alterações nas geometrias das peças. Tornou-se muito usual por sua grande eficiência e rápida execução. Trata-se de adição de reforço a estrutura por colagem ou chumbamento de chapas ou perfis metálicos com o auxílio de resinas epóxi. Deve-se tomar cuidado com a preparação e limpeza da superfície de concreto a ser reforçada e com os mecanismos de transferência de esforços com alívio das cargas na estrutura e a correta escolha e aplicação da resina (Souza & Ripper, 1998).

Vale citar também outro método bastante utilizado e tradicional que é o método da protensão exterior. Observa-se o uso dessa técnica principalmente em obras de grande porte como pontes e viadutos, entretanto dispense alto custo e intervenções na geometria das peças. Suas principais vantagens se dão pela atuação em elementos deformados e em estruturas com as cargas de serviço aplicadas, ou seja, não se faz necessária o alívio das tensões. Trata-se de uma técnica com premissas semelhantes ao concreto protendido e permite solucionar problemas que os outros métodos, por ventura, não podem solucionar (Reis, 2001).

Por fim, vale destacar uma técnica inovadora que surgiu com o desenvolvimento da tecnologia e pesquisas em materiais poliméricos que se trata do reforço de estruturas de concreto armado com materiais poliméricos reforçados com fibras, especialmente, com compósitos de fibra de carbono. Foco desse trabalho de graduação e que será abordado mais profunda e especificamente no tópico posterior.

2.3 COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO

Como citado anteriormente, a técnica de uso de compósitos de materiais poliméricos surgiu recentemente em virtude do exponencial desenvolvimento de pesquisas em polímeros que propiciou o uso desse material, primeiramente, em outras áreas industriais como a aeroespacial, mas também, posteriormente, na construção civil.

Como alternativa para uso em casos de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado, destacaram-se os compósitos de materiais poliméricos que são os polímeros reforçados com fibras. As fibras mais utilizadas em associação com os materiais poliméricos são as fibras

de vidro, aramida e carbono. O vidro fora por muito tempo a fibra mais predominante de se aplicar na construção civil, em virtude de seu balanço econômico; já as aramidadas que são fibras orgânicas são menos utilizadas por seu alto custo e restrição quanto a durabilidade; com isso, prevalece, atualmente, o uso de materiais poliméricos reforçados com fibras de carbono em decorrência, principalmente, do fato de ser um material altamente promissor pela leveza dos átomos de carbono e de suas outras propriedades, que serão abordadas posteriormente.

É importante ressaltar que o procedimento de aplicação de materiais poliméricos reforçados com fibras decorre da necessidade do aumento da capacidade resistente do elemento estrutural, ou da recuperação do mesmo enfraquecido por corrosão das armaduras, por exemplo. Além disso, cabe ao engenheiro determinar a viabilidade dessa técnica para a estrutura, de acordo com o diagnóstico das patologias observadas e do orçamento prévio disponível.

2.3.1 Considerações iniciais

Para se entender corretamente os compósitos de fibra de carbono (CFC), é necessário, inicialmente, algumas considerações básicas e gerais que fundamentam o entendimento desse material em específico.

Primeiramente, é importante definir que compósito é um termo do latim *compositus*, que trata da combinação de dois ou mais materiais que diferem entre si na composição e na forma, no qual os constituintes retêm suas identidades, podendo ser identificados separadamente (Machado, 2002). Os compósitos, em geral, são formados pela associação de dois materiais: a matriz polimérica e o elemento estrutural.

A matriz polimérica, segundo Machado (2002), é a responsável por manter as fibras que as estruturam coesas, permitindo a transferência das tensões de cisalhamento entre os dois elementos estruturais (concreto e a fibra). E, de acordo com Beber (2003), possui a função de união das fibras que compõem o compósito como também, atuam na proteção das fibras à ação de fatores e agentes externos.

Enquanto o elemento estrutural é constituído pelas fibras. Definidas como um material filamental, com razão entre comprimento e diâmetro, no mínimo, igual a 100, segundo Beber (2003). Hollaway (1993) afirma que as fibras utilizadas nos compósitos devem apresentar elevada resistência e módulo de elasticidade, reduzida variação de resistência entre fibras individuais, estabilidade de propriedades ao longo da fabricação e manuseio e uniformidade de diâmetros e superfícies. Como dito, as principais fibras utilizadas na construção civil, são as fibras de vidro, aramidadas e carbono.

Há no mercado, atualmente, uma variada gama de matrizes poliméricas disponíveis para a produção de compósitos. As principais são de origem em resinas termorrígidas e termoplásticas. Nos casos de aplicação em reforços estruturais, as resinas termorrígidas são as mais indicadas, por fornecerem boa resistência química, estabilidade térmica e baixa fluência (ACI, 1996).

O comportamento e as propriedades de um compósito dependem da interação entre seus elementos, através da natureza, da forma e do arranjo estrutural entre seus componentes. Os polímeros reforçados com fibras vêm se destacando nas pesquisas em decorrência da alta resistência e rigidez apresentados, em virtude do correto tipo de fibra e da matriz polimérica escolhidos, como também da preocupação com a interface entre esses dois elementos.

As propriedades de um compósito dependem das propriedades da fibra e da matriz, da proporção de cada uma delas e, especialmente, da orientação das fibras (Beber, 2003). De acordo com Taylor (1994), o principal motivo para se reforçar um polímero é aumentar sua rigidez, o que gera um aumento na resistência à tração, à compressão e outras propriedades mecânicas. Segundo Beber (2003), a alta relação resistência/peso próprio e a excelente resistência à corrosão eletroquímica tornam os materiais compósitos interessantes para aplicações em estruturas. Os polímeros reforçados podem suportar tensões mais elevadas que seus componentes individualmente, em virtude da interação entre os mesmos e a, conseqüente, redistribuição das tensões provenientes.

Ressalta-se que a eficiência na redistribuição das tensões dentro dos compósitos é dependente da natureza e eficiente aderência entre os componentes. Em decorrência disso, alguns agentes de acoplamento podem ser empregados, visando um melhor desempenho, já que a interface entre matriz e fibra está em constante estado de tensões de cisalhamento que podem tornar seu desempenho insatisfatório.

2.3.2 Composição, características e propriedades

Matriz polimérica

A composição dos compósitos reforçados com fibras passa pela constituição de sua matriz polimérica e de seu elemento estrutural (fibra). Como citado no tópico anterior, a matriz polimérica, na maioria dos casos de compósitos aplicados em reforços estruturais, possui origem em resinas termorrígidas. As resinas termorrígidas, de acordo com Beber (2003), são aquelas que, quando curadas, pela ação do calor ou tratamento químico, transformam-se em um

produto infusível e insolúvel, com estrutura molecular tridimensional complexa. As principais resinas utilizadas nos compósitos são o poliéster, o éster-vinílico e o epóxi, com suas propriedades apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 1: Propriedades mecânicas de algumas resinas.

Propriedade	Resinas		
	<i>Poliéster</i>	<i>Éster-vinílico</i>	<i>Epóxi</i>
<i>Resistência à tração [MPa]</i>	20 – 100	79 – 90	55 – 130
<i>Módulo de elasticidade [GPa]</i>	2,1 – 4,1	3,0 – 3,3	2,5 – 4,1
<i>Deformação na ruptura [%]</i>	1 – 6	3,9 – 5,2	1 – 9
<i>Resistência à flexão [MPa]</i>	125	110 – 149	131
<i>Peso específico [kN/m³]</i>	9,8 – 14,2	10,9 – 12,9	10,8 – 12,7

Fonte: Beber (2003).

Destacam-se as resinas de epóxi, mais utilizada nos compósitos, comercializada desde a década de 40, que apresentam excelente aderência a diversos tipos de fibras e substratos, além de resistência a ação química e baixa retração durante o processo de cura (ACI, 1996).

Nos sistemas compósitos, uma grande variedade de resinas é utilizada para assegurar o desempenho do mesmo, desde imprimadores primários, regularizadores de superfície, saturantes, até adesivos e revestimentos protetores. A maioria, a base de epóxi, em virtude das qualidades e propriedades apresentadas por essa resina, que a torna mais compatível para o uso em compósitos aplicados em reforços estruturais.

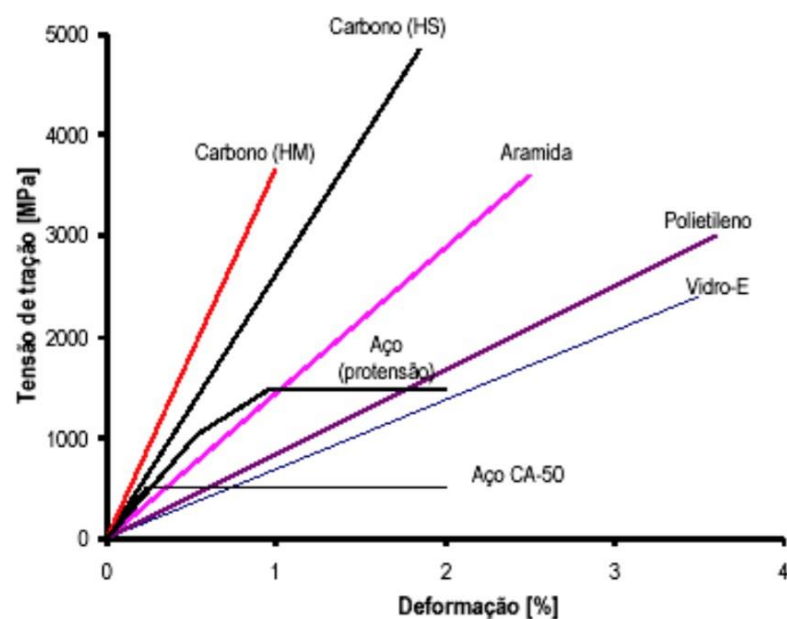
Conforme Machado (2002) afirma, os imprimadores primários possuem a finalidade de penetrar no substrato do concreto permitindo, por meio de seu adesivo específico, criando uma ponte de aderência para a resina de saturação ou para outro adesivo. Já os regularizadores de superfície são utilizados visando uma superfície lisa e desempenada para a colagem do compósito através do preenchimento de vazios e correção de imperfeições superficiais. Enquanto as resinas de saturação objetivam a impregnação das fibras que constituem o reforço estrutural dos compósitos, fixando-as no local adequado e propiciando um meio efetivo para a transferência de tensões de cisalhamento entre elas. Os adesivos possuem a finalidade de permitir a colagem dos materiais compósitos pré-impregnados ao substrato de concreto. E, por fim, os revestimentos protetores são utilizados para proteger a superfície colada dos compósitos das ações e degradações provenientes do meio inserido.

A matriz polimérica de um material compósito, portanto, deve assegurar proteção ao seu elemento estrutural, além de garantir a transferência de tensões. Para isso, faz-se uso, geralmente, de resinas de origem epóxi em diversos modos e características que confirmam resistência e dureza suficientes para assegurar sua finalidade. De tal maneira, que a matriz polimérica deve ter um alongamento de ruptura maior que o alongamento que ocorre no elemento estrutural (fibra), permitindo, assim, que o sistema permaneça com sua capacidade de carga mesmo após a tensão no elemento estrutural ter atingido seu valor de ruptura. Com isso, trabalha-se com a ideia da matriz polimérica possuir ruptura dúctil, enquanto a fibra possui ruptura frágil, evitando um colapso do sistema.

Elemento estrutural - fibras

Com a matriz polimérica dissecada, passa-se a caracterizar agora o outro componente desse sistema compósito: o elemento estrutural. No caso dos compósitos reforçados com fibras, o elemento estrutural constituinte é a própria fibra, tal qual possui a função de absorver as tensões de tração provenientes dos esforços atuantes na peça. Como dito, as principais fibras utilizadas em compósitos aplicados em reforços estruturais são as fibras de vidro, carbono e aramidas.

Figura 15: Diagrama tensão x deformação de fibras e aço CA-50.



Fonte: Beber (2003).

Conforme é possível observar na figura acima que explicita o diagrama tensão-deformação das fibras e do aço, as fibras de carbono apresentam a melhor relação tensão-deformação entre as disponíveis, justificando sua maior utilização em aplicações estruturais. Observa-se também o fato da fibra de carbono possuir uma capacidade de resistência a tração em torno de 3500 MPa com deformações específicas máximas na ordem de 1,5%.

Com isso, tem-se que a fibra de carbono é um material promissor, que se baseia nas ligações carbono-carbono e na leveza de seus átomos (Taylor, 1994). Apresenta alta resistência e rigidez, combinados com baixo peso. Seu alto módulo de elasticidade e conseqüente, resistência, dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre as fibras.

Souza & Ripper (1998) afirmam que as fibras de carbono resultam do processo de carbonização de polímeros orgânicos, com características mecânicas dependentes da estrutura molecular obtida. A produção das fibras requer processos a elevadas temperaturas (chegando aos 3000°C), das quais as fibras sintéticas não conseguem atingir sem derreter ou evaporar. Com o acrílico, porém, isso não ocorre e sua estrutura consegue se manter a altas temperaturas, durante a carbonização.

De acordo com Beber (2003), apenas três matérias-primas alcançaram importância na produção de fibras de carbono: rayon, poliacrilonitrila (PAN) e piche. O rayon fornece fibras de carbono com alta resistência e alto módulo de elasticidade, entretanto seu alto custo e dificuldade de obtenção, tornaram essa fibra inviável. As fibras de carbono originárias da poliacrilonitrila dominaram o mercado pela associação de baixo custo de produção em relação às demais e boas propriedades físicas. Enquanto as fibras de carbono provenientes do piche possuem alto módulo e alta resistência, desde que sua matéria-prima (muito barata em relação ao PAN e rayon) tenha sido convertida em cristal líquido previamente.

No processo de carbonização, as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono alinhados ao longo da fibra percussora, o que gera excelente resistência mecânica ao produto final. Quanto maior a temperatura do processo, maior será o módulo de elasticidade do material resultante e, conseqüentemente, maior será o custo de sua produção (Machado, 2002).

Com isso em mente, é possível se obter fibras de carbono com diferentes características e propriedades, tais quais levam a produção de variados tipos do material que são produzidos e aplicados de acordo com a finalidade desejada. Para a utilização em reforços estruturais, trabalha-se com compósitos de fibras de carbono de elevada resistência à tração e com módulo de elasticidade semelhante ao do aço de construção (Souza & Ripper, 1998), tais quais as fibras são dispostas unidirecionalmente (todas as fibras alinhadas em uma única direção) afim de se obter tais propriedades.

Compósito de fibra de carbono – CFC

Tendo em vista as características dos materiais constituintes de um compósito, entende-se que um compósito não se trata de um material homogêneo e, com isso, possui propriedades que dependem de inúmeros fatores, como o tipo de fibra utilizado, quantidade, direção e configuração na matriz polimérica.

A seguir, serão apresentadas as principais propriedades dos compósitos de fibra de carbono mais comuns de serem encontrados disponíveis para a comercialização, de acordo com Machado (2002) e Beber (2003).

Inicialmente, destaca-se o baixo peso específico do sistema, em virtude do baixo peso específico das fibras de carbono que varia de 1,6 a 1,9 g/cm³, valor cerca de cinco vezes menor que o do aço estrutural. Com isso, é possível se desconsiderar seu peso próprio nos reforços.

Outra característica inerente as fibras de carbono que constituem o compósito, são as propriedades mecânicas das mesmas, que, como dito, se caracterizam por apresentarem baixo módulo de elasticidade e alta resistência à tração. A seguir apresenta-se uma tabela com as propriedades típicas das fibras de carbono à tração disponíveis para composição dos compósitos reforçados.

Tabela 2: Propriedades típicas das fibras de carbono à tração.

TIPO DA FIBRA DE CARBONO	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPA)	RESISTÊNCIA MÁXIMA DE TRAÇÃO (MPA)	DEFORMAÇÃO DE RUPTURA (%)
DE USO GERAL	220 – 235	< 3790	>1,2
ALTA RESISTÊNCIA	220 – 235	3790 – 4825	>1,4
ULTRA ALTA RESISTÊNCIA	220 – 235	4825 – 6200	>1,5
ALTO MÓDULO	345 – 515	>3100	>0,5
ULTRA ALTO MÓDULO	515 – 690	>2410	>0,2

Fonte: Adaptado de Machado (2002).

Ciente das propriedades das fibras de carbono possíveis de produção e utilização em compósitos aplicados a reforços estruturais expostas acima, destacam-se as propriedades das fibras de carbono comercializadas pelo Sistema MBrace™ (comumente aplicadas na construção civil), disponíveis na tabela abaixo em comparação com uma fibra de vidro específica também muito utilizada.

Tabela 3: Características das fibras de carbono e fibra de vidro comercializadas pelo sistema MBrace™.

PRINCIPAIS PROPRIEDADES	FIBRAS DE CARBONO CF-130	FIBRAS DE CARBONO CF – 530	FIBRAS DE VIDRO EG – 900
MÓDULO DE ELASTICIDADE	228.000 MPa	372.000 MPa	72.400 Mpa
DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE RUPTURA	1,7 %	0,9%	2,1%
RESISTÊNCIA ÚLTIMA DE TRAÇÃO	3.790 MPa	3.517 MPa	1.517 Mpa
ESPESSURA DA LÂMINA POR CAMADA	0,165 mm	0.165 mm	0,353 mm

Fonte: Adaptado de Machado (2002).

Através da análise da tabela 3 acima, é possível se entender o motivo das fibras de carbono se destacarem em relação as fibras de vidro, em virtude de suas propriedades, especialmente, módulo de elasticidade e deformação específica. Em análise conjunta com a figura 15, observa-se que os compósitos de fibra de carbono apresentam um comportamento elástico linear, sem patamar de escoamento, até a ruptura, com pequenas deformações (menor que 3%) (Hollaway, 1993).

Vale ressaltar também que as fibras de carbono proporcionam ao compósito grande rigidez e resistência, valores que variam entre 1500 e 5000 MPa para a resistência do material. Além disso, a resistência à fadiga dos compósitos de fibra de carbono é muito superior à resistência dos metais e dos compósitos reforçados com outras fibras, especialmente nos casos em que as fibras de carbono estão dispostas unidirecionalmente.

A seguir, será apresentada uma tabela que expõe as principais propriedades dos CFCs de acordo com a orientação das fibras no sistema que evidencia a razão pela disposição das fibras em uma única direção.

Tabela 4: Propriedades típicas dos sistemas compósitos de fibra de carbono de acordo com a orientação das fibras.

ORIENTAÇÃO DO SISTEMA CARBONO/EPÓXI	MÓDULO DE TRAÇÃO (GPA)	TENSÃO MÁXIMA DE TRAÇÃO (MPA)	DEFORMAÇÃO DE RUPTURA (%)	COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
0°	117 – 145	1380 – 2070	1,0 – 1,5	≈ 0
0°/90°	55 – 76	690 – 1035	1,0 – 1,5	1,7
45°/-45°	14 – 28	175 – 275	1,5 – 2,5	5.5 – 8,3

Fonte: Machado (2002).

A simbologia 0° representa a orientação unidirecional das fibras enquanto as simbologias 0°/90° e 45°/-45° representam a fibra igualmente orientada segundo as duas direções ortogonais indicadas. Por meio da análise dos valores expostos na tabela, percebe-se que o melhor comportamento da fibra se dá quando a mesma está orientada em uma única direção, com destaque ao seu coeficiente de expansão térmica aproximadamente nulo que evita problemas com expansão ou retração do material de acordo com a variação de temperatura do ambiente.

Diante de um ambiente com alta intensidade de calor e umidade constantes sobre o compósito, pode haver alguma degradação do mesmo. Entretanto, nenhuma degradação que possa comprometer o seu desempenho. Um compósito do sistema MBrace™ exposto por 10.000 horas a condições ruins de umidade e calor mantém, no mínimo, 85% de seu valor de resistência à tração.

Nessa mesma linha, os compósitos de fibra de carbono respondem satisfatoriamente ao efeito da água salgada ou alcalina sobre seu sistema. Após 10.000 horas de exposição, mantém-se cerca de 95% de sua resistência à tração. O módulo de elasticidade do compósito não se altera quanto a exposição tanto ao calor e umidade como ao efeito da água salgada ou alcalina.

Quanto ao comportamento do sistema CFC a ação do fogo, quesito muito importante na segurança da estrutura, pode-se dizer que sua resistência é basicamente determinada pela qualidade da resina utilizada no compósito. Como a maioria das resinas epoxídicas utilizadas nos compósitos apresentam temperatura vítrea na ordem de 90°C (ou seja, a partir dessa temperatura, não consegue manter sua integridade física), os projetistas costumam desconsiderar a resistência ao fogo desses materiais compósitos, considerando somente a resistência ao fogo da estrutura não-reforçada (Machado, 2002). Entretanto, em comparação com o sistema tradicional de reforço estrutural de adição de chapas metálicas, o sistema CFC

consegue se manter sem desprendimento por um tempo maior, em virtude, principalmente, à baixa condutividade térmica em relação ao aço (Beber, 2003).

Ciente das principais propriedades dos materiais compósitos com fibra de carbono, pode-se afirmar, de acordo com Beber (2003), que os CFCs se destacam pois: as fibras de carbono apresentam uma alta gama de características e propriedades que propiciam o uso do sistema em diversas aplicações na engenharia; as fibras de carbono possuem alta rigidez e resistência; o sistema não sofre grandes alterações à ação de fatores e agentes externos; e, em comparação com as outras fibras, possui a melhor relação entre as propriedades e o peso próprio.

Em suma, os materiais compósitos de fibra de carbono apresentam uma série de vantagens que explicam a aplicação desse sistema cada vez mais comum em trabalhos de reforços estruturais, conforme cita Beber (2003).

Destacam-se a extraordinária resistência dos compósitos, cerca de 3 a 5 vezes maior que do aço; elevada resistência a ataques químicos e corrosão, por se tratar de um material inerte; baixo peso próprio, cerca de 20% da densidade do aço; facilidade de transporte do material, versatilidade de projetos, não alterando a configuração arquitetônica da estrutura; facilidade de aplicação na estrutura, associada a menor necessidade de fixação em comparação as chapas metálicas; menor tempo de interdição no processo de intervenção; e, por fim, maior durabilidade, não exigindo grande manutenção durante sua vida útil.

Do mesmo modo, o sistema CFC apresenta algumas desvantagens que trabalham contra seu uso frequente em aplicações da engenharia como a necessidade quanto à preparação perfeita da superfície do concreto, já que, em casos de superfícies irregulares, pode haver ruptura frágil ou destacamento do sistema; a resistência ao fogo do sistema, em virtude da baixa temperatura vítrea da resina de aplicação; e, não menos importante, o alto custo na produção e aplicação desse sistema na estrutura que restringe seu uso a grandes obras da engenharia civil.

2.3.3 Histórico

A exponencial evolução das pesquisas científicas e da tecnologia no século passado, possibilitaram o desenvolvimento e a descoberta de novos materiais como os materiais poliméricos que propiciou o uso do mesmo em uma variada gama de aplicações no âmbito industrial.

As primeiras aplicações dos polímeros reforçados com fibras datam, segundo Machado (2002), do início dos anos 50. Historicamente, é possível observar que o emprego desses materiais ocorria nas indústrias naval, espacial, automobilística e outras, sendo utilizados em

projetos das NASA, nos EUA até, hoje em dia, em carros de Fórmula 1 para proteção dos pilotos, sendo produzidos industrialmente a partir de 1982.

Especificamente, quanto ao uso dos compósitos em reforços estruturais, pode-se dizer que as pesquisas e aplicações iniciaram nos meados da década de 80 em laboratórios da Suíça, na Europa (Beber, 2003). Entretanto, o governo japonês pode ser dito como um dos propulsores do uso dessa técnica na construção civil.

Preocupados com a iminente ameaça de abalos sísmicos no país, e principalmente, na capital Tóquio, durante a década de 90, o governo japonês aliado com empresas particulares estendeu as pesquisas nos compósitos poliméricos para desenvolve-los ao ponto de não só recuperar as estruturas deterioradas com as consequências dos abalos sísmicos como prevenir, através do reforço estrutural com CFC, as estruturas das possíveis patologias que viriam a surgir. Tais esforços foram destinados, especialmente, as estruturas do sistema viário do país para que o mesmo pudesse ser utilizado em casos de emergência.

Com a ocorrência do terremoto de Kobe em 1995, tornou-se evidente o desenvolvimento do uso desse material que evitou inúmeros desastres no distrito. Além disso, propiciou a implementação de alguns ajustes que permitiram que essa técnica fosse disseminada a Europa e outros continentes (Souza & Ripper, 1998), especialmente na Suíça onde já ocorriam algumas aplicações e o conceito havia sido proposto inicialmente.

No Brasil, a primeira aplicação dos compósitos de fibra de carbono data de 1998 com o reforço estrutural do Viaduto de Santa Teresa em Belo Horizonte – MG, com o uso do sistema MBrace™ criado em 1997 nos Estados Unidos a partir dos tecidos manufaturados no Japão, e muito utilizado nos reforços estruturais em todos os países.

Atualmente, conforme afirma Machado (2002), podem ser encontradas mais de 150 obras no Brasil em que o reforço estrutural foi realizado satisfatoriamente com CFC em construções não só de concreto armado, como concreto protendido e estruturas metálicas de obras de arte, edifícios comerciais, industriais e residenciais.

2.3.4 Processo de aplicação em estruturas

O processo construtivo de aplicação dos compósitos de fibra de carbono em estruturas de concreto armado passa inicialmente pela conceituação do processo de produção do material. Conforme afirma Beber (2003), existem dois sistemas de reforço estrutural com CFC: sistemas pré-fabricados e sistemas curados *in situ*.

Os sistemas pré-fabricados são responsáveis pela produção de laminados semi-rígidos de CFC com as fibras dispostas unidirecionalmente em substituição a tradicional técnica de aplicação das chapas metálicas. As fibras de carbono são impregnadas por uma resina termorrígida através de um processo de pultrusão que controla a largura e a espessura do compósito obtido com seção constante.

Enquanto o sistema curado *in situ* trata-se de um sistema em que as fibras contínuas, apresentadas na forma de fios, mantas ou tecidos, são aplicadas sobre um adesivo epóxi espalhado a priori sobre a superfície de concreto a ser reforçada. Com isso, o sistema se transforma em um compósito de fibra de carbono apenas após a execução do reforço, devendo apresentar o mesmo comportamento do sistema laminado pré-fabricado.

A seguir, apresenta-se uma tabela com as principais características e diferenças entre os dois principais sistemas de reforço com CFC.

Tabela 5: Principais características e aspectos de instalação de sistemas de reforços com CFC.

Característica	Sistemas Pré-fabricados	Sistemas curados <i>in situ</i>
Forma	tiras ou laminados	mantas ou tecidos
Espessura	1,0 a 1,5 mm	0,1 a 0,5 mm
Utilização	colagem dos elementos pré-fabricados com adesivo	colagem e impregnação das mantas e tecidos com resina (moldado e curado <i>in situ</i>)
Aspectos típicos da instalação	salvo condições especiais, aplicável somente em superfícies planas	independente da forma da superfície, necessidade de arredondamento dos cantos
	adesivo tixotrópico para colagem	resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação
	geralmente uma única camada	freqüentemente várias camadas
	rigidez do compósito e tixotropia do adesivo permitem a tolerância de algumas imperfeições na superfície reforçada	aplicação do <i>putty</i> é necessária para prevenir o descolamento por imperfeição da superfície
	aplicação simplificada, maior garantia de qualidade (sistema pré-fabricado)	versatilidade de aplicação, necessita de rigoroso controle de qualidade
	controle de qualidade (má aplicação e mão-de-obra de baixa qualidade = perda da ação compósita entre o reforço e a estrutura, problemas na integridade do reforço a longo prazo)	

Fonte: Beber (2003).

Destaca-se dentre os sistemas existentes, o uso do sistema curado *in situ* com mantas e tecidos (ou laminados também) de compósitos de fibra de carbono com 300 g/m² de massa e espessura por volta de 0,165 mm, com a aplicação frequente de mais de uma camada no elemento estrutural.

Com os sistemas de reforço estrutural com CFC existentes apresentados, passa-se ao detalhamento do processo de aplicação do material sobre a estrutura, que vai desde a recuperação e preparação do substrato até a aplicação de revestimentos protetores e testes de verificação.

Vale destacar que o desempenho satisfatório de um reforço estrutural com compósitos de fibra de carbono será diretamente dependente da qualidade de aplicação do mesmo sobre a superfície dos elementos, podendo ser assim divididos em duas etapas principais: a de recuperação e preparação da superfície receptora e da aplicação do compósito em si (Souza & Ripper, 1998).

Recuperação e Preparação da Superfície

Os compósitos de fibra de carbono constituem uma técnica de reforço estrutural que é aderida externamente às estruturas necessitadas da intervenção. Para tanto, faz-se necessário tornar o substrato de concreto, receptor do reforço, íntegro e são para receber e transferir os esforços atuantes na interface entre o compósito e concreto (Machado, 2002).

Com esse intuito, ocorre inicialmente o processo de recuperação do substrato de concreto, com a correção de todas as patologias diagnosticadas na observação e no laudo da estrutura. Cabe evidenciar a existência de corrosão nas armaduras que torna necessária a passivação e recuperação das barras, como também a remoção e recomposição do concreto degradado.

É importante destacar que as causas das patologias observadas devem ser descobertas, a fim de sanar tais problemas, evitando a ocorrência futura de novas patologias na estrutura.

Outra patologia muito comum de ocorrer é o aparecimento de trincas e fissuras com abertura maior que 0,25mm. Nesses casos, deve ser aplicada a injeção de resina epóxi para a recuperação do substrato (Beber, 2003).

Com a superfície receptora do reforço recuperada das possíveis patologias existentes, passa-se ao processo de preparação da mesma para aplicação do compósito. A preparação da superfície se dá através de um processo chamado esmerilagem, o qual se utiliza de um equipamento chamado esmerilhadeira, equipada com um disco diamantado como vemos na figura abaixo.

Figura 16: Esmerilagem da superfície de concreto.



Fonte: Beber (2003).

Tal processo pode ser realizado por meio da utilização de abrasivos, jatos de água ou areia, e lixação. Possui como finalidade, a limpeza da superfície através da remoção de sujeiras, partículas sólidas não aderidas e recobrimentos existentes, deixando o substrato com a superfície o mais regular possível, como vê-se a seguir.

Figura 17: Superfície de concreto preparada para a aplicação do reforço.




Fonte: Beber (2003).

Diferentemente dos outros procedimentos existentes que fazem uso da técnica do apicoamento, por exemplo, para retirada das sujeiras e da camada de nata de cimento do substrato para aplicação de concreto projetado ou argamassa de reparação, sem se preocupar com a regularidade.

A seguir tem-se a exposição de uma tabela que apresenta os valores máximos aceitáveis de irregularidades da superfície para aplicação dos sistemas CFC no substrato de concreto. Observa-se que os sistemas curados *in situ* possuem uma restrição maior quanto aos valores das irregularidades.

Tabela 6: Valores aceitáveis de irregularidades do substrato.

SISTEMA DE REFORÇO		
	<i>Irregularidade aceitável em um comprimento de 2 m</i>	<i>Irregularidade aceitável em um comprimento de 0,3 m</i>
Laminado pré-fabricado (espessura > 1 mm)	10 mm	4 mm
Laminado pré-fabricado (espessura < 1 mm)	6 mm	2 mm
Curado <i>in situ</i>	4 mm	2 mm

Fonte: Beber (2003).

Vale o destaque para a necessidade de arredondamento dos cantos das peças envolvidas na aplicação do compósito. Faz-se preciso o arredondamento para que se evite a concentração de tensões nas fibras de carbono e para se eliminar possíveis vazios na interface dos materiais que possam comprometer o desempenho do reforço.

É comum a utilização de massas regularizadoras como o *putty filler* para suavização, acabamento dos cantos e eliminação dos vazios. Os cantos devem, após o processo de arredondamento, possuir raio mínimo de 3,0 cm, segundo Souza & Ripper (1998).

Após o processo de recuperação e preparo do substrato de concreto, o mesmo deve se apresentar seco para a aplicação do sistema CFC, pois a umidade pode impedir a penetração das resinas e tornar o desempenho do reforço insatisfatório. Além disso, deve ser aplicado um recobrimento de proteção à superfície, evitando-se sua contaminação até a aplicação das outras etapas.

Aplicação do compósito de fibra de carbono

Com a superfície receptora do reforço já recuperada e preparada, pode-se iniciar o processo de aplicação do compósito na peça estrutural. Essa etapa se inicia com a aplicação do imprimador primário ou *primers* que se faz através do uso de um ferramental simples, como pincéis ou roletes.

Os *primmers* são aplicados com o objetivo de melhorar as características do substrato de concreto por meio de sua impregnação nos poros da superfície, e também de funcionar como ponte de aderência eficiente para a correta adesão do compósito ao sistema estrutural. Cabe ressaltar que o imprimador é aplicado exclusivamente sobre a área de atuação do compósito.

Decorrido um intervalo de uma hora após a aplicação do imprimador primário, tem-se a colocação do regularizador de superfície (ou *putty fillers*) que é responsável, segundo Machado (2002), pela calafetação e regularização da superfície, buscando um substrato desempenado contínuo. O desempenho satisfatório do sistema passa pela correta regularização da superfície, que aceita pequenas irregularidades conforme foi destacado na tabela 6 acima.

Com a superfície devidamente regularizada, parte-se para o corte e imprimação das fibras de carbono. As características das mantas aplicadas de fibra de carbono, bem como seus comprimentos e larguras serão determinados pelo projeto de cálculo estrutural prévio.

As fibras de carbono, geralmente, são fornecidas em rolos conforme a imagem abaixo e permitem o fácil corte com qualquer ferramenta adequada, como estiletes.

Figura 18: Compósito de fibra de carbono em sua forma comercial.



Fonte: Bronze (2016).

A adesão da fibra de carbono ao substrato se faz imediatamente após a aplicação da resina de saturação pois, seu *pot life* é muito curto (cerca de 25 ou 30 minutos), assim o intervalo para ajustes e correções de posicionamento e alinhamento é pequeno.

É importante destacar que a resina de saturação pode ser aplicada a fibra de carbono antes da adesão ao substrato. Os dois métodos atingem o desempenho necessário e são bem utilizados

na prática. Entretanto, para ambos, é preciso se ater ao excesso de resina e sua consequente retirada, pois esse excesso pode prejudicar o desempenho estrutural do sistema.

A verificação quanto a correta adesão da fibra de carbono ao substrato é outro passo de grande importância. Realiza-se um procedimento chamado “rolagem das bolhas de ar”, através do uso de pequenos roletes de aço para a eliminação de possíveis bolhas de ar existentes na interface compósito/concreto (Machado, 2002).

Após a imprimação das fibras de carbono, aplica-se outra camada de resina de saturação para garantir o correto recobrimento das fibras, normalmente espera-se 30 minutos para essa segunda aplicação de resina. Caso haja a necessidade, segundo os cálculos estruturais, da aplicação de outras camadas, repete-se essas operações para cada camada adicional. Machado (2002) destaca que a última camada de impregnação de resina de uma lâmina de fibra de carbono não pode ser utilizada como receptora para a colocação da próxima lâmina de fibra de carbono.

Souza & Ripper (1998) afirmam que, os ensaios realizados até aqui indicam um bom desempenho do sistema para a aplicação de até dez camadas. Entretanto, recomendam a realização de novos testes de qualidade caso esse número ultrapasse seis camadas.

Beber (2003) evidencia que o tempo de cura da resina e, conseqüentemente, de todo o sistema depende de fatores climáticos, mas, não ultrapassa 7 dias. Ressaltando uma das vantagens da aplicação dessa técnica de reforço estrutural.

Por fim, vale destacar que, ou por razões estéticas ou para melhorar o desempenho do sistema quanto a proteção ao fogo, pode ser aplicado revestimentos protetores/estéticos dentre os quais destacam-se os *topcoats* com uma gama de cores e texturas.

Testes de verificação de qualidade

Com a aplicação do compósito concluída, realizam-se testes de verificação para garantir o correto desempenho do sistema. Estes testes vão desde inspeções visuais, testes de sonoridade com martelo para a verificação da correta colagem do material, até testes de arrancamento com chapas de aço que, de acordo com a ruptura observada, avaliam a eficiência do sistema. Caso o compósito se descole do substrato, a aplicação não foi realizada corretamente (Machado, 2002).

Estruturas possíveis serem reforçadas com compósitos de fibra de carbono

O reforço estrutural com compósitos de fibra de carbono pode ser aplicado em uma vasta gama de estruturas de concreto armado. Porém, destacam-se os casos em que ocorrem tensões de cisalhamento e flexão, com isso, evidencia-se seu uso nas seguintes situações, conforme Machado (2002) cita: reforço de vigas à flexão e cisalhamento; reforços de lajes à flexão; reforço de pilares e colunas; reforço de chaminés; reforço de tanques, silos e reservatórios; e outros.

Enfatiza-se nesse trabalho de graduação, sua maior frequência de aplicação que são os reforços de vigas de concreto armado tanto à flexão como ao cisalhamento. De tal maneira, que o tópico seguinte aborda o modelo de dimensionamento de reforço estrutural de vigas de concreto com fibra de carbono.

2.3.5 Modelo de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado à flexão com fibras de carbono

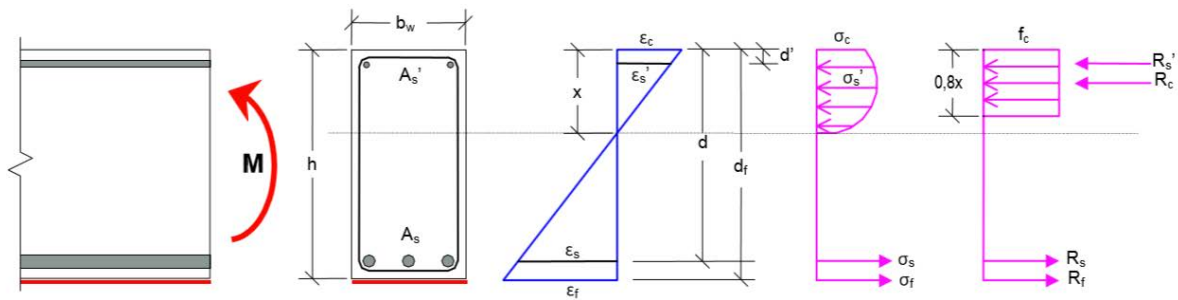
Neste tópico será apresentado o modelo de cálculo para reforço de vigas de concreto armado sujeitas à flexão com compósitos de fibras de carbono. Para isso, algumas considerações e critérios devem ser expostos para facilitar o entendimento e o processo de dimensionamento.

Inicialmente, é importante destacar que o modelo de dimensionamento de reforço com CFC admite as hipóteses básicas adotadas para o modelo apresentado anteriormente para dimensionamento de vigas de concreto armado. Entretanto, adiciona-se as hipóteses básicas anteriores, as hipóteses de deformação linear do compósito CFC até a ruptura e a perfeita aderência entre o material compósito e o substrato de concreto armado.

Beber (2003) afirma que os incrementos de resistência desejados com a implementação da técnica da estrutura só são obtidos se os modos de ruptura prematuros (falhas de aderência na interface dos materiais ou colapso por cisalhamento do compósito) forem evitados. Com isso, adota-se esses adicionais nas hipóteses básicas para o processo de cálculo do reforço.

De tal maneira que se recomenda que o dimensionamento do reforço estrutural seja feito no estado limite último (ELU), no qual se estabelece que a capacidade resistente à flexão de um elemento deve exceder a demanda estrutural (Machado, 2002). Com a determinação da capacidade resistente a partir da combinação do equilíbrio das tensões e compatibilidade das deformações, conforme se observa na figura abaixo que expõe o diagrama da seção transversal com a configuração e simplificações adotadas.

Figura 19: Diagrama da configuração de equilíbrio da seção transversal da peça com o reforço.



Fonte: Beber (2003).

No estado limite último, os diferentes modos de ruptura possíveis de se ocorrerem são investigados e verificados. De acordo com Machado (2002), diante da situação em que a estrutura se enquadra nos domínios 2 ou 3 (seções subarmadas com escoamento da armadura e, portanto, trata-se de uma ruptura dúctil, ou seja, com aviso prévio), podem ocorrer as seguintes rupturas: ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do concreto ou antes da ruptura do sistema CFC.

Nos casos em que a estrutura se engloba no domínio 4 (seções superarmadas com esmagamento do concreto, e conseqüentemente, ruptura frágil) pode ocorrer a ruptura por esmagamento do concreto antes da ruptura por escoamento do aço que é evitada com a implementação da armadura dupla já explicitada.

Por fim, destaca-se a possibilidade de ocorrência da ruptura do sistema CFC antes da ruptura por escoamento do aço (caso também de ruptura frágil e, portanto, indesejável) que também é verificada através do dimensionamento pela análise do estado limite-último.

Outras ruínas podem ocorrer como o descolamento do sistema ou uma falha na interface do substrato com o material, mas para que se as evite deve haver um detalhamento apropriado do sistema utilizado (Machado, 2002).

Vale ressaltar que, nos casos onde acontece ruptura por escoamento do aço, há o aviso prévio através, principalmente, da abertura de fissuras. Porém, essas fissuras apresentam aberturas minimizadas pela presença do compósito, pois sua composição (a resina especialmente) preenche esses espaços gerados.

Com os critérios e considerações necessárias para se entender o processo de dimensionamento expostos, parte-se, efetivamente, para o cálculo do reforço estrutural. Para tanto, verifica-se, primeiramente, a necessidade ou não da implementação do reforço.

Determina-se o valor do momento resistente da viga por meio das premissas já apresentadas no dimensionamento da estrutura de concreto armado, e o compara com o valor do carregamento que atuará sobre a estrutura. Caso o valor do momento resistente seja maior, não há necessidade de reforço. O contrário, nos indica a indispensabilidade do reforço estrutural.

Com a necessidade do reforço verificada e o valor do momento resistente da viga não reforçada obtido, passa-se a determinação da deformação inicial da seção transversal, conforme Machado (2002). O sistema CFC é aderido externamente a estrutura, sem a atuação de nenhuma tensão sobre o mesmo. Entretanto, a estrutura a qual ele se adere já está submetida a tensões, principalmente, de seu peso próprio. Assim, para se determinar a tensão que a fibra de carbono estará submetida, deve-se conhecer o valor da tensão atuante no substrato.

Com o valor da tensão atuante, obtém-se o valor da deformação existente previamente. Tal valor deve ser subtraído da deformação final encontrada para a fibra de carbono, para se determinar corretamente o nível de tensão que atuará sobre o sistema.

O valor da deformação máxima possível de se atuar sobre o sistema CFC pode ser determinado através da seguinte fórmula:

$$\varepsilon_{CFC} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu}$$

Onde, ε_{CFC} é a deformação final do compósito de fibra de carbono;

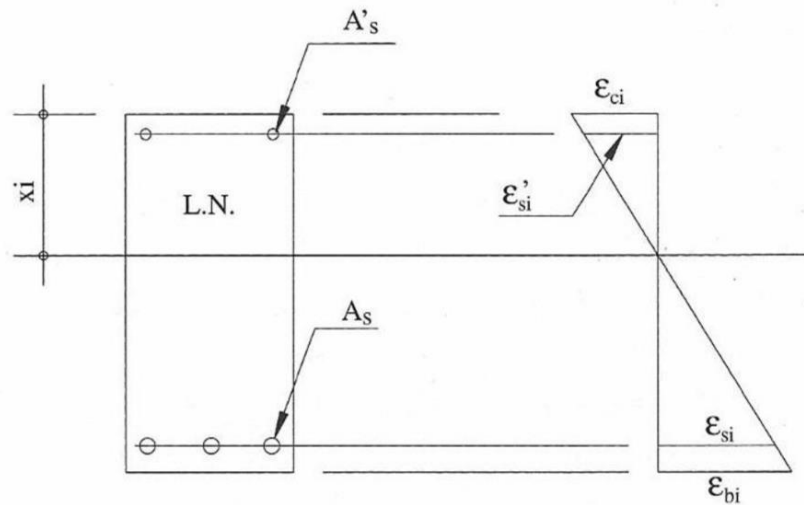
ε_b é a deformação na fibra para o carregamento máximo;

ε_{bi} é a deformação inicial da viga; e

ε_{fu} é a deformação máxima admissível do compósito.

Para a obtenção do valor da deformação inicial da viga ε_{bi} , realiza-se a análise elástica do estado inicial de deformação da seção transversal, de acordo com a figura abaixo.

Figura 20: Determinação do estado inicial de deformação.



Fonte: Silveira et al (2015).

Vale salientar que alguns especialistas permitem a simplificação do cálculo do momento devido a carga permanente atuante na estrutura, admitindo seu valor em 10% do valor do momento resistente da estrutura.

Com as deformações iniciais e finais do compósito de fibra de carbono definidas e determinadas, pode-se calcular o reforço necessário para a estrutura. O procedimento de cálculo apresentado será fundamentado de acordo com Machado (2002) e Silveira et al (2015):

Inicialmente, para o cálculo, projeta-se que a viga se apresente como uma estrutura normalmente armada. Portanto, apresenta deformação no aço (ϵ_{sd}) igual a 10‰ e deformação no concreto (ϵ_c) igual a 3,5‰ até concretos de 50MPa, segundo a ABNT (2014).

Por meio da semelhança de triângulos, possível se fazer pela análise da configuração da seção transversal apresentada na figura acima, obtém-se o primeiro valor da linha neutra (x):

$$\frac{\epsilon_c}{x} = \frac{\epsilon_{sd}}{d - x}$$

Com a primeira linha neutra obtida, faz-se uma análise para determinar se essa é a posição correta da linha neutra que gera um equilíbrio interno das forças. Para tanto, calculam-se os esforços internos que atuam na seção transversal e que estão demonstrados também na figura abaixo:

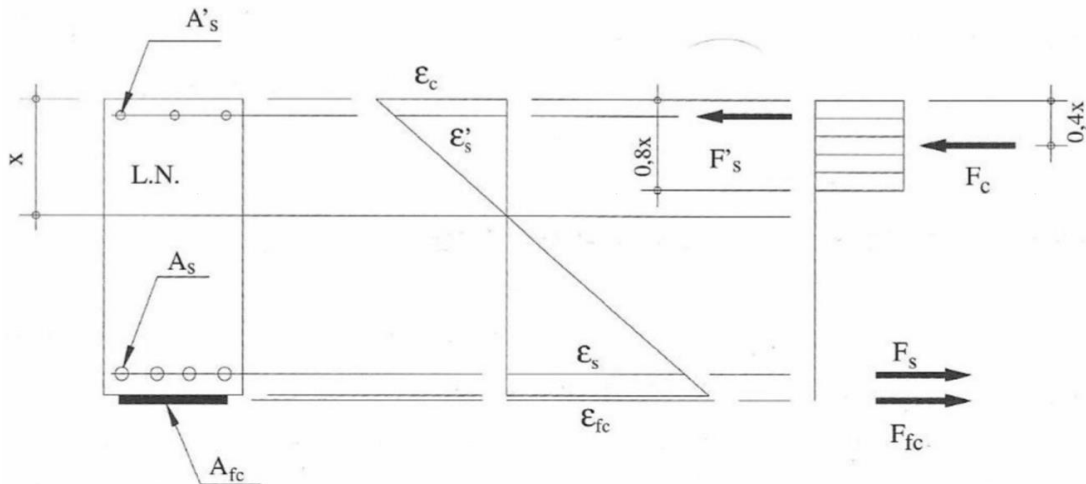
$$F_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b_w$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s$$

$$F'_s = f_{yd} \cdot A'_s$$

Sendo, F_c a força resultante da seção comprimida do concreto;
 F_s , a força resultante da seção tracionada da armadura;
 F'_s , a força resultante da seção comprimida da armadura.

Figura 21: Forças atuantes na seção transversal resistente com reforço.



Fonte: Machado (2002).

Enfim, obtém-se a força atuante no CFC através do equilíbrio entre os momentos interno (relacionado a forças internas) e externo ($M_{d,sol}$) em dois pontos. Os dois pontos de referência adotados para os cálculos são: o centro de gravidade da armadura tracionada e o centro de gravidade da região comprimida de concreto.

Em relação, primeiramente, ao centro de gravidade da armadura tracionada, tem-se o seguinte equilíbrio:

$$M_i = M_c + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_c = F_c \cdot (d - 0,4x)$$

$$M_{s'} = F'_s \cdot (d - d'')$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot d'$$

Onde, M_i é o momento interno resistente da seção transversal;

M_c é o momento relacionado a força resultante de concreto;

$M_{s'}$ é o momento resultante da armadura de compressão;

E M_{cfc} é o momento devido ao composto CFC.

Com $M_s = 0$, já que adotou-se o centro de gravidade da armadura tracionada como referência, e no equilíbrio $M_{d,sol} = M_i$.

Assim, por meio dessa etapa, determina-se inicialmente o valor do momento relacionado ao compósito, e posteriormente, o valor da força que atua no sistema da fibra de carbono. Caso a peça esteja realmente em equilíbrio, o momento interno será o mesmo para qualquer ponto. Assim, calcula-se o momento no centro de gravidade da região comprimida para verificação:

$$M_i = M_s + M_s' + M_{cfc}$$

$$M_s = F_s \cdot (d - 0,4x)$$

$$M_s' = F_s' \cdot (0,4x - d'')$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot (h - 0,4x)$$

Nesse caso, o valor de $M_c = 0$ devido a referência adotada e, no equilíbrio, $M_{d,sol} = M_i$. E se obtém, o novo valor da força que atua na fibra de carbono. Caso os valores sejam diferentes, deve-se repetir as etapas para uma nova posição da linha neutra (processo iterativo) até que se chegue a valores iguais da força que atua no sistema CFC.

Nas situações em que o valor encontrado para a força que atua na fibra de carbono pelo centro de gravidade da armadura tracionada seja maior que o valor encontrado pelo centro de gravidade da região comprimida deve-se adotar um valor maior na posição da linha neutra para que se aumente a parcela referente a força de compressão. Nas situações em que ocorrer o contrário, deve-se diminuir a posição da linha neutra.

Por fim, com o valor da força atuante sobre o compósito em mãos, é possível se calcular a área necessária para o compósito pela seguinte expressão:

$$A_{cfc} = F_{cfc} / \sigma_{cfc}$$

A tensão σ_{cfc} atuante sobre a fibra é obtida por meio da seguinte expressão:

$\sigma_{cfc} = \epsilon_b \cdot E_{cfc}$, onde E_{cfc} corresponde ao módulo de elasticidade da fibra de carbono utilizada e seu valor é, geralmente, disponibilizado pelo fornecedor do material.

Com o valor da área de atuação da fibra de carbono e os dados sobre a espessura do material e a largura da viga reforçada conhecidos, determina-se o número de camadas necessário para se atingir o desempenho requerido.

Por se tratar de um processo iterativo (quanto a posição da linha neutra que gera o equilíbrio dos esforços), pode-se dispender um gasto de energia e tempo altos durante o dimensionamento. Em virtude disso, é comum a utilização de programas computacionais para a realização das etapas, como a planilha eletrônica desenvolvida nesse trabalho que será apresentada posteriormente.

Vale ressaltar que esse é apenas um modelo de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado à flexão com fibras de carbono e que, diante das diferentes possibilidades de

dados iniciais para o processo, podem haver outros métodos para o cálculo e diferenças entre os resultados obtidos.

O detalhamento de algumas etapas como, principalmente, a obtenção do valor do momento resistente da peça, assim como considerações adicionais podem ser vistas no estudo de caso de reforço de vigas à flexão com CFC no próximo capítulo.

2.3.6 Modelo de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado ao cisalhamento com fibras de carbono

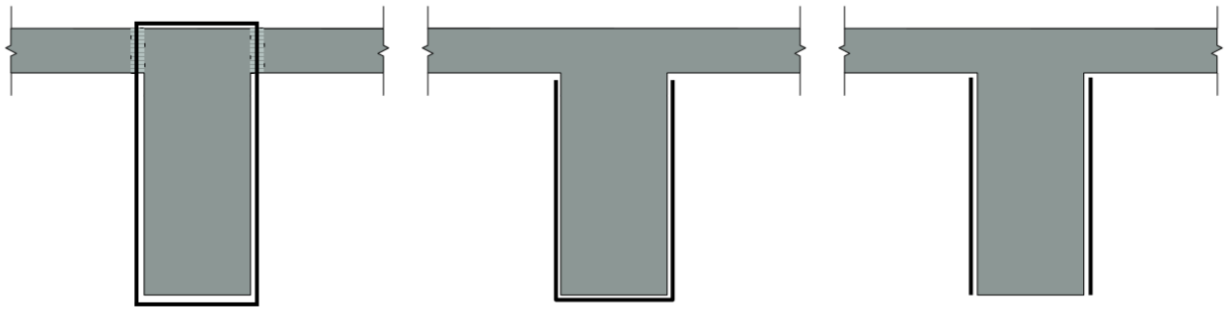
O dimensionamento para reforço de vigas de concreto armado sujeita a solicitações de cisalhamento com compósitos de fibra de carbono leva em consideração, assim como para o reforço à flexão, as hipóteses e considerações básicas apresentadas no estudo das estruturas de concreto armado, como também as premissas adicionais adotadas e expostas no dimensionamento à flexão apresentadas no tópico anterior.

As vigas de concreto armado normalmente ou subarmadas apresentam como principais formas de falhas, as rupturas por flexão e cisalhamento. A ruptura por flexão trata-se de ruptura dúctil, apresentado sinais prévios. Entretanto, a ruptura por cisalhamento consiste em ruptura frágil, na qual o colapso é repentino. Além disso, as estruturas reforçadas com CFC apresentam uma ductilidade menor em comparação com a estruturas não-reforçadas em virtude do compósito “mascarar” as fissuras e outras patologias. Diante disso, faz-se necessário garantir que a resistência da viga ao cisalhamento seja maior que sua resistência à flexão (Beber, 2003).

As técnicas desenvolvidas e pesquisadas para aplicação do reforço com fibra de carbono à flexão propiciaram um embasamento teórico e prático para a utilização desse mesmo reforço para o cisalhamento das vigas de concreto armado.

Os compósitos de fibra de carbono oferecem uma variedade de configurações possíveis de aplicação em estruturas para garantir seu reforço ao cisalhamento. Através do envolvimento da seção de concreto, o sistema compósito dispões as fibras transversalmente com o intuito de reforçar a estrutura, considerando o modelo das diagonais tracionadas da treliça de Morsch já apresentado, atuando de maneira similar aos estribos de aço (Machado, 2002).

Figura 22: Possíveis configurações de um reforço ao cisalhamento.



Fonte: Beber (2003).

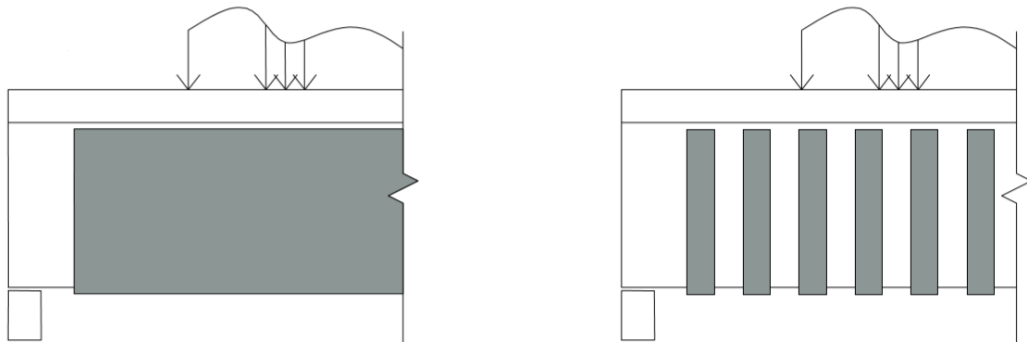
Na imagem acima, é possível identificar as principais configurações de aplicação do sistema compósito para reforço das estruturas ao cisalhamento. Na primeira configuração, tem-se o envolvimento completo da viga. Trata-se da configuração que gera o melhor desempenho do reforço, entretanto, não se apresenta como uma alternativa viável do ponto prático da aplicação devido a presença de lajes que acarretaria na necessidade de demolições ou rasgos nas estruturas para implementação do método.

Na última configuração, tem-se a aplicação do sistema apenas na lateral da viga, constituindo-se assim, o menor desempenho do reforço. Tal configuração é empregada quando não é possível, além de envolver o topo da viga, envolver sua base. Na segunda imagem apresenta-se, portanto, a configuração com eficiência intermediária. É possível envolver a base e as laterais da viga a ser reforçada, denominando-se o método por “U”. Por se tratar de um método de fácil aplicação e permitir um incremento razoável de resistência, é o mais comum de ser utilizado em regiões de momento positivo. Nos casos de momentos negativos, a fissuração começa a ocorrer pelo topo da seção (região próxima à laje), tornando o reforço sem efeito para controle das fissuras.

Além das possíveis configurações de aplicação das fibras, alguns outros fatores são importantes e fundamentais para garantir que o sistema atinja o desempenho esperado e garanta o reforço de resistência necessário para a estrutura. Dentre eles, destacam-se: o espaçamento do compósito aplicado e a orientação das fibras de carbono.

O reforço pode ser realizado com tecidos, mantas ou lâminas de fibra de carbono com larguras definidas e espaçadas convenientemente ou também pode ser realizado com uma cobertura contínua, conforme é possível observar na figura abaixo.

Figura 23: Exemplos de distribuição do reforço com CFC.



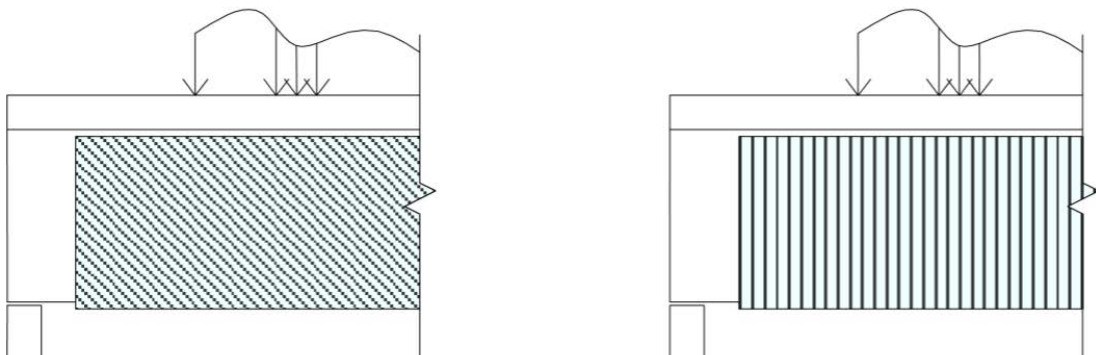
Fonte: Beber (2003).

A disposição do sistema em tiras com espaçamentos definidos gera uma otimização no uso do material. Alguns especialistas afirmam que esse método acarreta uma economia de cerca de 40% no consumo do sistema, trazendo o mesmo incremento de resistência. Entretanto, em alguns casos em que o valor de reforço é muito alto, pode se tornar viável a aplicação de uma cobertura contínua na peça. Nessas situações deve se ater ao processo de permeabilidade da água e ao controle da umidade da estrutura.

Além do espaçamento, tem-se como destaque o cuidado com a orientação das fibras. A eficiência do sistema de reforço, bem como suas propriedades estão diretamente relacionados a forma de orientação das fibras de carbono no material. Para se atingir a otimização do compósito, as fibras devem estar inclinadas em relação ao eixo longitudinal da peça, assim como os estribos se dispõem nas estruturas de concreto armado (Machado, 2002).

É possível se apresentar fibras dispostas 45° em relação a horizontal, ou também inclinadas em 90° com a horizontal, como se vê na imagem abaixo. Além dessas orientações, existe a possibilidade de se utilizar uma distribuição biaxial das fibras para atingir um melhor comportamento geral do sistema.

Figura 24: Exemplos de orientação das fibras de carbono.



Fonte: Beber (2003).

Com as principais considerações acerca do dimensionamento de reforço de vigas ao cisalhamento com fibras de carbono expostas, é possível apresentar o modelo de cálculo do dimensionamento.

O primeiro passo para o dimensionamento do reforço ao cisalhamento é a verificação da necessidade ou não da implementação do reforço. Para tanto, calcula-se, inicialmente, o valor do esforço cortante resistente da seção não reforçada (V_{sd}), de acordo com a metodologia apresentada no dimensionamento da armadura transversal em vigas.

Recomenda-se que o cálculo de V_{sd} seja feito seguindo o modelo de cálculo I, pois, tal modelo admite as diagonais de compressão inclinadas em 45° , tornando-se assim mais conservativo.

$$V_{sd} = V_c + V_{sw}$$

Sendo V_c a parcela de força cortante absorvida por mecanismos internos; e

V_{sw} a parcela absorvida pela armadura transversal

Tais parcelas são obtidas de acordo com as seguintes expressões:

$$V_{sw} = (A_{sw}/s).0,9.d.f_{yd} \text{ com } f_{yd} \text{ em kN/cm}^2 \text{ e estribos a } 90^\circ$$

$$V_c = 0,6.f_{ctd}.b_w.d \text{ onde } f_{ctd} = 0,15.f_{ck}^{2/3} \text{ (com } f_{ck} \text{ em MPa)}$$

Vale lembrar que a metodologia de cálculo de V_{sd} indica a necessidade de verificação da diagonal comprimida de concreto que deve ser realizada para garantia de precisão nos resultados.

Com o valor de V_{sd} em mãos, compara-se o mesmo com o valor do esforço cortante solicitante de referência. Caso V_{sd} seja maior, não há a necessidade de reforço. Caso seja menor, a diferença entre eles ($V_{d,sol} - V_{sd}$) indica o valor do esforço cortante a ser resistido pelo compósito de fibra de carbono (V_{cfc}). Machado recomenda que o valor do esforço cortante resistido pela fibra seja multiplicado por um coeficiente Φ_f de minoração igual a 0,85 pela novidade do método de reforço. Assim, tem-se:

$$V_{cfc} = (V_{d,sol} - V_{sd}) / \Phi_f$$

Com o valor da contribuição do compósito de fibra de carbono na resistência ao esforço cortante obtido, é possível se conhecer valores essenciais para o correto desempenho do sistema como: o espaçamento (s_f) indicado e a largura da lâmina de fibra de carbono aplicada (w_f), de acordo com a metodologia apresentada por Machado (2002).

$$s_f = (A_f.f_f.(sen\beta + cos\beta).d_f) / V_{cfc}$$

Onde, A_f é a área da seção transversal de uma lâmina de fibra de carbono;

Sendo $A_f = 2.n.t_f.w_f$;

n é o número de camadas de fibra de carbono (inicialmente, adota-se 1 camada);

t_f é a espessura de uma camada de fibra de carbono;

f_f é a tensão-limite atuante de ruptura da fibra de carbono;

β é o ângulo, em graus, da fibra em relação ao eixo longitudinal da peça;

e d_f é a profundidade da lâmina de fibra de carbono para o reforço.

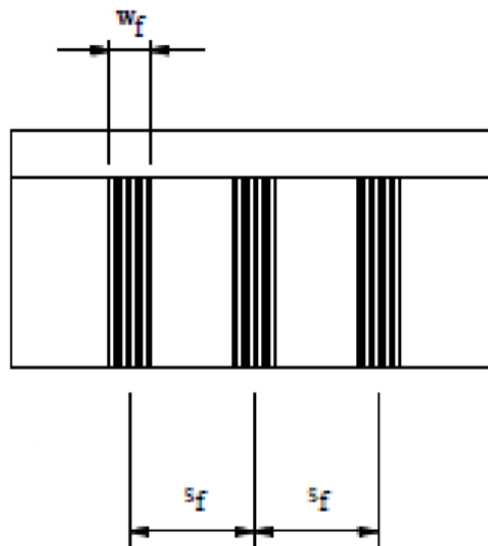
Como normalmente tem-se $\beta = 90^\circ$, pode-se escrever a expressão anterior da seguinte forma:

$$s_f = (2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \cdot f_f \cdot d_f) / V_{cfc}$$

Ressalta-se que Machado (2002) recomenda que o valor obtido de V_{cfc} utilizado na expressão anterior seja limitado ao resultado de $0,332 \cdot (f_{cd})^{1/2} \cdot b_w \cdot d$ para garantia de sucesso nos resultados.

Como o espaçamento e a largura das lâminas de fibra de carbono, geralmente, são as incógnitas do projeto de reforço estrutural. Calcula-se, por praticidade, a relação (w_f/s_f) . Tal qual possibilita as seguintes conclusões que são ilustradas pela figura abaixo:

Figura 25: Relação entre largura e espaçamento do CFC em uma viga.



Fonte: Adorno, Silveira & Dias (2015).

Se $(w_f/s_f < 1,0)$, pode-se utilizar lâminas com larguras pré-definidas, para cálculo do espaçamento, mantendo o valor obtido na relação;

Se $(w_f/s_f = 1,0)$, deve-se utilizar lâminas que cobrem todo o comprimento da peça, atendendo-se a problemas com a umidade da estrutura;

Se $(w_f/s_f > 1,0)$, apenas uma camada de fibra de carbono não garante o desempenho do reforço, mais camadas devem ser aplicadas.

Apesar dos valores da relação indicarem algumas conclusões, ainda há algumas incógnitas que impedem a obtenção do valor do espaçamento como a profundidade da lâmina de d_f e a tensão-limite de ruptura do material f_f .

A tensão-limite atuante de ruptura é determinada da seguinte forma:

$$f_f = R \cdot f_{fu}$$

Onde R é um fator de redução dado por:

$$R = (K_1 \cdot K_2 \cdot L_e / 11900 \cdot \varepsilon_{fu}) \leq (0,005 / \varepsilon_{fu})$$

Onde K_1 é um fator de multiplicação do comprimento efetivo de aderência estabelecido em função da resistência do concreto;

K_2 é um fator de multiplicação do comprimento efetivo de aderência estabelecido em função da configuração escolhida para o reforço;

L_e é o comprimento efetivo de aderência da fibra de carbono;

ε_{fu} é a deformação última da fibra de carbono; e

f_{fu} é a tensão última da fibra de carbono.

O limite $(0,005 / \varepsilon_{fu})$ tem por finalidade conter a perda de coesão interna dos agregados.

Nos casos de envolvimento total da peça, pode-se assumir R com seu valor máximo:

$$R = (0,005 / \varepsilon_{fu})$$

O ACI Committe 440 recomenda que a deformação máxima de fibra de carbono seja igual a 0,004 para a configuração de envolvimento total da peça; e para as outras configurações, o valor máximo de $R \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004$.

Os fatores de multiplicação K_1 e K_2 são calculados das seguintes e respectivas maneiras:

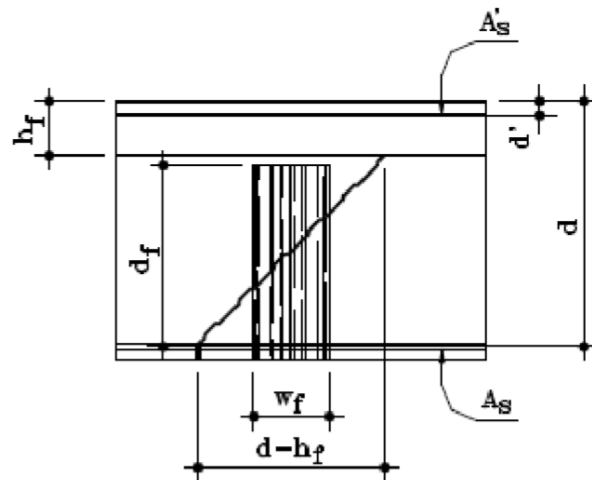
$$K_1 = (f_{cd} / 27)^{2/3}, \text{ onde } f_{cd} \text{ dado em MPa.}$$

$K_2 = (d_{fe} / d_f)$, sendo d_{fe} o comprimento efetivamente aderido da lâmina de fibra de carbono aplicada;

Onde $d_f = d - h_f$ na maior parte das situações (vide figura abaixo); e

$d_{fe} = d_f - L_e$ nos casos em que as lâminas de fibra de carbono foram dispostas em “U” e $d_{fe} = d_f - 2L_e$ quando as lâminas forem aplicadas apenas nas laterais da viga.

Figura 26: Comprimento d_f do compósito aplicado na viga.



Fonte: Machado (2002)

O comprimento efetivo de aderência da fibra de carbono é dado por:

$L_e = L_o / (n)^{1/2}$, onde L_o é o comprimento efetivo de colagem da lâmina de fibra de carbono, calculado pela seguinte expressão:

$$L_o = [2500 / (t_f \cdot E_{fc})^{0,58}]$$

Com t_f dado em polegadas (in); e

E_{fc} dado em libras por polegadas quadradas (psi).

Machado (2002) indica ainda que a deformação última da fibra (ϵ_{fu}) pode ser considerada 0,017. E a tensão última (f_{fu}) pode ser considerada igual a 35000 kgf/cm².

Da mesma maneira que citado no tópico anterior do dimensionamento do reforço à flexão de vigas de concreto armado com fibras de carbono, trata-se apenas de um modelo possível de cálculo de reforço. A partir de dados iniciais diferentes e outros métodos, pode-se chegar a resultados com algumas diferenças de valores. Além disso, o detalhamento de algumas etapas, bem como considerações adicionais estarão expostos no estudo de caso apresentado no capítulo seguinte.

3 ESTUDOS DE CASOS DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO

Serão apresentados a seguir estudos de casos de dimensionamentos de reforço estrutural de vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono desenvolvidos manualmente de acordo com as considerações e hipóteses explanadas nos tópicos anteriores. Tais estudos de casos são baseados e tem como referência, os exemplos presentes no livro “Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono” do autor Ari de Paula Machado e servem como base para posteriores comparações e análises de resultados obtidos com o uso da planilha eletrônica desenvolvida.

3.1 ESTUDO DE CASO 1 – DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO

O primeiro estudo de caso a ser apresentado consiste em um exemplo de uma viga de concreto armado que necessita ser reforçada para suportar carregamentos majorados que impõem a solicitação de um momento fletor máximo equivalente a 20592,00 kN.cm.

Para a realização dos cálculos do dimensionamento do reforço necessário, algumas informações iniciais e adoções são necessárias.

Primeiramente, tem-se que a seção transversal da viga de concreto armado analisada possui: altura $h = 69$ cm; largura $b_w = 20$ cm; cobrimento $cob = 2,5$ cm; altura útil $d = 65$ cm; Armadura tracionada $A_s = 9,45$ cm²; Distância entre o centro de gravidade da armadura tracionada ao bordo mais tracionado $d' = 4$ cm; Armadura comprimida $A_s' = 1,60$ cm²; Distância entre o centro de gravidade da armadura comprimida ao bordo mais comprimido $d'' = 2,5$ cm; E armadura transversal de 2 ramos de barras de diâmetro 6,3 mm espaçadas a cada 20 cm.

Além desses dados, algumas adoções se fazem úteis para os cálculos: adota-se: o uso da fibra de carbono CF-130 do sistema MBraceTM com informações específicas conhecidas; concreto com $f_{ck} = 20$ MPa; e Aço CA-50 com $f_{yk} = 500$ MPa e $E_s = 210000$ MPa.

Com os dados iniciais apresentados e medidas adotadas, pode-se iniciar o processo de cálculo do dimensionamento do reforço de fibra de carbono. Tal processo se dá através das seguintes etapas: cálculo do momento resistente da seção não-reforçada para verificação da necessidade do reforço; Cálculo da deformação devido a carga permanente da viga; e por fim, o cálculo do Reforço necessário, com o detalhamento da fibra de carbono aplicada com o respectivo número de camadas e área de fibra de carbono aplicada.

Momento Resistente da Seção Não-Reforçada

Para a obtenção do valor do momento resistente da seção não-reforçada existem diversos métodos e técnicas. Será apresentado aqui um método simples e rápido que utiliza poucas variáveis para a aferição do resultado. Tal método se baseia nas premissas e hipóteses do estudo das vigas de concreto armado e leva em consideração o equilíbrio de momentos existentes internamente na viga de acordo com a atuação das resultantes de cálculo da armadura comprimida e do concreto e o respectivo braço de alavanca entre as resultantes em referência ao centro de gravidade da armadura tracionada. Assim, tem-se a seguinte expressão para o cálculo do momento resistente de cálculo da seção não-reforçada (M_d):

$$M_d = 0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,5y) + A_s' \cdot f_{yd} \cdot (d - d'')$$

$$\text{Onde } y = (A_s \cdot f_{yd} - A_s' \cdot f_{yd}) / (0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w)$$

$$\text{Assim, } y = [9,45 \cdot (50/1,15) - 1,60 \cdot (50/1,15)] / [0,85 \cdot (2/1,4) \cdot 20]$$

$$\text{Portanto, } y = 14,05 \text{ cm.}$$

$$\text{Com isso, } M_d = 0,85 \cdot 20 \cdot 14,05 \cdot 1,43 \cdot (65 - 0,5 \cdot 14,05) + 1,60 \cdot 43,5 \cdot (65 - 2,5)$$

$$\mathbf{M_d = 24151,68 \text{ kN.cm}}$$

O momento solicitante na estrutura, conforme enunciado anteriormente, vale 20592,00 kN.cm. É necessário para comparação obter o momento solicitante de cálculo. Assim, tem-se:

$$M_{d,sol} = 1,4 \cdot 20592,00$$

$$\mathbf{M_{d,sol} = 28828,80 \text{ kN.cm}}$$

Analisando e comparando os dois valores, é possível observar que o momento solicitante de carga na estrutura é maior que o momento resistente da mesma e, portanto, faz-se necessária a implantação do reforço com fibra de carbono para que a estrutura suporte a carga imposta.

Deformação devido a Carga Permanente da Viga

Para o cálculo da deformação inicial da viga, resultante da carga permanente atuante e anterior a implementação do reforço de fibra de carbono, é necessário se conhecer o valor do momento fletor da carga permanente ($M_{g,d}$) ou momento fletor devido ao peso próprio.

Para isso, pode-se calcular a peso próprio da viga, considerando-se os materiais presentes e os respectivos valores de volume e peso específico. Entretanto, para tornar o cálculo mais objetivo e rápido, alguns especialistas afirmam que se pode simplificar a obtenção desse

momento, considerando seu valor em 10% do valor do momento total da seção não-reforçada (já encontrado), sem comprometer os resultados do dimensionamento. Assim, tem-se:

$$M_{g,d} = 10\% \cdot M_d = 0,10 \cdot 24151,68 \text{ kN.cm}$$

$$\mathbf{M_{g,d} = 2415,17 \text{ kN.cm}}$$

Com o valor do momento obtido, é possível calcular o valor da deformação devido a carga permanente. Para isso, basta se calcular algumas variáveis que permitirão a aferição do valor desejado.

Primeiramente, calcula-se o coeficiente K_c_{perm} :

$$K_c_{perm} = M_{g,d} / (b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}) = 2415,17 / (20 \cdot 65^2 \cdot 1,43)$$

$$K_c_{perm} = 0,019987$$

Após isso, calcula-se outro coeficiente K_x_{perm} :

$$K_x_{perm} = 1 - (1 - 2 \cdot K_c_{perm})^{1/2} / 0,8 = 1 - (1 - 2 \cdot 0,019987)^{1/2} / 0,8$$

$$K_x_{perm} = 0,0252$$

Com K_x_{perm} , calcula-se a posição da linha neutra x_{perm} :

$$x_{perm} = K_x_{perm} \cdot d = 0,0252 \cdot 65$$

$$x_{perm} = 1,638 \text{ cm}$$

Com a posição da linha neutra, obtém-se a altura do diagrama de forças y_{perm} :

$$y_{perm} = 0,8 \cdot x = 0,8 \cdot 1,638$$

$$y_{perm} = 1,310 \text{ cm}$$

Com y_{perm} , calcula-se o valor do braço de alavanca z_{perm} :

$$z_{perm} = d - y/2 = 65 - 1,310/2$$

$$z_{perm} = 64,34 \text{ cm}$$

Com o braço de alavanca, é possível obter-se o valor do esforço na armadura F_s_{perm} :

$$F_s_{perm} = M_{g,d} / z = 2415,17 / 64,34$$

$$F_s_{perm} = 37,54 \text{ kN}$$

Através do esforço na armadura, calcula-se a tensão na armadura f_s_{perm} :

$$f_s_{perm} = F_s_{perm} / A_s = 37,54 / 9,45$$

$$f_s_{perm} = 3,97 \text{ kN/cm}^2$$

Por fim, com a tensão na armadura obtida, obtém-se o valor da deformação devido a carga permanente atuante na viga ϵ_{perm} :

$$\epsilon_{perm} = (f_s_{perm} / E_s) \cdot 1000 = (3,97/21000) \cdot 1000$$

$$\mathbf{\epsilon_{perm} = 0,189 \%}$$

Cálculo do Reforço Necessário

Inicialmente, para se começar o processo de cálculo e obtenção do reforço necessário, é preciso se obter um valor da linha neutra x inicial. Para isso, projeta-se que a viga se apresenta como uma seção normalmente armada, em que ocorre simultaneamente o esmagamento por compressão do concreto com deformação $\varepsilon_c = 3,5\%$ e deformação plástica no aço $\varepsilon_s = 10\%$.

Nessa situação, é possível se fazer uma análise da configuração da seção transversal para se obter, por meio de semelhança de triângulos, o primeiro valor de linha neutra x através da seguinte expressão:

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_{sd}}{d - x}$$

Assim, tem-se que $x = 0,2275 / 0,0135$, e com isso, $x = 16,85$ cm.

Com a primeira linha neutra obtida, faz-se uma análise para determinar se ocorre um equilíbrio entre as forças atuantes na seção com essa configuração. Para isso, calcula-se os valores dos esforços internos atuantes na seção que compõem o equilíbrio citado.

Para $x = 16,85$ cm:

$$F_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b_w = 0,85 \cdot 1,43 \cdot 0,8 \cdot 16,85 \cdot 20 = 327,20 \text{ kN}$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s = 43,5 \cdot 9,45 = 411,075 \text{ kN}$$

$$F_{s'} = f_{yd} \cdot A_{s'} = 43,5 \cdot 1,60 = 69,60 \text{ kN}$$

Com as forças internas obtidas, é possível calcular o valor da força atuante e resistida pelo compósito através do equilíbrio entre os momentos interno (relacionado as forças internas calculadas) e externo (solicitante) em dois pontos. Como já dito, adota-se como referência para os cálculos, o centro de gravidade da armadura tracionada e da região comprimida de concreto. Assim que o valor do momento relacionado ao compósito for igual nos dois pontos de referência, atingiu-se o equilíbrio desejado e aferiu-se o valor corretamente.

Primeiramente, em relação do centro de gravidade da armadura tracionada, tem-se a seguinte configuração de equilíbrio:

$$M_i = M_c + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_c = F_c \cdot (d - 0,4x) = 327,7 \cdot (65 - 0,4 \cdot 16,85) = 19091,8 \text{ kN.cm}$$

$$M_{s'} = F_{s'} \cdot (d - d'') = 69,60 \cdot (65 - 2,5) = 4350 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot d' = F_{cfc} \cdot 4 = 4F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao momento externo (situação que ocorre quando a seção está em equilíbrio), tem-se:

$$28828,80 = 19091,8 + 4350 + 4F_{cfc}$$

$$\text{Assim, } F_{cfc} = \mathbf{1346,75 \text{ kN}}$$

Caso a peça esteja realmente em equilíbrio, o valor encontrado para a força atuante no compósito F_{cfc} no segundo ponto de referência adotado para o cálculo será igual ao primeiro.

Vejamos assim o equilíbrio no centro de gravidade da região comprimida de concreto:

$$M_i = M_s + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_s = F_s \cdot (d - 0,4x) = 411,075 \cdot (65 - 0,4 \cdot 16,85) = 23949,23 \text{ kN.cm}$$

$$M_{s'} = F_{s'} \cdot (0,4x - d'') = 69,60 \cdot (0,4 \cdot 16,85 - 2,5) = 295,104 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot (h - 0,4x) = F_{cfc} \cdot (69 - 0,4 \cdot 16,85) = 62,26 \cdot F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao externo, tem-se:

$$28828,80 = 23949,23 + 295,104 + 62,26F_{cfc}$$

$$\mathbf{F_{cfc} = 73,634 \text{ kN}}$$

Como é possível observar os valores encontrados para F_{cfc} não são iguais e, portanto, essa posição da linha neutra ($x = 16,85 \text{ cm}$) não gera o equilíbrio desejado. Portanto, deve-se repetir as etapas para uma nova posição da linha neutra x (processo iterativo) até que se encontre o equilíbrio.

Além disso, o valor encontrado para o F_{cfc} pelo equilíbrio no centro de gravidade da armadura tracionada foi maior que o valor obtido pelo equilíbrio na região comprimida de concreto, o que indica a necessidade de se adotar um valor maior para a posição da linha neutra para que se aumente a parcela referente a força de compressão resistida pelo compósito.

Tentemos, agora, $x = \mathbf{22 \text{ cm}}$:

$$F_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b_w = 0,85 \cdot 1,43 \cdot 0,8 \cdot 22 \cdot 20 = 427,856 \text{ kN}$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s = 43,5 \cdot 9,45 = 411,075 \text{ kN}$$

$$F_{s'} = f_{yd} \cdot A_{s'} = 43,5 \cdot 1,60 = 69,60 \text{ kN}$$

Em relação do centro de gravidade da armadura tracionada, tem-se a seguinte configuração de equilíbrio:

$$M_i = M_c + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_c = F_c \cdot (d - 0,4x) = 427,856 \cdot (65 - 0,4 \cdot 22) = 24045,51 \text{ kN.cm}$$

$$M_{s'} = F_{s'} \cdot (d - d'') = 69,60 \cdot (65 - 2,5) = 4350 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot d' = F_{cfc} \cdot 4 = 4F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao momento externo (situação que ocorre quando a seção está em equilíbrio), tem-se:

$$28828,80 = 24045,51 + 4350 + 4F_{cfc}$$

Assim, **F_{cfc} = 108,32 kN**

Quanto ao equilíbrio no centro de gravidade da região comprimida de concreto, tem-se:

$$M_i = M_s + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_s = F_s \cdot (d - 0,4x) = 411,075 \cdot (65 - 0,4 \cdot 22) = 23102,415 \text{ kN.cm}$$

$$M_{s'} = F_{s'} \cdot (0,4x - d'') = 69,60 \cdot (0,4 \cdot 22 - 2,5) = 438,48 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot (h - 0,4x) = F_{cfc} \cdot (69 - 0,4 \cdot 22) = 60,2 \cdot F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao externo, tem-se:

$$28828,80 = 23102,415 + 438,48 + 60,2 \cdot F_{cfc}$$

F_{cfc} = 87,84 kN

O valor obtido para o F_{cfc} pelo equilíbrio no centro de gravidade da armadura tracionada ainda é maior que o valor encontrado na segunda configuração, de equilíbrio na região comprimida de concreto. Portanto, ainda deve-se aumentar o valor da posição da linha neutra x.

Tentemos, agora, **x = 23 cm**:

$$F_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b_w = 0,85 \cdot 1,43 \cdot 0,8 \cdot 23 \cdot 20 = 447,30 \text{ kN}$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s = 43,5 \cdot 9,45 = 411,075 \text{ kN}$$

$$F_{s'} = f_{yd} \cdot A_{s'} = 43,5 \cdot 1,60 = 69,60 \text{ kN}$$

Em relação do centro de gravidade da armadura tracionada, tem-se a seguinte configuração de equilíbrio:

$$M_i = M_c + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_c = F_c \cdot (d - 0,4x) = 447,30 \cdot (65 - 0,4 \cdot 23) = 24959,34 \text{ kN.cm}$$

$$M_{s'} = F_{s'} \cdot (d - d'') = 69,60 \cdot (65 - 2,5) = 4350 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot d' = F_{cfc} \cdot 4 = 4F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao momento externo (situação que ocorre quando a seção está em equilíbrio), tem-se:

$$28828,80 = 24959,34 + 4350 + 4F_{cfc}$$

Assim, **F_{cfc} = -120,135 kN**

Quanto ao equilíbrio no centro de gravidade da região comprimida de concreto, tem-se:

$$M_i = M_s + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_s = F_s \cdot (d - 0,4x) = 411,075 \cdot (65 - 0,4 \cdot 23) = 22937,985 \text{ kN.cm}$$

$$M_{s'} = F_{s'} \cdot (0,4x - d'') = 69,60 \cdot (0,4 \cdot 23 - 2,5) = 466,32 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot (h - 0,4x) = F_{cfc} \cdot (69 - 0,4 \cdot 23) = 59,80 \cdot F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao externo, tem-se:

$$28828,80 = 22937,985 + 466,32 + 59,80.F_{cfc}$$

$$\mathbf{F_{cfc} = 90,71 \text{ kN}}$$

Agora, o valor obtido no equilíbrio no centro de gravidade de compressão de concreto foi maior, e assim, deve-se diminuir o valor da posição da linha neutra x .

Tentemos, agora, $x = 22,5 \text{ cm}$:

$$F_c = 0,85.f_{cd}.0,8.x.b_w = 0,85.1,43.0,8.22,5.20 = 437,58 \text{ kN}$$

$$F_s = f_{yd}.A_s = 43,5.9,45 = 411,075 \text{ kN}$$

$$F_{s'} = f_{yd}.A_{s'} = 43,5.1,60 = 69,60 \text{ kN}$$

Em relação do centro de gravidade da armadura tracionada, tem-se a seguinte configuração de equilíbrio:

$$M_i = M_c + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_c = F_c.(d - 0,4x) = 437,58.(65 - 0,4.22,5) = 24504,48 \text{ kN.cm}$$

$$M_{s'} = F_{s'}.s.(d - d'') = 69,60.(65 - 2,5) = 4350 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc}.d' = F_{cfc}.4 = 4F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao momento externo (situação que ocorre quando a seção está em equilíbrio), tem-se:

$$28828,80 = 24504,48 + 4350 + 4F_{cfc}$$

$$\text{Assim, } \mathbf{F_{cfc} = -6,42 \text{ kN}}$$

Quanto ao equilíbrio no centro de gravidade da região comprimida de concreto, tem-se:

$$M_i = M_s + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_s = F_s.(d - 0,4x) = 411,075.(65 - 0,4.22,5) = 23020,2 \text{ kN.cm}$$

$$M_{s'} = F_{s'}.s.(0,4x - d'') = 69,60.(0,4.22,5 - 2,5) = 452,40 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc}.(h - 0,4x) = F_{cfc}.(69 - 0,4.22,5) = 60,0.F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao externo, tem-se:

$$28828,80 = 23020,2 + 452,40 + 60,0.F_{cfc}$$

$$\mathbf{F_{cfc} = 89,27 \text{ kN}}$$

Ainda nessa configuração, o valor encontrado para F_{cfc} no equilíbrio pelo centro de gravidade de compressão do concreto é maior. Portanto, deve-se diminuir um pouco mais o valor da posição da linha neutra até que se chegue a valores semelhantes de F_{cfc} e configure-se o equilíbrio total dos momentos.

Tentemos, agora, $x = 22,15 \text{ cm}$:

$$F_c = 0,85.f_{cd}.0,8.x.b_w = 0,85.1,43.0,8.22,15.20 = 430,77 \text{ kN}$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s = 43,5 \cdot 9,45 = 411,075 \text{ kN}$$

$$F_s' = f_{yd} \cdot A_s' = 43,5 \cdot 1,60 = 69,60 \text{ kN}$$

Em relação do centro de gravidade da armadura tracionada, tem-se a seguinte configuração de equilíbrio:

$$M_i = M_c + M_s' + M_{cfc}$$

$$M_c = F_c \cdot (d - 0,4x) = 430,77 \cdot (65 - 0,4 \cdot 22,15) = 24183,43 \text{ kN.cm}$$

$$M_s' = F_s' \cdot (d - d'') = 69,60 \cdot (65 - 2,5) = 4350 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot d' = F_{cfc} \cdot 4 = 4F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao momento externo (situação que ocorre quando a seção está em equilíbrio), tem-se:

$$28828,80 = 24183,43 + 4350 + 4F_{cfc}$$

$$\text{Assim, } \mathbf{F_{cfc} = 73,84 \text{ kN}}$$

Quanto ao equilíbrio no centro de gravidade da região comprimida de concreto, tem-se:

$$M_i = M_s + M_s' + M_{cfc}$$

$$M_s = F_s \cdot (d - 0,4x) = 411,075 \cdot (65 - 0,4 \cdot 22,15) = 23077,75 \text{ kN.cm}$$

$$M_s' = F_s' \cdot (0,4x - d'') = 69,60 \cdot (0,4 \cdot 22,15 - 2,5) = 442,656 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot (h - 0,4x) = F_{cfc} \cdot (69 - 0,4 \cdot 22,15) = 60,14 \cdot F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao externo, tem-se:

$$28828,80 = 23077,75 + 442,656 + 60,14F_{cfc}$$

$$\mathbf{F_{cfc} = 88,27 \text{ kN}}$$

O valor encontrado no equilíbrio pelo centro de gravidade de compressão do concreto ainda é maior, portanto, deve-se diminuir novamente o valor da posição da linha neutra x .

Tentemos, agora, $x = 22,10 \text{ cm}$:

$$F_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot x \cdot b_w = 0,85 \cdot 1,43 \cdot 0,8 \cdot 22,1 \cdot 20 = 429,80 \text{ kN}$$

$$F_s = f_{yd} \cdot A_s = 43,5 \cdot 9,45 = 411,075 \text{ kN}$$

$$F_s' = f_{yd} \cdot A_s' = 43,5 \cdot 1,60 = 69,60 \text{ kN}$$

Em relação do centro de gravidade da armadura tracionada, tem-se a seguinte configuração de equilíbrio:

$$M_i = M_c + M_s' + M_{cfc}$$

$$M_c = F_c \cdot (d - 0,4x) = 429,80 \cdot (65 - 0,4 \cdot 22,1) = 24137,57 \text{ kN.cm}$$

$$M_s' = F_s' \cdot (d - d'') = 69,60 \cdot (65 - 2,5) = 4350 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot d' = F_{cfc} \cdot 4 = 4F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao momento externo (situação que ocorre quando a seção está em equilíbrio), tem-se:

$$28828,80 = 24137,57 + 4350 + 4F_{cfc}$$

Assim, **$F_{cfc} = 85,31 \text{ kN}$**

Quanto ao equilíbrio no centro de gravidade da região comprimida de concreto, tem-se:

$$M_i = M_s + M_{s'} + M_{cfc}$$

$$M_s = F_s \cdot (d - 0,4x) = 411,075 \cdot (65 - 0,4 \cdot 22,1) = 23085,97 \text{ kN.cm}$$

$$M_{s'} = F_{s'} \cdot (0,4x - d'') = 69,60 \cdot (0,4 \cdot 22,1 - 2,5) = 441,26 \text{ kN.cm}$$

$$M_{cfc} = F_{cfc} \cdot (h - 0,4x) = F_{cfc} \cdot (69 - 0,4 \cdot 22,1) = 60,16 \cdot F_{cfc}$$

Igualando o momento interno ao externo, tem-se:

$$28828,80 = 23085,97 + 441,26 + 60,16F_{cfc}$$

$F_{cfc} = 88,12 \text{ kN}$

Apesar de não serem idênticos, os valores são muito próximos e atingem um nível satisfatório para que se possa continuar o processo de dimensionamento do reforço de fibra de carbono e se consiga atingir um desempenho satisfatório de atuação do reforço de fibra de carbono na estrutura.

Com isso, pode-se afirmar que a força atuante sobre o compósito de fibra de carbono, a qual o material deverá ser detalhado para resistir, equivale a 88,12 kN. Definida a posição da linha neutra que gera a configuração de equilíbrio e conhecido o valor da força atuante sobre o compósito, é possível determinar a área de fibra de carbono necessária, o número de camadas equivalente e a deformação gerada pelo material:

$$\varepsilon_{tot} = (h - x) \cdot \varepsilon_c / x = (69 - 22,10) \cdot 3,5\% / 22,10$$

$$\varepsilon_{tot} = 7,296 \%$$

$$\varepsilon_{cfc} = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_{perm} = 7,296 \% - 0,189 \%$$

$\varepsilon_{cfc} = 7,107 \%$

$$f_{cfc} = \varepsilon_{cfc} \cdot E_{cfc} = 7,107 \% \cdot 22800 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{cfc} = 161,329 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{cfc} = F_{cfc} / f_{cfc} = 88,12 / 161,329$$

$A_{cfc} = 0,546 \text{ cm}^2$

$$b_{cfc} = A_{cfc} / esp_{cfc} = 0,546 / 0,0165$$

$$b_{cfc} = 33,091 \text{ cm}$$

$$n_{camada} = b_{cfc} / bw = 33,091 / 20 = 1,6546$$

$n_{camada} = 2 \text{ camadas}$

Em suma, conclui-se que, para esse estudo de caso, o reforço aplicado de fibra de carbono CF-130 possui $0,546 \text{ cm}^2$ de área total, com 2 camadas de aplicação, com deformação de $7,107\%$ e resiste a uma força de atuação de $88,12 \text{ kN}$.

3.2 ESTUDO DE CASO 2 – DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO AO CISALHAMENTO

O segundo estudo de caso apresentado refere-se ao mesmo exemplo da viga de concreto armado do estudo de caso anterior. Entretanto, agora a estrutura está sendo exposta a um carregamento majorado que a solicita com um esforço cortante máximo de $V_{sol} = 195,929 \text{ kN}$.

Os dados quanto a seção transversal da viga, as propriedades do concreto e das armaduras utilizadas, assim como as adoções realizadas permanecem para esse segundo estudo de caso. O modelo de dimensionamento do reforço ao cisalhamento se dá conforme as seguintes etapas: cálculo do esforço resistente da seção não-reforçada (V_{sd}); cálculo do esforço cortante resistido pelo reforço (V_{cfc}); Detalhamento do reforço de fibra de carbono.

Cálculo do esforço resistente da seção não-reforçada (V_{sd})

O cálculo de V_{sd} segue o modelo de cálculo I apresentado nas hipóteses do concreto armado e segue o modelo exposto no tópico anterior que demonstra o modelo de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado ao cisalhamento com fibras de carbono. Com isso, tem-se:

$$V_{sd} = V_c + V_{sw}$$

$$\text{Onde } V_c = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d, \text{ sendo } f_{ctd} = 0,15 \cdot f_{ck}^{2/3} \text{ (com } f_{ck} \text{ em MPa)}$$

$$\text{Assim, tem-se: } f_{ctd} = 0,1105 \text{ kN}$$

$$V_c = 0,6 \cdot 0,1105 \cdot 20 \cdot 65$$

$$V_c = 86,19 \text{ kN}$$

$$\text{E onde, } V_{sw} = (A_{sw}/s) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{yd}$$

$$\text{Sendo } (A_{sw}/s) = \pi \cdot (\Phi^2/4) \cdot N_{ramos} / s = \pi \cdot (0,63^2/4) \cdot 2 / 20$$

$$A_{sw}/s = 0,0312 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

$$\text{Assim, } V_{sw} = 0,0312 \cdot 0,9 \cdot 65 \cdot 43,5$$

$$V_{sw} = 79,40 \text{ kN}$$

$$\text{Com isso, } V_{sd} = 86,19 + 79,40$$

$$\mathbf{V_{sd} = 165,59 \text{ kN}}$$

Cálculo do esforço cortante resistido pelo reforço (V_{cfc})

Com o valor do esforço cortante resistente da seção não-reforçada obtido, parte-se para o cálculo do esforço cortante resistido pelo reforço V_{cfc} , conforme a seguinte expressão:

$$\Phi_{cfc} \cdot V_{cfc} + V_{sd} = V_{d,solic}$$

Recomenda-se o uso de coeficiente de minoração para o reforço de fibra de carbono Φ_{cfc} (0,85) pela novidade do uso do material em estrutural, garantindo uma maior segurança para a estrutura.

$$0,85 \cdot V_{cfc} + 165,59 = 195,929 \cdot 1,4$$

$$\mathbf{V_{cfc} = 127,895 \text{ kN}}$$

Vale ressaltar que o valor encontrado para V_{cfc} é limitado pelo valor da seguinte expressão:

$$0,332 \cdot (f_{cd}^{1/2}) \cdot d \cdot b_w = 0,332 \cdot (1,43^{1/2}) \cdot 65 \cdot 20 = 516,119 \text{ kN} \quad \text{ok!}$$

Detalhamento do reforço de fibra de carbono

O detalhamento do reforço de fibra de carbono se dá logo após a obtenção do valor da tensão cortante resistida pelo material. Tal detalhamento se dá principalmente pela definição da largura da camada de fibra de carbono aplicada, o espaçamento entre elas e também, pelo número de camadas do compósito aplicado. Salienta-se que os cálculos das variáveis apresentado a seguir segue o modelo apresentado, assim como as definições de cada variável citada. Assim, tem-se:

$$(w_{cfc}/s_{cfc}) = V_{cfc} / (2 \cdot n \cdot t_{cfc} \cdot f_{cfc} \cdot d_{cfc})$$

Para a obtenção do valor da razão entre a largura e o espaçamento do material, há, inicialmente, algumas incógnitas. E para desvendá-las, algumas variáveis precisam ser definidas. Com isso, tem-se os seguintes cálculos:

$$L_e = L_o / (n^{1/2}) \text{ onde } L_o = 2500 / (t_{cfc} \cdot E_{cfc})^{0,58}$$

Para o caso do compósito de CF – 130 aplicado, pode-se utilizar diretamente $L_o = 55$ mm. Além disso, vale lembrar que se recomenda adotar inicialmente uma camada de aplicação do compósito. Assim:

$$L_e = 55 / (1^{1/2})$$

$$\mathbf{L_e = 55 \text{ mm} = 5,5 \text{ cm}}$$

$$d_{cfc} = d - hf = 65 - 0$$

$$\mathbf{d_{cfc} = 65 \text{ cm}}$$

$$d_{cfce} = df - Le = 65 - 5,5$$

$$\underline{d_{cfce} = 59,5 \text{ cm}}$$

$$K2 = d_{cfce} / d_{cfc} = 59,5 / 65$$

$$\underline{K2 = 0,915}$$

$$K1 = (f_{cd}/27)^{2/3} = (14,3 / 27)^{2/3}$$

$$\underline{K1 = 0,655}$$

Adota-se também para o compósito CF – 130, a deformação última $\varepsilon_{fu} = 0,017$.

Com essas variáveis definidas, é possível se calcular o fator R necessário para a obtenção da tensão-limite atuante:

$$R = (K1.K2.Le) / (11900. \varepsilon_{fu}) \leq 0,005 / \varepsilon_{fu}$$

$$R = (0,655.0,915.55) / (11900.0,017) \leq 0,005/0,017$$

$$R = 0,163 \leq 0,294 \text{ ok!}$$

Com isso, tem-se a tensão-limite atuante ff através da seguinte expressão, onde a tensão última fu equivale a 350 kN/cm²:

$$f_{cfc} = R . fu = 0,163 . 350$$

$$\underline{f_{cfc} = 57,05 \text{ kN/cm}^2}$$

Assim, com todas as incógnitas aferidas, é possível se obter o valor da relação (wf/sf):

$$(w_{cfc}/s_{cfc}) = 127,895 / (2.1.0,0165.57,05.65)$$

$$(w_{cfc}/s_{cfc}) = 1,045 > 1,00$$

Portanto, conforme as diretrizes apresentadas no modelo de dimensionamento do tópico anterior, apenas uma camada do material não é suficiente. Com isso, deve-se refazer os cálculos anteriores com 2 camadas de material. Assim, tem-se:

$$Le = Lo / (n^{1/2})$$

$$Le = 55 / (2^{1/2})$$

$$\underline{Le = 38,9 \text{ mm} = 3,89 \text{ cm}}$$

$$d_{cfc} = d - hf = 65 - 0$$

$$\underline{d_{cfc} = 65 \text{ cm}}$$

$$d_{cfce} = d_{cfc} - Le = 65 - 3,89$$

$$\underline{d_{cfce} = 61,11 \text{ cm}}$$

$$K2 = d_{cfce} / d_{cfc} = 61,11 / 65$$

$$\underline{K2 = 0,940}$$

$$K1 = (f_{cd}/27)^{2/3} = (14,3 / 27)^{2/3}$$

$$\underline{K1 = 0,655}$$

$$R = (K1.K2.Le) / (11900. \varepsilon_{fu}) \leq 0,005 / \varepsilon_{fu}$$

$$R = (0,655 \cdot 0,940 \cdot 38,9) / (11900 \cdot 0,017) \leq 0,005 / 0,017$$

$$R = 0,118 \leq 0,294 \text{ ok!}$$

$$f_{cfc} = R \cdot f_u = 0,118 \cdot 350$$

$$f_{cfc} = \mathbf{41,30 \text{ kN/cm}^2}$$

$$(W_{cfc}/S_{cfc}) = 127,895 / (2 \cdot 2 \cdot 0,0165 \cdot 41,30 \cdot 65)$$

$$(W_{cfc}/S_{cfc}) = 0,722 < 1,00$$

Nesse caso, também conforme as diretrizes, pode-se utilizar lâminas com largura pré-definida para manter o espaçamento indicado pelo cálculo. Foi adotado nesse exemplo, lâminas de fibra de carbono com **15 cm de largura**. Com isso, tem-se:

$$s_{cfc} = 2 \cdot 2 \cdot 15 \cdot 0,0165 \cdot 41,30 \cdot 65 / 127,895$$

$$s_{cfc} = \mathbf{20,780 \text{ cm}}$$

Dessa forma, pode-se definir a área de fibra de carbono aplicada pela seguinte fórmula:

$$A_{cfc} = 2 \cdot n \cdot t_{cfc} \cdot W_{cfc} = 2 \cdot 2 \cdot 0,0165 \cdot 15$$

$$A_{cfc} = \mathbf{0,99 \text{ cm}^2}$$

Em suma, conclui-se que, para esse estudo de caso, o reforço aplicado de fibra de carbono CF-130 com 15 cm de largura deve possuir um espaçamento de 20,780 cm, com 2 camadas de aplicação, área total de 0,99 cm² e resiste a uma força cortante de 127,895kN.

Figura 28: Parte 2 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.

Propriedades das Armaduras Longitudinais:

Espaçamento vertical entre as barras:
 $e_{vert} =$ cm

Armadura Positiva

Primeira Camada:
 Diâmetro das barras: mm
 Quantidade: barras
 Distância da fibra inferior: cm
 $A_{s_cam1} =$ cm²

Segunda Camada:
 Diâmetro das barras: mm
 Quantidade: barras
 Distância da fibra inferior: cm
 $A_{s_cam2} =$ cm²

$d' =$ cm → Distância do CG da Armadura Positiva até a Fibra Inferior

Centro de Gravidade da Armadura: $Y_{CG_armadura} =$ cm < $0,10 h =$ cm

$A_{s_inf\ tot} =$ cm²

Fonte: Autor.

Figura 29: Parte 3 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.

Armadura Negativa

Primeira Camada:
 Diâmetro das barras: mm
 Quantidade: barras
 Distância da fibra superior: cm
 $A_{s_cam1} =$ cm²

Segunda Camada:
 Diâmetro das barras: mm
 Quantidade: barras
 Distância da fibra superior: cm
 $A_{s_cam2} =$ cm²

$A_{s_sup\ tot} =$ cm² $d'' =$ cm → Distância do CG da Armadura Negativa até a Fibra Superior

Propriedades da Armadura Transversal:

Diâmetro do Estribo: mm
 Número de Ramos: ramos
 Espaçamento: cm

Propriedades da Fibra:

Designação (Nome): Viapol Carbon
 Resistência Máx. à Tração: MPa
 Módulo de Elasticidade: MPa
 Alongamento na Ruptura: %
 Espessura da Manta: mm

Fonte: Autor.

Figura 30: Parte 4 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.

Momento Resistente da Seção Não Reforçada

Altura Útil: $d = 0,00$ cm

$\gamma = 0,8 \times$
 $X_{2-3} \leq 0,259 d$ ou $Y \leq 0,207 d$

(1) - Inicialmente faz-se: $\sigma_1 = f_{yd} = 0,0$ kN/cm²

e $\sigma_2 = f_{yd} = 0,0$ kN/cm²

$K_{x_dom2/dom3} = 0,259$ ←

$y = \#DIV/0!$ cm → $y/d = \#DIV/0!$

$y \#DIV/0! 0,207 \cdot D$

Portanto Domínio: $\#DIV/0!$

$\sigma_1 = 0,0$ kN/cm²

$\sigma_2 = 0,0$ kN/cm²

$\epsilon_{yd} = \#DIV/0!$ ‰

$\epsilon_2 = \#DIV/0!$ ‰

(2) - Com isso, temos: $M_d = \#DIV/0!$ kN . cm

Fonte: Autor.

Figura 31: Parte 5 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.

Momento Devido a Carga Permanente

Percentual em Relação ao Momento de Cálculo M_d : → % Recomenda-se adotar 10% como percentual !!

$M_{g,d} = \#DIV/0!$ kN.cm

Deformação Devido a Carga Permanente

Coeficiente k_c : $k_{c_perm} = \#DIV/0!$

Coeficiente K_x : $k_{x_perm} = \#DIV/0!$

Posição da LN: $X_{perm} = \#DIV/0!$ cm

Altura do Diagrama: $Y_{perm} = \#DIV/0!$ cm

Braço da Alavanca: $Z_{perm} = \#DIV/0!$ cm

Esforço na Armadura: $F_{s_perm} = \#DIV/0!$ kN

Tensão na Armadura: $f_{s_perm} = \#DIV/0!$ kN/cm²

Deformação Armadura: $\epsilon_{perm} = \#DIV/0!$ ‰

Fonte: Autor.

Figura 32: Parte 6 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.

Cálculo do Reforço Necessário:										
Inicialmente com:	$\epsilon_{sd} =$		%	→	$K_{x_lim} =$	0,628	→	$X_{lim} =$	#DIV/0!	cm
	$\epsilon_{cd} =$		%							
Força Resultante de Compressão no Concreto:										
F conc =	#DIV/0!	kN								
Força Resultante de Tração na Armadura Inferior:										
Fs =	0,00	kN								
Força Resultante de Compressão na Armadura Superior:										
Fs' =	0,00	kN								

Fonte: Autor.

Figura 33: Parte 7 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.

Momento Fletor em Relação ao Centro de Gravidade da Armadura Inferior:											
$M_{d,ref} = (M_{conc} + M_{s'} + M_{fibra})$	kN.cm	$M_{conc} = F_{conc} (d - 0,4x) =$	#DIV/0!	kN.cm	$M_{s'} = F_{s'} (d - d'') =$	0,00	kN.cm	$M_{fibra} = d' * F_{fibra} =$	(0,000 x Fibra)	kN.cm	
$F_{fibra_CG\ As} =$	#DIV/0!	kN	→ Introduzir Momento Fletor Majorado: $M_{d,ref} =$								kN.cm
Momento Fletor em Relação ao Centro de Gravidade da região Comprimida do Concreto:											
$M_{d,ref} = (M_s + M_{s'} + M_{fibra})$	kN.cm	$M_s = F_s (d - 0,4x) =$	#DIV/0!	kN.cm	$M_{s'} = F_{s'} (0,4 x - d'') =$	#DIV/0!	kN.cm	$M_{fibra} = (h - 0,4 x) * F_{fibra} =$	(#DIV/0! x Fibra)	kN.cm	
$F_{fibra_CG\ Conc} =$	#DIV/0!	kN									
$F_{fibra_CG\ As} - F_{fibra_CG\ conc} =$	#DIV/0!	kN									

Fonte: Autor.

Figura 34: Parte 8 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.

<p>Variando "x": Colocar Inicialmente "10" cm na célula do "x" ZERAR CÉLULA E185</p>			<p>← Célula Azul (C172)</p>	<p>Como chegar em "Atingir Meta": Ir em "Dados" → "Teste de Hipóteses" → "Atingir Meta" → Preencher o quadro</p>
<p>x = 10 cm ←</p>	<p>Utilizar "ATINGIR META"</p>	<p>← Célula Rosa (E185)</p>	<p>ε_s = #DIV/0! ‰ ; ε_s' = --- ‰ ; ε_{totfibra} = #DIV/0! ‰ ;</p>	<p>σ_s = #DIV/0! kN/cm²; σ_s' = 0,00 kN/cm²;</p>
<p>y = 0,00 cm ←</p>	<p>Para "X"</p>			
<p>F_{conc} = 0,00 kN</p>				
<p>F_s = #DIV/0! kN</p>				
<p>F_s' = 0,00 kN</p>				
<p>F_{fibra_CG As} = #DIV/0! kN</p>				
<p>F_{fibra_CG Conc} = #DIV/0! kN</p>				
<p>F_{fibra_CG As} - F_{fibra_CG Conc} = #DIV/0! ← E185</p>				
<p>X_{resposta} = 0,00 cm</p>				
<p>ε_{fibra} = #DIV/0! ‰ ←</p>				
<p>f_{fibra} = #DIV/0! kN/cm²</p>				
<p>F_{fibra} = #DIV/0! kN</p>				

<p>Momento Fletor em Relação ao Centro de Gravidade da Armadura Inferior:</p>	
<p>M_{d,ref} = (M_{conc} + M_s' + M_{fibra}) kN.cm</p>	<p>M_{conc} = F_{conc} (d - 0,4x) = 0,00 kN.cm</p>
	<p>M_s' = F_s' (d - d') = 0,00 kN.cm</p>
<p>F_{fibra_CG As} = #DIV/0! kN</p>	<p>M_{fibra} = d' * F_{fibra} = (0,00 x Fibra) kN.cm</p>

<p>Momento Fletor em Relação ao Centro de Gravidade da região Comprimada do Concreto:</p>	
<p>M_{d,ref} = (M_s + M_s' + M_{fibra}) kN.cm</p>	<p>M_s = F_s (d - 0,4x) = #DIV/0! kN.cm</p>
	<p>M_s' = F_s' (0,4x - d') = 0,00 kN.cm</p>
<p>F_{fibra_CG Conc} = #DIV/0! kN</p>	<p>M_{fibra} = (h - 0,4x) * F_{fibra} = (0,00 x Fibra) kN.cm</p>

Fonte: Autor.

Figura 35: Parte 9 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com fibra de carbono.

<p>A_{fibra} = $\frac{F_{fibra}}{f_{fibra}}$ = #DIV/0! cm²</p>
<p>Espessura da Fibra : 0 mm</p>
<p>Largura da Fibra: $\frac{A_{fibra}}{Esp_{fibra}}$ = #DIV/0! cm</p>
<p>Largura da Viga : bw = 0 cm</p>
<p>Número de Camadas: $\frac{Larg_{fibra}}{bw}$ = $\frac{\#DIV/0!}{0}$ = #DIV/0! → #DIV/0! Camadas</p>

Fonte: Autor.

Figura 36: Parte 1 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC.

 UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"	
Trabalho de Graduação - Curso de Engenharia Civil	
Reforço com Fibra de Carbono em Vigas de Concreto Armado	
Orientador: Prof. Dr. Antonio Wanderley Terni	
Aluno: Bruno Valente Verderamo RA: 141321075	
Dimensionamento de Reforço ao Cisalhamento com Fibra de Carbono	
Preencher os dados somente nas células laranjas	
Os dados apresentados no dimensionamento do reforço à flexão com Fibra de Carbono permanecem sendo utilizados para o reforço ao Cisalhamento da Viga com Fibra de Carbono	
Cálculo do Esforço Resistente da Seção não-reforçada: Vsd	
$V_{sd} = V_c + V_{sw}$	
$(A_{sw}/s) =$	<input type="text" value="#DIV/0!"/> cm^2/cm
$V_{sw} =$	<input type="text" value="#DIV/0!"/> kN
Usando Modelo I que é mais Conservativo! Para estribo vertical: $\alpha = 90^\circ$	
$f_{ctd} =$	<input type="text" value="0,000"/> MPa
$V_c =$	<input type="text" value="0,000"/> kN
$V_{sd} =$	<input type="text" value="#DIV/0!"/> kN

Fonte: Autor.

Figura 37: Parte 2 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC.

Cálculo do Esforço Cortante Resistido pelo Reforço: $V_{d,cfc}$	
$\Phi_{cfc} \cdot V_{d,cfc} + V_{sd} = V_{d,solic}$	
Introduzir o Esforço Cortante Majorado: $V_{solic} =$ <input type="text" value=""/> kN	
$\Phi_{cfc} =$	<input type="text" value="0,85"/>
Utiliza-se o coeficiente de segurança recomendado por Machado (2002) pela novidade do uso do método	
$V_{d,cfc} =$	<input type="text" value="#DIV/0!"/> kN
Valor Máximo permitido para o Reforço resistir:	<input type="text" value="0,000"/> kN

Fonte: Autor.

Figura 38: Parte 3 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC.

Detalhamento do Reforço de Fibra de Carbono

$(w_{cfc}/s_{cfc}) = \frac{V_{d,cfc}}{2 \cdot n \cdot t_{cfc} \cdot f_{cfc} \cdot d_{cfc}}$ Adota-se o uso da fibra na vertical !!
 $\beta = 90^\circ$

Número de Camadas: $n =$ camada(s) Recomenda-se adotar, inicialmente, 1 camada de reforço!!

$Le = \frac{L_o}{\sqrt{n}} =$ cm Onde, $L_o =$ mm

$d_{cfc} = d - hf =$ cm Onde hf corresponde a altura da mesa colaborante da seção transversal $hf =$ cm

$d_{cfc,e} = d_{cfc} - Le =$ cm

$K2 = \frac{d_{cfc,e}}{d_{cfc}} =$

$K1 = (f_{cd} / 27)^{2/3} =$

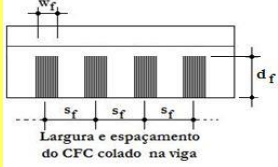
$R = \frac{K1 \cdot K2 \cdot Le}{11900 \cdot \epsilon_{fu}} =$ ≤ NÃO OK! Considera-se para a deformação última da fibra de carbono $\epsilon_{fu} =$

$f_{cfc} = R \cdot f_u =$ kN/cm² Onde a tensão última da fibra de carbono $f_u =$ kN/cm²

Assim, tem-se: $(w_{cfc}/s_{cfc}) =$ *Pode-se utilizar lâminas de largura pré-determinada para manter o espaçamento conforme a relação. Adota-se $w_f = 15$ cm*

Com isso, $s_{cfc} =$ cm ← Com $w_{cfc} =$ cm ↑

$A_{cfc} =$ cm² ←



Largura e espaçamento do CFC colado na viga

Fonte: Autor.

Vale salientar que as imagens apenas ilustram a configuração e o layout da planilha de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono desenvolvida. O intuito desse tópico é apenas a exposição dessa planilha que se trata de uma ferramenta eletrônica e exige equipamentos eletrônicos para acesso ao seu arquivo e, posterior uso para dimensionamentos.

5 MANUAL DE USO DA PLANILHA ELETRÔNICA APRESENTADA

Nesse tópico será exposto um manual de instruções para auxiliar o usuário na utilização da planilha eletrônica desenvolvida. Por meio desse manual, o usuário poderá preencher os campos necessários corretamente e efetuar os passos de maneira eficaz para obter os resultados do dimensionamento do reforço estrutural da viga de concreto armado com fibra de carbono assertiva e rapidamente.

O arquivo da planilha desenvolvido através do programa Microsoft Excel 2013 possui duas planilhas internas conectadas: a primeira planilha chamada Flexão possui os campos e passos relacionados ao processo de dimensionamento de reforço à flexão de uma viga de concreto armado com CFC; a segunda planilha denominada Cisalhamento possui os campos e processos para o dimensionamento de reforço ao cisalhamento de uma viga de concreto armado com o compósito. As duas planilhas são interligadas pois, os dados introduzidos na planilha Flexão já são automaticamente utilizados para o dimensionamento na planilha Cisalhamento, tornando o processo de dimensionamento mais rápido para os dois casos.

Vale destacar que a configuração da planilha desenvolvida permite identificar visualmente os campos em que o usuário deve introduzir dados, tais campos correspondem as células de cor laranja. Na planilha Flexão, há 27 células laranjas para preenchimento do usuário. Já na planilha Cisalhamento, como os dados da outra planilha já são aproveitados, existem apenas 3 campos para o usuário completar.

Abaixo, tem-se a descrição dos passos sugeridos a se seguir para o correto uso da planilha e dimensionamento do reforço:

1. Com o arquivo aberto na planilha Flexão, o primeiro passo consiste na introdução dos dados referentes a seção transversal da viga. Mais especificamente, a largura b_w , a altura h e o cobrimento cob . Os três dados devem ser completados em centímetros, vide figura 27;
2. O segundo passo corresponde na introdução dos dados da viga de concreto armado, introduz-se o valor da resistência característica do concreto f_{ck} em MPa que fornecerá o valor da resistência de cálculo do concreto (f_{cd}) também em MPa. Além disso, preenche-se os campos referentes as propriedades do aço, o valor da resistência característica de escoamento do aço f_{yk} em MPa e do módulo de elasticidade do aço E_s em MPa. A planilha fornecerá o valor da resistência de cálculo de escoamento do aço (f_{yd}) também em MPa, conforme se vê também na figura 27;

3. O terceiro passo limita-se ao preenchimento do valor do espaçamento vertical entre as barras e_{vert} em cm, conforme figura 28, dando início ao processo de introdução dos dados referentes as propriedades das armaduras longitudinais;
4. Nesse passo, ocorrerá o preenchimento dos dados relacionados a armadura positiva da seção. Inicialmente, referente a primeira camada da armadura, opta-se por uma das opções disponíveis para o diâmetro das barras utilizadas em mm, conforme tabela de bitolas presentes na planilha e depois, informa-se a quantidade de barras presentes nessa primeira camada. Após isso, completa-se os campos relacionados a segunda camada da armadura positiva, através do mesmo procedimento. Opta-se por uma das opções de bitolas em mm para o diâmetro das barras e introduz-se a quantidade de barras presentes nessa camada. É possível observar os campos a serem preenchidos também na figura 28;
5. Ainda quanto a armadura positiva, a planilha fornecerá alguns valores como a área de armadura positiva total $A_{s_inf\ tot}$ e a distância do centro de gravidade da armadura positiva até a fibra mais tracionada d' . Além disso, apresentará algumas expressões que indicarão a consistência dos dados fornecidos;
6. O sexto passo consiste na introdução de dados referentes a armadura negativa da seção transversal. O procedimento ocorre da mesma forma que o apresentado para a armadura positiva. Opta-se por um valor disponível em mm de diâmetro das barras utilizadas e se fornece a quantidade de barras utilizadas. Esse procedimento se dá tanto para a primeira como para a segunda camada de barras presente na seção (vide figura 29). Caso não haja uma segunda camada, basta informar a quantidade de 0 barra utilizada na camada. A planilha fornecerá $A_{s_sup\ tot}$ e o valor de d'' correspondente a distância do centro de gravidade da armadura negativa até a fibra mais comprimida;
7. O sétimo passo consiste na implementação de dados quanto as propriedades da armadura transversal da estrutura. Seleciona-se uma das opções disponíveis em mm para informar o diâmetro do estribo utilizado, e informa-se o número de ramos e o espaçamento entre barras em centímetros (figura 29);
8. Nesse oitavo passo, o usuário não precisará preencher nenhum campo. Basta observar as informações geradas pela planilha no quadro “Momento Resistente da Seção Não-Reforçada” através dos dados informados anteriormente. Destaque para o valor da altura útil d , o domínio englobado pelo caso e o valor do momento resistente de cálculo da seção M_d (figura 30);

9. O nono passo está relacionado ao cálculo do “Momento devido a Carga Permanente”, o usuário deverá informar o percentual em relação ao momento de cálculo M_d obtido anteriormente que abrange a carga permanente da estrutura. Conforme aviso ao lado, recomenda-se adotar 10% como percentual permanente da estrutura. Através dessa inserção, obtém-se o valor da deformação da armadura permanente da estrutura ε_{perm} (figura 31);
10. Este passo consiste na execução do Cálculo do Reforço Necessário, inicialmente preenche-se as células condizentes a deformação do aço $\varepsilon_{sd} = 10\text{‰}$ e a deformação do concreto $\varepsilon_{cd} = 3,5\text{‰}$, pois trabalha-se com a ideia de a estrutura estar normalmente armada em um primeiro momento. Além disso, introduz-se o valor do momento fletor de cálculo majorado $M_{d,sol}$ em kN.cm o qual a estrutura está sendo solicitada (figura 33);
11. Os passos 11 e 12 podem ser ditos como os mais importantes, pois através deles será obtido o valor da posição da linha neutra x que gera o equilíbrio de forças da estrutura e conseqüentemente, fornece a deformação da fibra e a força suportada por ela. Inicialmente, introduz-se o valor “10” cm na célula C172 do “x”.
12. Nesse passo, clica-se em “Dados”, depois “Teste de Hipóteses” e por fim, “Atingir Meta”. Surgirá um pequeno quadro na tela com três campos a serem preenchidos. Primeiramente completa-se o campo “Definir Célula”, selecionando-se a célula E185 de fundo preto e texto em rosa correspondente ao valor de $F_{fibra_CG\ As} - F_{fibra_CG\ conc}$. Após isso, completa-se o campo “Para valor” introduzindo o valor “0”. E por último, preenche-se o campo “Alternando célula”, selecionando-se a célula C172 de cor azul fluorescente, correspondente ao valor de x e preenchida com o valor 10 no último passo. Clica-se em “ok” que, automaticamente e em poucos segundos, a planilha gerará o valor correto de x que corresponde ao equilíbrio das forças. No novo pequeno quadro gerado, clica-se em “ok” para que o valor gerado em x seja mantido na planilha (figura 34);
13. No décimo terceiro e último passo relacionado a primeira planilha Flexão, basta observar os resultados apresentados pela planilha, principalmente, nas células da cor azul escuro de fundo que indicam a posição da linha neutra x , a deformação da fibra e a força resistida pela fibra (figura 34). Analisa-se também os resultados fornecidos em células da cor amarelo (vide figura 35) que indicam, por exemplo, a área de fibra necessária, a espessura da fibra, a largura da fibra e o número de camadas que devem ser aplicadas do material;

14. Com o dimensionamento do reforço à flexão finalizado no passo anterior, passa-se ao dimensionamento do reforço ao cisalhamento. Portanto, nesse passo, o usuário deve selecionar a planilha “Cisalhamento” para prosseguir com o dimensionamento;
15. Nesse décimo quinto passo, o usuário apenas observa os resultados apresentados no primeiro quadro do “Cálculo do Esforço Resistente da Seção Não-Reforçada: V_{sd} ”. Tal quadro já aparece com os valores disponíveis, pois, a planilha já faz uso dos dados da estrutura inseridos na planilha “Flexão” anteriormente (figura 36);
16. O passo de número 16 corresponde ao “Cálculo do Esforço Cortante Resistido pelo Reforço: $V_{d,cfc}$ ”. Nesse passo, o usuário deverá fornecer o valor do esforço cortante majorado V_{sol} em kN pelo qual a estrutura está sendo solicitada. A planilha fornecerá expressões que indicarão a necessidade de uso ou não do reforço e a possibilidade de uso da técnica em questão (figura 37);
17. Caso a planilha indique que não haja a necessidade de uso de reforço na estrutura, o dimensionamento não tem porquê seguir adiante. Caso os valores sejam consistentes e o uso da técnica faça sentido, prossegue-se o dimensionamento com o “Detalhamento do Reforço de Fibra de Carbono” (figura 38);
18. Inicialmente nesse tópico, o usuário fornece o número de camadas aplicado do material na estrutura. Recomenda-se adotar, primeiramente, 1 camada de reforço conforme aviso presente na planilha;
19. Após isso, o usuário introduz o valor da altura da mesa colaborante da seção transversal h_f . Caso não haja conexão entre a viga e a laje e, portanto, não haja mesa colaborante basta introduzir o valor 0;
20. Com os valores introduzidos, a planilha fornecerá alguns resultados. Vale a atenção aos resultados do espaçamento s_{cfc} , da área de fibra A_{cfc} , da largura das lâminas aplicadas w_{cfc} e a expressão disponível ao lado da célula que fornece o resultado de (w_{cfc}/s_{cfc}) , todos em vermelho;
21. Caso o número de camadas fornecido anteriormente não seja adequado, os campos que fornecem os resultados esperados se apresentarão em branco e, a expressão indicará que se retorne ao campo da introdução do número de camadas, célula F65, e se aumente tal valor;
22. Caso o número de camadas fornecido esteja adequado, os resultados se apresentarão normalmente, e a expressão indicará a consistência dos dados e o uso de lâminas com largura w_{cfc} de 15 cm pré-determinada corretamente;

23. Por fim, analisa-se os resultados obtidos para o espaçamento, para a área de fibra utilizada e para a largura das lâminas dando fim ao processo de dimensionamento, vide figura 38;

Assim, finaliza-se o manual de uso da planilha eletrônica desenvolvida em Microsoft Excel 2013 pelo autor desse trabalho de graduação em conjunto com o professor orientador utilizada para o processo de dimensionamento de reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono.

6 ESTUDOS DE CASOS DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO DESENVOLVIDOS PELA PLANILHA ELETRÔNICA

Neste tópico, serão apresentados estudos de casos de dimensionamento de reforço estrutural de vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono desenvolvidos por meio da planilha eletrônica desenvolvida e apresentada nos capítulos anteriores. Para posteriores análises comparativas e discussão de resultados, trata-se dos mesmos estudos de casos apresentados no capítulo 3, que foram desenvolvidos manualmente de acordo com o modelo de dimensionamento tradicional. Como já dito, os estudos de casos são baseados e tem como referência, os exemplos do livro “Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono” do autor Ari de Paula Machado.

6.1 ESTUDO DE CASO 1 – DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO DE VIGA À FLEXÃO COM CFC DESENVOLVIDO PELA PLANILHA ELETRÔNICA

O primeiro estudo de caso a ser discutido traz um exemplo de uma viga de concreto armado que necessita ser reforçada à flexão para resistir a carregamentos majorados que geram um momento fletor máximo equivalente a $20592,00 \text{ kN/cm}^2$, ou melhor, momento fletor de cálculo $M_{d,sol}$ de $28828,80 \text{ kN/cm}^2$.

O intuito principal da apresentação desses estudos de casos é de se expor e comprovar a possibilidade de uso da planilha eletrônica desenvolvida e a veracidade dos resultados por ela apresentados. Para tanto, todos os dados utilizados nos estudos de casos desenvolvidos manualmente também precisam ser adotados agora. Entretanto, em virtude da configuração da planilha e dos campos de alimentação nela presentes, alguns dados podem divergir e gerar pequenas diferenças nos resultados finais encontrados.

Segue abaixo, imagens que ilustram a planilha eletrônica alimentada com os dados e, posteriormente, os resultados finais fornecidos:

Inicialmente, como se observa na figura 39 exposta abaixo, tem-se a viga com seção transversal de largura b_w igual a 20 cm e altura h de 69 cm. Além disso, tem-se o cobrimento de 2,5 cm, o f_{ck} do concreto equivalente a 20 MPa, o f_{yk} do aço igual a 500 MPa e o módulo de elasticidade do aço E_s igual a 210000 MPa. Valores idênticos aos utilizados no estudo de caso do capítulo 3.

Figura 39: Parte 1 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC alimentada.

Dimensionamento de Reforço à Flexão com Fibra de Carbono			
Preencher os dados somente nas células laranjas			
Dados da Seção Transversal:			
Largura: $b_w =$	<input type="text" value="20"/>	cm	
Altura: $h =$	<input type="text" value="69"/>	cm	
Cobrimento:			
$cob =$	<input type="text" value="2,5"/>	cm	
Dados da viga de concreto armado:			
Propriedades do Concreto:			
$f_{ck} =$	<input type="text" value="20,0"/>	Mpa	\rightarrow $f_{cd} =$ <input type="text" value="14,3"/>
$E_c =$	<input type="text" value="21287"/>	Mpa	$\gamma_c =$ <input type="text" value="1,40"/>
Propriedades do Aço:			
$f_{yk} =$	<input type="text" value="500"/>	Mpa	\rightarrow $f_{yd} =$ <input type="text" value="435"/>
$E_s =$	<input type="text" value="210000"/>	Mpa	$\gamma_s =$ <input type="text" value="1,15"/>
			Tabela de Bitolas
			mm Polegada
			5,0 3/16"
			6,4 1/4"
			8,0 5/16"
			10,0 3/8"
			12,5 1/2"
			16,0 5/8"
			20,0 3/4"
			25,0 1"
			32,0 1 1/4"
			38,0 2 1/2"

Fonte: Autor.

Já na figura 40, tem-se a alimentação de dados relacionados as propriedades das armaduras longitudinais positiva. Primeiramente, observa-se que o espaçamento vertical entre as barras é equivalente a 2,0 cm. Após isso, tem-se as informações quanto a armadura positiva da estrutura: primeira camada com 3 barras de diâmetro 20 mm e segunda camada inexistente. Gerando uma área total de armadura tracionada $A_s = 9,42 \text{ cm}^2$ e a distância do centro de gravidade da armadura ao bordo mais tracionado $d' = 4,1 \text{ cm}$. Percebe-se aqui, as primeiras diferenças em relação ao estudo de caso desenvolvido manualmente que possui $A_s = 9,45 \text{ cm}^2$ e $d' = 4,0 \text{ cm}$.

Figura 42: Parte 4 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.

Momento Resistente da Seção Não Reforçada

Altura Útil: $d = 64,87$ cm

$\gamma = 0,8 \times$
 $X_{2-3} \leq 0,259 d$ ou $Y \leq 0,207 d$

(1) - Inicialmente faz-se:

$\sigma_1 = f_{yd} = 43,5$ kN/cm²

$\sigma_2 = f_{yd} = 43,5$ kN/cm²

$K_{x_dom2 / dom3} = 0,259$ ←

$y = 14,06$ cm → $y/d = 0,217$

$y > 0,207 \cdot D$

Portanto Domínio: **3**

$\sigma_1 = 43,5$ kN/cm²

$\sigma_2 = 43,5$ kN/cm²

$\epsilon_{yd} = 2,070$ ‰

$\epsilon_2 = 2,776$ ‰

(2) - Com isso, temos: $M_d = 23930,94$ kN.cm

Fonte: Autor.

Observa-se na imagem, que a altura útil da seção fornecida pela planilha equivale a 64,87 cm, um pouco abaixo dos 65 cm utilizados no exemplo desenvolvido manualmente. Nota-se também que a seção se enquadra no terceiro domínio das hipóteses da estrutura normalmente armada. E, por fim, que o momento de cálculo da seção não-reforçada vale 23930,94 kN.cm, valor ligeiramente menor que o obtido manualmente de 24151,68 kN.cm. Tal valor é menor que o atuante sobre a estrutura e, portanto, torna necessária a implantação do reforço.

Com o momento da seção não-reforçada obtido, parte-se para o cálculo da deformação devido a carga permanente da viga. Como se nota na figura 43, adotou-se 10% de percentual em relação ao momento de cálculo obtido e aferiu-se o valor de 0,188‰ como deformação permanente. Valor muito semelhante ao aferido manualmente de 0,189‰.

Figura 43: Parte 5 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.

Momento Devido a Carga Permanente

Percentual em Relação ao Momento de Cálculo Md: → % Recomenda-se adotar 10% como percentual !!

Mg,d = 2393,09 kN.cm

Deformação Devido a Carga Permanente

Coeficiente kc : kc_perm =

Coeficiente Kx : Kx_perm =

Posição da LN: X_perm = cm

Altura do Diagrama: Y_perm = cm

Braço da Alavanca: Z_perm = cm

Esforço na Armadura: Fs_perm = kN

Tensão na Armadura: fs_perm = kN/cm²

Deformação Armadura: ε_perm = %

Fonte: Autor.

Com essas informações obtidas, inicia-se efetivamente o cálculo do reforço necessário. Primeiramente, adota-se a seção como normalmente armada, com $\epsilon_c = 3,5\%$ e $\epsilon_s = 10\%$, como se vê na figura 44, para a determinação do valor inicial da linha neutra x igual a 16,82 cm, valor próximo ao 16,85 cm do desenvolvido manualmente. Após isso, obtém-se os valores das forças atuantes na seção para essa configuração de equilíbrio com $x = 16,82$ cm. Assim, tem-se $F_c = 326,73$ kN, $F_s = 409,77$ kN e $F_s' = 68,30$ kN.

Figura 44: Parte 6 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.

Cálculo do Reforço Necessário:										
Inicialmente com:		ε _{sd} =	<input type="text" value="10"/>	‰	→	K _{x_lim} =	<input type="text" value="0,628"/>	→	X _{lim} =	<input type="text" value="16,82"/> cm
		ε _{cd} =	<input type="text" value="3,5"/>	‰						
Força Resultante de Compressão no Concreto:										
F conc =	<input type="text" value="326,73"/>	kN								
Força Resultante de Tração na Armadura Inferior:										
F _s =	<input type="text" value="409,77"/>	kN								
Força Resultante de Compressão na Armadura Superior:										
F _{s'} =	<input type="text" value="68,30"/>	kN								

Fonte: Autor.

Com as forças calculadas, é possível se determinar os valores dos momentos fletores em relação ao centro de gravidade da armadura tracionada e em relação ao centro de gravidade da região comprimida de concreto para, conseqüentemente, se aferir os valores das forças resistidas pela fibra em relação a esses pontos de referência. Vale lembrar que se trata de um processo iterativo para determinação da posição da linha neutra x que configura um equilíbrio de forças da seção onde os valores das forças resistidas pela fibra em relação aos dois pontos de referência são iguais.

Figura 45: Parte 7 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.

Momento Fletor em Relação ao Centro de Gravidade da Armadura Inferior:			
$M_{d,ref} = (M_{conc} + M_s' + M_{fibra})$ kN.cm	$M_{conc} = F_{conc} (d - 0,4x) =$ 18995,36 kN.cm		
	$M_s' = F_s' (d - d'') =$ 4181,73 kN.cm		
	$M_{fibra} = d' * F_{fibra} = ($ 4,135 x $F_{fibra})$ kN.cm		
$F_{fibra_CGAs} = 1366,797$ kN	→	Introduzir Momento Fletor Majorado: $M_{d,ref} = 28828,80$ kN.cm	
Momento Fletor em Relação ao Centro de Gravidade da região Comprimida do Concreto:			
$M_{d,ref} = (M_s + M_s' + M_{fibra})$ kN.cm	$M_s = F_s (d - 0,4x) =$ 23823,49 kN.cm		
	$M_s' = F_s' (0,4 x - d'') =$ 211,15 kN.cm		
	$M_{fibra} = (h - 0,4 x) * F_{fibra} = ($ 62,27 x $F_{fibra})$ kN.cm		
$F_{fibra_CGConc} = 76,99$ kN			
$F_{fibra_CGAs} - F_{fibra_CGconc} = 1289,81$ kN			

Fonte: Autor.

Nota-se na figura 45 que o valor do momento fletor de cálculo majorado resistido pela estrutura reforçada de 28828, 80 kN.cm é introduzido na planilha nesse momento. Além disso, observa-se que os valores resistidos pela fibra são muito distantes, gerando uma diferença de 1289,81 kN a mais para o valor aferido em relação ao centro de gravidade da armadura tracionada, indicando a necessidade de se aumentar o valor da posição da linha neutra x para se obter a configuração de equilíbrio.

Figura 46: Parte 8 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço à flexão com CFC preenchida.

Variando "x": Colocar inicialmente "10" cm na célula do "x" ZERAR CÉLULA E185		← Célula Azul (C172)	Como chegar em "Atingir Meta": Ir em "Dados" → "Teste de Hipóteses" → "Atingir Meta" → Preencher o quadro	
x = 22,33 cm ←	Utilizar "ATINGIR META" Para "X"	← Célula Rosa (E185)	$\epsilon_s = 6,67 \%$; $\epsilon_s' = 2,93 \%$; $\epsilon_{totfibra} = 7,32 \%$;	
y = 17,86 cm ←			$\sigma_s = 43,50 \text{ kN/cm}^2$; $\sigma_s' = 43,50 \text{ kN/cm}^2$;	
$F_{conc} = 433,80 \text{ kN}$		Momento Fletor em Relação ao Centro de Gravidade da Armadura Inferior:		
$F_s = 409,98 \text{ kN}$		$M_{d,ref} = (M_{conc} + M_s' + M_{fibra}) \text{ kN.cm}$ $M_{conc} = F_{conc} (d - 0,4x) = 24263,94 \text{ kN.cm}$		
$F_s' = 68,33 \text{ kN}$		$M_s' = F_s (d - d'') = 4183,82 \text{ kN.cm}$		
		$F_{fibra_CG\ As} = 92,15 \text{ kN}$ $M_{fibra} = d' * F_{fibra} = (4,14 \times F_{fibra}) \text{ kN.cm}$		
$F_{fibra_CG\ As} = 92,15 \text{ kN}$		Momento Fletor em Relação ao Centro de Gravidade da região Comprimida do Concreto:		
$F_{fibra_CG\ Conc} = 92,15 \text{ kN}$		$M_{d,ref} = (M_s + M_s' + M_{fibra}) \text{ kN.cm}$ $M_s = F_s (d - 0,4x) = 22931,66 \text{ kN.cm}$		
$F_{fibra_CG\ As} - F_{fibra_CG\ Conc} = 0,00$ ← E185		$M_s' = F_s' (0,4x - d'') = 361,88 \text{ kN.cm}$		
		$M_{fibra} = (h - 0,4x) * F_{fibra} = (60,07 \times F_{fibra}) \text{ kN.cm}$		
$X_{resposta} = 22,33 \text{ cm}$				
$\epsilon_{fibra} = 7,13 \%$ ←				
$f_{fibra} = 162,514 \text{ kN/cm}^2$				
$F_{fibra} = 92,15 \text{ kN}$				

Fonte: Autor.

Por meio da figura 46, observa-se que a planilha desenvolve automaticamente o processo iterativo de obtenção do valor da posição da linha neutra x correto, além de fornecer os demais valores associados como das forças atuantes internamente na seção. Diante disso, verifica-se na imagem que o valor final da linha neutra x obtido é de 22,33 cm, um pouco maior que o valor de 22,10 cm obtido manualmente.

Destaca-se também que a fibra resistirá a uma força equivalente a 92,15 kN, valor maior também aos 88,12 kN do capítulo 3, e sofrerá uma deformação de 7,13% (valor próximo aos 7,107% obtido manualmente).

Dessa forma, se obteve um esforço resistente da seção não-reforçada $V_{sd} = 166,410$ kN, valor ligeiramente maior aos 165,59 kN que fora obtido manualmente.

Figura 48: Parte 1 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC preenchida.

Dimensionamento de Reforço ao Cisalhamento com Fibra de Carbono	
Preencher os dados somente nas células laranjas	
Os dados apresentados no dimensionamento do reforço à flexão com Fibra de Carbono permanecem sendo utilizados para o reforço ao Cisalhamento da Viga com Fibra de Carbono	
Cálculo do Esforço Resistente da Seção não-reforçada: V_{sd}	
$V_{sd} = V_c + V_{sw}$	
$(A_{sw}/s) =$	0,0317 cm ² /cm
$V_{sw} =$	80,383 kN
	Usando Modelo I que é mais Conservativo ! Para estribo vertical: $\alpha = 90^\circ$
$f_{ctd} =$	1,105 MPa
$V_c =$	86,027 kN
$V_{sd} =$	166,410 kN

Fonte: Autor.

Após isso, calculou-se o valor do esforço cortante resistido pelo reforço $V_{d,cfc}$. Como se observa na figura 49, nesse momento introduziu-se o valor do esforço cortante majorado solicitante de 195,929 kN na planilha. Considerando esses dados, a planilha fornece o valor de 126,93 kN como o valor resistido pela fibra de carbono a ser aplicada (valor abaixo do obtido manualmente de 127,895 kN). Além disso, a planilha fornece algumas informações, indicando que o uso dessa técnica de reforço com compósito de fibra de carbono se adequa a estrutura analisada.

Figura 49: Parte 2 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC preenchida.

Cálculo do Esforço Cortante Resistido pelo Reforço: $V_{d,cfc}$

$\Phi_{cfc} \cdot V_{d,cfc} + V_{sd} = V_{d,solic}$

Introduzir o Esforço Cortante Majorado: $V_{solic} =$ **195,929** kN

$\Phi_{cfc} =$ 0,85 Utiliza-se o coeficiente de segurança recomendado por Machado (2002) pela novidade do uso do método

$V_{d,cfc} =$ **126,930** kN **Valor do Esforço Cortante Resistido pelo Reforço !!**

Valor Máximo permitido para o Reforço resistir: **514,789** kN **ok! Valor adequado para o uso da técnica.**

Fonte: Autor.

Com o valor do esforço cortante resistido pelo material aferido, passa-se ao detalhamento desse reforço de fibra de carbono. A figura 50 expõe os resultados gerados pela planilha eletrônica nesse caso de dimensionamento. Destaca-se que são necessárias 2 camadas de aplicação do material, a largura das lâminas é pré-determinada e equivale a 15 cm, o espaçamento entre as lâminas calculado foi de 20,933 cm e que a área total de compósito de fibra de carbono é de 0,99 cm². Manualmente, foram obtidos resultados e valor muito semelhantes: 2 camadas de aplicação do material, largura pré-definida de 15 cm, espaçamento entre lâminas de 20,780 cm e área de fibra de carbono igual a 0,99 cm².

Figura 50: Parte 3 da planilha eletrônica de dimensionamento de reforço ao cisalhamento com CFC preenchida.

Detalhamento do Reforço de Fibra de Carbono

$(w_f/s_f) = \frac{V_d \cdot c_{fc}}{2 \cdot n \cdot t_f \cdot f_f \cdot d_f}$ Adota-se o uso da fibra na vertical !!
 $\beta = 90^\circ$

Número de Camadas: $n = 2$ camada(s) Recomenda-se adotar, inicialmente, 1 camada de reforço!!

$Le = \frac{L_o}{\sqrt{n}} = 3,889$ cm Onde, $L_o = 55$ mm

$df = d - hf = 64,87$ cm Onde hf corresponde a altura da mesa colaborante da seção transversal $hf = 0,00$ cm

$d_{fe} = df - Le = 60,98$ cm

$K_2 = \frac{d_{fe}}{df} = 0,940$

$K_1 = (f_{cd} / 27)^2 = 0,654$


$R = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot Le}{11900 \cdot \epsilon_{fu}} = 0,118 \leq 0,294$ OK! Considera-se para a deformação última da fibra de carbono $\epsilon_{fu} = 0,017$

$ff = R \cdot f_u = 41,377$ kN/cm² Onde a tensão última da fibra de carbono $f_u = 350$ kN/cm²

Assim, tem-se: $(w_f/s_f) = 0,717$ Pode-se utilizar lâminas de largura pré-determinada para manter o espaçamento conforme a relação. Adota-se $w_f = 15$ cm

Com isso, $s_f = 20,933$ cm ← Com $w_f = 15$ cm ↑

$A_{cfc} = 0,99$ cm² ←



Largura e espaçamento do CFC colado na viga

Fonte: Autor.

7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste tópico será apresentada a discussão dos resultados obtidos até aqui, através de suas análises, a partir dos estudos de casos expostos anteriormente no capítulo 3 (estudos de casos desenvolvidos manualmente de acordo com hipóteses básicas de dimensionamento) e no capítulo 6 (estudos de casos desenvolvidos pela planilha eletrônica confeccionada). O intuito desse capítulo consiste em analisar comparativamente os resultados obtidos nos estudos de casos desenvolvidos por métodos diferentes, verificando, assim, a eficiência da planilha eletrônica confeccionada e a veracidade dos valores alcançados por ela.

Primeiramente, é importante lembrar que os estudos de casos são baseados nos exemplos presentes no livro “Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono” do autor Ari de Paula Machado e possuem dois casos diferentes: dimensionamento de reforço de viga à flexão com cfc e dimensionamento de reforço de viga ao cisalhamento com o compósito.

Inicialmente, será analisado o dimensionamento de reforço da viga à flexão com compósito de fibra de carbono. Para o desenvolvimento manual desse reforço, inúmeras adoções foram necessárias para embasar os cálculos e posteriormente, os resultados fornecidos. Como a ideia era comparar os resultados obtidos pelos dois métodos, as mesmas adoções foram realizadas para o desenvolvimento pela planilha eletrônica. Entretanto, em virtude da configuração da planilha e dos campos disponíveis para alimentação pelos usuários, alguns valores destoaram e divergiram um pouco, o que pode explicar algumas diferenças de valores encontrados no final do dimensionamento. No capítulo 6, no qual foram apresentados os estudos de casos desenvolvidos pela planilha eletrônica, todas as diferenças entre os valores utilizados em cada método foram expostas detalhadamente.

Exemplificando esse ponto, tem-se o valor da armadura tracionada $A_s = 9,45 \text{ cm}^2$ adotada para uso no desenvolvimento manual, que diverge em $0,03 \text{ cm}^2$ do valor de $A_s = 9,42 \text{ cm}^2$ fornecido pela planilha eletrônica através da introdução, por parte do usuário, dos valores do diâmetro das barras e da quantidade das mesmas em cada camada da armadura tracionada. Essa pequena diferença entre os valores das áreas de armadura tracionada utilizadas em cada método gera uma diferença cumulativa nos resultados intermediários obtidos, e conseqüentemente, acarreta também em pequenas variações nos resultados finais alcançados.

Através desse exemplo também, é possível observar que a planilha eletrônica consiste em um método mais robusto e detalhado que o manual, pois, fornece resultados embasada em um maior número de dados (27 campos são alimentados pelo usuário na planilha de

dimensionamento de reforço à flexão) em relação ao método manual (16 dados foram adotados no dimensionamento de reforço à flexão) e com um grau de precisão maior nos cálculos já que os mesmos são realizados eletronicamente e, assim, todas as casas decimais de cada dado são utilizadas.

Comparando os resultados obtidos em cada método, tem-se que o momento da seção não-reforçada M_d obtido manualmente foi de 24151,68 kN.cm, valor ligeiramente maior ao valor de 23930,94 kN.cm obtido pela planilha. Como já citado, essa diferença se dá pela divergência de valores entre os dados utilizados. Entretanto, em qualquer método, foi comprovada a necessidade de implantação do reforço com fibra de carbono na viga.

Quanto a deformação devido a carga permanente da viga, os dois métodos utilizaram a mesma metodologia de cálculo. Assim, os resultados obtidos foram muito semelhantes: 0,189‰ para a deformação permanente obtida manualmente e 0,188‰ para a deformação obtida pela planilha eletrônica.

Por fim, analisa-se e compara-se os valores obtidos em cada método para o reforço necessário. Esse cálculo se dá por meio de um processo iterativo, no qual são adotados valores para a linha neutra x até se obter um equilíbrio na seção com o valor da força resistida pela fibra de carbono sendo idêntico em dois pontos de referência diferentes.

Por se tratar de um processo iterativo, torna-se muito repetitivo, extenso, demorado e impreciso de ser realizado manualmente. Já que parte do usuário a realização dos cálculos inúmeras vezes até se encontrar o valor exato da posição da linha neutra x que gera o equilíbrio da seção transversal e que fornece o valor exato da força a ser resistida pela fibra de carbono.

No estudo de caso desenvolvido manualmente, foram realizadas cinco tentativas diferentes até se alcançar um valor da posição da linha neutra x satisfatório para o dimensionamento. Tal valor alcançado foi de $x = 22,15$ cm com a força a ser resistida pela fibra de carbono igual a 85,31 kN para um ponto de referência e 88,12 kN para o outro ponto adotado. Como citado, a ideia era se alcançar um valor idêntico a ser resistido pela fibra de carbono nos dois pontos de referência, entretanto, como a diferença entre eles é menor que 3 kN, já se alcançou um nível de proximidade necessário para que reforço tenha um desempenho satisfatório.

Em contrapartida a todo esse processo iterativo, extenso, demorado e impreciso desenvolvido manualmente, que se originou a ideia do desenvolvimento da planilha eletrônica. A planilha fornece os resultados do dimensionamento de forma rápida, objetiva e precisa, já que o processo iterativo é realizado eletronicamente apenas com alguns comandos do usuário (conforme seu manual de uso já apresentado).

Com isso, tem-se que, para o estudo de caso desenvolvido pela planilha eletrônica, fora obtido o valor de 22,33 cm para a posição da linha neutra x e 92,15 kN para a força a ser resistida pelo compósito de fibra de carbono em menos de 5 minutos de dimensionamento e com alto grau de precisão nos valores alcançados. Diferentemente do desenvolvimento manual, que alcançou resultados inexatos ou apenas satisfatórios, em um tempo muito maior de dimensionamento.

Finalizando a análise do dimensionamento do reforço a flexão, destaca-se que o valor de deformação da fibra obtido pela planilha foi de 7,13‰, próximo aos 7,11‰ obtidos manualmente. E, além disso, a área necessária de fibra de carbono fornecida pela planilha é de 0,567 cm², com a aplicação de duas camadas do material, enquanto que a área de fibra de carbono obtida manualmente foi de 0,546 cm², também para duas camadas de aplicação do material.

Em suma, pode-se dizer que, quanto ao dimensionamento de reforço de viga de concreto armado à flexão com fibra de carbono, a planilha eletrônica se mostrou eficiente, apresentados resultados verídicos e precisos. De maneira geral, os métodos desenvolvidos manualmente e eletronicamente são muito semelhantes e geram resultados muito próximos. A grande diferença se dá no cálculo do reforço necessário, um processo iterativo, que torna clara a eficácia da planilha eletrônica que fornece resultados de forma rápida e mais precisa que o método manual.

Analisando, agora, o segundo estudo de caso quanto ao dimensionamento de reforço ao cisalhamento com fibra de carbono, tem-se, primeiramente, que se trata da mesma viga do estudo de caso anterior e, portanto, os dados e adoções realizadas permanecem sendo utilizadas.

Calculou-se, inicialmente, o esforço resistente da seção não-reforçada V_{sd} , equivalente a 166,41 kN para o método eletrônico e 165,59 kN para o método manual. Valores ligeiramente próximos, e que apresentaram pequenas divergências em virtude das pequenas diferenças entre os dados utilizados em cada método no reforço à flexão.

Da mesma maneira, os resultados obtidos para o esforço cortante resistido pelo reforço ($V_{d,cfc}$) foram muito próximos, 126,93 kN fornecido pela planilha e 127,895 kN conseguido manualmente.

Por fim, quanto a esse segundo estudo de caso, tem-se o detalhamento do reforço utilizado. Eletronicamente, obteve-se o valor de área total necessária do material de 0,99 cm², com lâminas de largura de 15 cm, espaçadas a cada 20,933 cm e com 2 camadas de aplicação. Manualmente, os valores também se apresentaram muito semelhantes, com a mesma área necessária, mesma largura, espaçamento de 20,780 cm e 2 camadas de aplicação.

Enfim, em síntese, tem-se que quanto ao dimensionamento de reforço de viga de concreto armado ao cisalhamento com fibra de carbono, a planilha eletrônica também se mostrou eficiente, apresentando resultados precisos e semelhantes ao método manual. Entretanto, como nesse caso não há processo iterativo no dimensionamento, a planilha não se configura como necessária já que o tempo dispendido nos dois métodos é semelhante, assim como, a precisão nos resultados alcançados.

Em contraparte, caso haja necessidade de dimensionamento de reforço para os dois casos (flexão e cisalhamento), o uso da planilha é sugerido, uma vez que a mesma se configura como um método muito eficaz para o reforço à flexão e faz uso dos dados fornecidos para esse caso no dimensionamento do reforço ao cisalhamento, fornecendo assim resultados precisos rapidamente.

8 CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS

Diante de tudo que fora visto durante a monografia, é possível concluir alguns aspectos e tecer alguns comentários finais acerca do tema abordado. A construção civil, como visto, é uma área de grande atuação da engenharia civil com inúmeras possibilidades de execução de obras e atuação de profissionais. A maior parte dessas obras citadas se faz através do uso do concreto armado como material base da construção.

O dimensionamento das estruturas de concreto armado leva em consideração todos os aspectos e propriedades de seus materiais constituintes, se baseando nas premissas do estado limite último, no qual a estrutura é dimensionada a partir das solicitações e deformações máximas que causariam sua ruína, garantindo assim, segurança, estabilidade e durabilidade da estrutura durante seu tempo de vida útil.

Diante da necessidade de adequação a esses pontos, como também aos aspectos relacionados ao estado limite de utilização da estrutura, faz-se necessária a atuação por parte dos profissionais quanto a manutenções preventivas da estrutura, com a verificação de possíveis danos e patologias que a mesma possa vir a apresentar, garantindo um desempenho satisfatório da estrutura.

Entretanto, mesmo com a realização de inspeções e manutenções por parte dos responsáveis pela construção, podem ocorrer ou surgir deteriorações na estrutura que comprometam seu desempenho durante a vida útil. Tendo em vista isso, há a necessidade de intervenções na estrutura que permitam garantir sua segurança e aptidão ao uso, como reparos, ou mesmo sua recuperação ou seu reforço.

Para a realização dessas intervenções, existem diversas técnicas e materiais adequados. Especificamente, quanto ao reforço de uma estrutura ou até sua recuperação, surgiu uma técnica inovadora, contrapondo as tradicionais armaduras de complementação ou adição de chapas metálicas, que é a aplicação de reforços com matérias poliméricos como compósitos de fibras de carbono.

A execução de reforços em estruturas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono se faz vantajosa quanto as técnicas tradicionais em virtude das características e propriedades desse material que permitem uma variada gama de opções de aplicação, a alta rigidez e resistência do sistema, a capacidade de manter sua configuração diante da ação de fatores externos, boa razão resistência/peso próprio em comparação as outras técnicas, facilidade de transporte e de aplicação e o baixo tempo de intervenção na estrutura.

Porém, do mesmo modo, os compósitos de fibra de carbono apresentam algumas desvantagens como, por exemplo, o alto custo de produção do material, o alto custo de aplicação nas estruturas, a complexidade e necessidade de ocorrência de uma aplicação perfeita na estrutura para que se atinja o desempenho esperado.

Além disso, o processo de dimensionamento de reforço estrutural de vigas à flexão com fibras de carbono trata-se de um processo complexo, dispendioso e impreciso, em virtude do processo iterativo presente no cálculo, que exige do projetista muito tempo e atenção.

Com isso em mente, fora desenvolvida a planilha eletrônica apresentada nesse trabalho que, como visto nos estudos de casos e na discussão de resultados, apresentou-se como uma ótima ferramenta de uso para o dimensionamento de reforço de vigas à flexão, pois tornou o processo de cálculo rápido, efetivo e mais preciso, uma vez que o processo iterativo fora realizado eletronicamente.

Desenvolveu-se também uma variação da planilha eletrônica para o dimensionamento de reforço de vigas ao cisalhamento com fibra de carbono que não se configurou como uma ferramenta tão vantajosa de uso pelo processo de cálculo manual se apresentar de maneira rápida, objetiva e precisa. Recomenda-se o uso dessa variação da planilha, nos casos em que haja necessidade de dimensionamento de reforço tanto à flexão como ao cisalhamento, pois a mesma torna o processo de cálculo integrado e eficaz.

Tem-se, portanto, em suma, que a planilha eletrônica desenvolvida se mostrou uma ótima ferramenta ao usuário para o processo de dimensionamento de reforço estrutural de vigas de concreto armado, principalmente quanto à flexão, gerando resultados precisos de forma rápida e clara. Além disso, ficou evidente a necessidade de atenção e cuidado por parte dos engenheiros quanto ao surgimento de patologias na estrutura e a garantia de segurança e aptidão de uso da edificação durante a vida útil da mesma. Como também, as vantagens e desvantagens que os compósitos de fibra de carbono apresentam em relação às técnicas tradicionais para uso em casos de intervenções necessárias.

Por fim, fica como sugestão para temas de outras monografias, o desenvolvimento de planilhas eletrônicas como ferramenta para o dimensionamento de reforços estruturais com fibras de carbono de outros elementos que não vigas de concreto armado, como por exemplo, pilares de concreto armado ou até estruturas metálicas, como também para vigas de concreto armado de seção “T”, as quais possuem a laje interligada a viga, trabalhando de forma monolítica.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto, procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**. Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – especificação. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1**. Materiais metálicos – ensaio de tração. Parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.
- ACI (American Concrete Institute). **Guide the design and construction of externally bonded FRP systems for streng-thening concrete structures**. ACI Committee 440.2R, 2008.
- ACI (American Concrete Institute). **State of the art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures**. ACI Committee 440, 1996.
- ADORNO, F. V; DIAS, F. O; SILVEIRA, J. C. O. **Recuperação e reforço de vigas de concreto armado**. 2015. 70 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2015.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. 3. ed, Porto Alegre: Dunas, 2010. v. 1, 295 p.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. 3. ed, Porto Alegre: Dunas, 2010. v. 2, 413 p.
- BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BRONZE, R. A. **Estudo comparativo: uso de sistema de fibras de carbono e sistema convencional para o reforço de estruturas de concreto**. 2016. 80 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, 2016.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. 4. ed. São Paulo: Pini, 1988. 523 p.
- CARVALHO R. C; RODRIGUES, J. F. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003**. 3. ed. São Carlos, EdUFSCar, 2009. 368 p.

DOMICIANO, A. K. B; PENA, E. A; MACHADO, E. R. **Análise crítica do reforço estrutural com polímero reforçado com fibra de carbono em pilares de concreto armado submetidas à compressão: estudo de caso.** São Paulo: Petra, 2016. 140 p.

HELENE, P; OLIVEIRA, P. S.F. **Recuperação de estruturas de concreto armado com armaduras corroídas: novas alternativas.** São Paulo: PINI, 1988. 470 p.

HELENE, P; ANDRADE, J. J. O; MEDEIROS, M. H. F. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.** In: Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 808 p.

HOLANDA, M. J. O. **Técnicas preventivas e de recuperação de estruturas de concreto.** 2015. 47 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2015.

HOLLAWAY, L. C. **Polymer composites for civil and structural engineering,** Glasgow, Blackie academic and professional, 1993. 410 p.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparos das estruturas de concreto.** 7. ed. Belo Horizonte: Atlas, 2008. 327 p.

MACHADO, A. P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono.** São Paulo: VIAPOL, 2010. 120 p.

MACHADO, A. P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono: características, dimensionamento e aplicação.** 4. ed. São Paulo: Pini, 2002. 271 p.

MACHADO, M. G. **Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibras de carbono.** 2004. 301 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

OLIVEIRA, D. F. **O conceito de qualidade aliado às patologias na Construção Civil.** 2013. 96 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, 2013.

PIANCASTELLI, E. M. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto armado:** Apostila para Curso de Extensão. Departamento Estruturas da Escola de Engenharia da UFRG, Belo Horizonte, 1998. 256 p.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado.** 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SILVEIRA, S. S. **Dimensionamento de vigas de concreto armado com chapas coladas com resina epóxi.** 1997. 114 f. Dissertação (Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, 1997.

SOUZA, V; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** 5. ed. São Paulo: Pini, 1998. 257 p.

TAYLOR, G. **Materials in construction**. 2nd ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994. 284 p.

UEDA, T; TAKEWAKA, K. **Performance-based standard specifications for maintenance and repair of concrete structures in japan**. v. 4. Tokyo: structural engineering international, 2007. 529 p.

ZUCCHI, F. L. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais**. 2015. 50 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, 2015.