

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DE REFORÇO DE VIGAS E LAJES COM COMPÓSITOS DE
FIBRA DE CARBONO COLADOS**

IGOR DE OLIVEIRA BORGES

ORIENTADOR: PAULO CHAVES DE REZENDE MARTINS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

ESTUDO DE REFORÇO DE VIGAS E LAJES COM COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO COLADOS

IGOR DE OLIVEIRA BORGES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

PAULO CHAVES DE REZENDE MARTINS, Dr. (ENC - UnB)
ORIENTADOR

MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA, Dr. (ENC - UnB)
EXAMINADOR INTERNO

DIOGO VIEIRA RESENDE
EXAMINADOR EXTERNO

FICHA CATALOGRÁFICA

BORGES, IGOR DE OLIVEIRA

Estudo de Reforço de vigas e lajes com Compósitos de Fibra de Carbono colados [Distrito Federal] 2016.

viii, 36p. 297mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Análise Estrutural

2. Concreto Armado

3. Flexão

4. Cisalhamento

5. Reforço com Fibra de Carbono

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BORGES, I.O. (2016). Estudo de Reforço de vigas e lajes com Compósitos de Fibra de Carbono colados. Monografia de Projeto Final.

Igor de Oliveira Borges

igor.ob93@gmail.com

70660-062 Brasília-DF

ÍNDICE

1.	Simbologia.....	6
2.	Introdução.....	9
2.1	Motivação	9
2.2	Objetivo.....	9
3.	Revisão Bibliográfica	10
3.1	Material.....	10
3.2	Histórico	12
3.3	Classificações e tipos de sistemas CFC disponíveis no mercado	12
	• Composto de fibra de carbono embutido	12
	• Composto de fibra de carbono aderido externamente.....	13
3.4	Processo Construtivo dos sistemas compostos	13
	• Recuperação do Substrato de Concreto	13
	• Preparação da Superfície.....	14
	• Aplicação de <i>primer</i>	15
	• Aplicação do compósito.....	15
	• Recomendações Construtivas Adicionais	18
3.5	Aplicações do CFC na construção civil	20
3.6	Métodos de dimensionamento	21
4.	Dimensionamento <i>fib</i> Boletim 14.....	24
4.1	Reforço à Flexão.....	24
	• Situação Inicial.....	24
	• Dimensionamento no ELU	25
	• Verificações no ELS	27
4.2	Reforço ao Cisalhamento.....	30
	• Dimensionamento no ELU	31
	• Verificação no ELS	32
5.	Dimensionamento ACI 440.2R-08	33
5.1	Reforço à Flexão.....	33

•	Dimensionamento no ELU	35
•	Verificações	36
•	Detalhes do reforço	37
5.2	Reforço ao Cisalhamento.....	37
•	Dimensionamento no ELU	37
•	Verificação no ELS	40
6.	Metodologia.....	41
7.	Estudos de Caso.....	43
7.1	Ginásio Bauvin	43
•	Resultados do dimensionamento.....	45
•	Observações	45
•	Análise Comparativa.....	46
7.2	Viga VD815 – Edifício BRS.....	48
•	Dados de entrada.....	49
•	Resultados do dimensionamento para a extremidade esquerda da viga	50
•	Resultados do dimensionamento para o meio da viga	51
•	Observações	51
•	Análise Comparativa.....	53
7.3	Abertura em laje – Edifício Monnet 4	53
•	Dados de entrada.....	54
•	Resultados do dimensionamento.....	55
•	Observações	55
•	Análise Comparativa.....	55
8.	Conclusão	57
8.1	Sugestão para trabalhos futuros	58
Anexos	56
•	Anexo I – Planilha de Cálculo –Boletim 14 da <i>fib</i>	56
•	Anexo II - Planilha de Cálculo – ACI-440-2R-08	57
9.	Referências Bibliográficas.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama comparativo Tensão vs. Deformação.....	10
Figura 2.2 - Ruptura frágil vs. dúctil da matriz.	11
Figura 2.3 - Lâminas, barras e tecido de PRFC.....	11
Figura 2.4 - Arredondamento de quina com politriz.	15
Figura 2.5 - Sistema de saturação in loco.....	16
Figura 2.6 - Ferramenta para aplicação de adesivo sobre lâmina.....	17
Figura 2.7 - Aplicação de lâmina pré-curada em viga de concreto	18
Figura 2.8 - Detalhe da especificação de “console” para arredondamento de quina.....	19
Figura 2.9 – Defasagem entre os comprimentos das camadas de CFC.....	19
Figura 2.10 – Representações gráficas dos diversos tipos de reforço	21
Figura 3.1 - Equilíbrio Situação Inicial	25
Figura 3.2 - Diagrama de tensão e deformação para o ELU	26
Figura 3.3 - Análise elástica linear da seção fissurada	27
Figura 3.4 - Determinação de l_b	30
Figura 3.5 - Configurações de reforço ao cisalhamento. A) Confinamento contínuo, B) Tiras ancoradas, C) Tiras ou confinamento aberto.....	31
Figura 4.1-Deformação e equilíbrio de forças em seção de viga retangular reforçada..	35
Figura 4.2 - Ilustração dos parâmetros geométricos.....	38
Figura 6.1 - Viga de seção variável	43
Figura 6.2 - Representação das fissuras observadas in-loco	44
Figura 6.3 - Representação 3D do reforço da viga	47
Figura 6.4 - Parte da planta de formas do 8º pavimento do edifício BRS.....	48
Figura 6.5 - Reforço em barras de aço coladas.....	49
Figura 6.6 - Reforço em CFC da viga VD815.....	52
Figura 6.7 - Modelagem TQS - Laje com abertura	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Padrão de tolerância - <i>fib</i>	14
Tabela 4.1 - Condições de exposição – ACI 440.2R-08	34
Tabela 5.1 - Comparação das diretrizes de dimensionamento	42
Tabela 6.1 - Resultados Ginásio Bauvin	45
Tabela 6.2 - Esquerda do vão – Viga VD815.....	50
Tabela 6.3 - Meio do vão – Viga VD815	51
Tabela 6.4 - Resultado Monnet 4.....	55

SIMBOLOGIA

SIMBOLOGIA ACI

A_f = área de CFC externamente aderido (mm²)

$A_{fanchor}$ = área de tecido transversal de PRF em U para ancoragem do CFC de reforço à flexão

A_s = área de aço não protendido (mm²)

CE = fator de redução devido às condições ambientais

c = distância da linha neutra até a fibra comprimida mais afastada (mm)

d = distância da fibra comprimida mais afastada até o centroide do diagrama de tensões (mm)

df = altura útil para o CFC de reforço à flexão (mm)

dfv = altura útil para o reforço ao cisalhamento (mm)

Ec = módulo de elasticidade tangente do concreto (MPa)

Ef = módulo de elasticidade do PRF (MPa)

Es = módulo de elasticidade do aço (MPa)

fc = esforço de compressão no concreto (MPa)

fc' = resistência característica do concreto (MPa)

ff = tensão no reforço de CFC (MPa)

ffd = tensão de cálculo do CFC externamente colado (MPa)

ffe = tensão efetiva no CFC atingida na ruptura da seção (MPa)

ffu = tensão no CFC no estado limite último (MPa)

ffu^* = resistência última do CFC informada pelo fabricante (MPa)

fs = tensão no aço não protendido (MPa)

fy = tensão característica de escoamento do aço não protendido (MPa)

h = altura total da peça (mm)

Icr = momento de inércia da seção fissurada (mm⁴)

$k1$ = coeficiente de modificação referente à resistência do concreto para determinação de κv .

$k2$ = coeficiente de modificação referente ao esquema de envolvimento pelo tecido

de PRF para determinação de κv

Le = comprimento ativo de colagem do laminado CFC (mm)

ldb = comprimento de ancoragem da barra de PRF usada como reforço NSM (mm)

ldf = comprimento de ancoragem do CFC (mm)

Mcr = momento de fissuração (N.mm)

Mn = momento fletor nominal (N.mm)

Ms = momento fletor de serviço (N.mm)

Mu = momento fletor último (N.mm)

n = número de camadas de CFC

nf = razão modular entre a elasticidade do CFC e do concreto = Ef/Ec

ns = razão modular entre a elasticidade do aço e do concreto = Es/Ec

Rn = resistência nominal da peça

SDL = esforço devido ao carregamento permanente

SLL = esforço devido ao carregamento variável

tf = espessura da camada de CFC (mm)

Vc = resistência nominal ao cisalhamento proporcionada pelo concreto (N)

Vf = resistência nominal ao cisalhamento proporcionada pelo reforço transversal de PRF (N)

Vn = tensão nominal cisalhante (N)

Vs = resistência nominal ao cisalhamento proporcionada pelo aço (N)

wf = largura das tiras de reforço PRF (mm)

$\alpha 1$ = coeficiente referente ao fc para determinar a intensidade de uma distribuição retangular equivalente de tensões no concreto

$\beta 1$ = razão entre a profundidade do retângulo equivalente de distribuição de tensões e a profundidade da linha neutra

ϵ_b = deformação do substrato de concreto ocasionada por determinado momento fletor (mm/mm)

ϵ_{bi} = deformação do substrato de concreto no momento da aplicação do CFC (mm/mm)

ϵ_c = deformação do concreto comprimido (mm/mm)

ε_c' = limite máximo de deformação do concreto comprimido sem confinamento correspondendo ao f_c' , (mm/mm); pode ser definido como 0.002.
 ε_{cu} = deformação axial última do concreto correspondente $0.85f_c'$ ou igual a 0,003, dependendo da curva tensão-deformação obtida
 ε_f = deformação no CFC (mm/mm)
 ε_{fd} = deformação de descolamento do CFC externamente aderido (mm/mm)
 ε_{fe} = deformação efetiva do CFC atingida na ruptura (mm/mm)
 ε_{fu} = deformação de cálculo do CFC (mm/mm)
 ε_{fu}^* = deformação última na ruptura do CFC (mm/mm)
 ε_s = deformação do aço não protendido (mm/mm)
 ε_{sy} = deformação correspondente ao escoamento do aço não protendido (mm/mm)
 \emptyset = coeficiente de redução da resistência
 κ_v = coeficiente dependente da colagem para o cisalhamento
 ρ_f = taxa de reforço CFC
 ρ_s = taxa de armadura de aço
 ψ_f = coeficiente de redução da resistência do CFC

SIMBOLOGIA FIB

A_c - área de concreto da seção
 A_f - área da seção transversal de CFC
 A_s - área total de seção transversal de aço longitudinal
 A_{s1} - área de aço tracionado
 A_{s2} - área de aço comprimido
 E_c - módulo de elasticidade tangente do concreto
 E_f - módulo de elasticidade do CFC
 E_{fu} - módulo de elasticidade último do CFC
 E_s - módulo de elasticidade do aço
 I_c - momento de inércia da seção fissurada
 I_{o2} - momento de inércia da seção fissurada antes do carregamento

L - distância entre o fim do reforço em CFC ao apoio
 M_{cr} - momento de fissuração
 M_d - momento de cálculo
 M_k - valor característico do momento
 M_o - momento atuante durante o carregamento
 MR_d - momento resistente de cálculo
 N_c - esforço normal no concreto
 N_f - esforço normal uniforme no CFC
 N_{fd} - valor de cálculo do esforço normal no CFC
 N_{sd} - valor de cálculo da força no aço
 N_{s1} - força de tração no aço
 N_{s2} - força de compressão no aço
 V_{cd} - capacidade resistente de cálculo do concreto
 V_d - valor de cálculo do esforço cisalhante
 V_{fd} - valor de cálculo do esforço cisalhante resistido pelo tecido de PRF
 VR_d - capacidade resistente de cálculo ao cisalhamento
 VR_{d1} - capacidade resistente de cálculo ao cisalhamento sem reforço
 VR_{d2} - valor de cálculo de esforço cisalhante que pode ser suportado sem a ruptura da peça
 V_{sd} - valor de cálculo do esforço cisalhante
 V_{wd} - contribuição dos estribos de aço na capacidade resistente ao cisalhamento
 a - deflexão ou deslocamento do diagrama devido ao esforço cisalhante
 b - largura da viga
 b_f - largura do CFC
 d - altura útil da peça
 $d1$ - distancia entre o centro de massa das seções de aço tracionado até a fibra tracionada mais afastada
 $d2$ - distancia entre o centro de massa das seções de aço comprimido até a fibra comprimida mais afastada
 f_{cdb} - resistência de cálculo ao cisalhamento do concreto referente à colagem
 f_{ck} - valor característico da resistência à compressão do concreto
 f_{ctd} - valor de cálculo da resistência à tração do concreto
 f_{cu} - resistência última do concreto

f_f - resistência à tração do CFC
 f_{fd} - valor de cálculo da resistência à tração do CFC
 f_y - tensão de escoamento do aço
 f_{yd} - valor de cálculo da tensão de escoamento do aço
 f_{yk} - valor característico da tensão de escoamento do aço
 h - altura total da peça
 $l_{b,max}$ - comprimento de ancoragem máximo
 s_f - espaçamento relativo entre as tiras de PRF
 $sf_{,max}$ - espaçamento relativo entre as tiras de PRF
 t_f - espessura do CFC
 x - profundidade da linha neutra
 x_e - profundidade da linha neutra em análise estática linear sob carregamento de serviço
 x_{lim} - valor limite da profundidade da linha neutra
 x_0 - altura da linha neutra antes do carregamento
 γ_c - fator de segurança de redução da resistência do concreto
 γ_f - fator de segurança de redução da resistência do PRF
 γ_{fb} - fator de segurança para o controle do descolamento do PRF
 γ_s - fator de segurança de redução da resistência do aço
 ε - deformação

ε_c - deformação do concreto em sua fibra mais afastada, ou deformação axial do concreto
 ε_{c0} - deformação inicial do concreto em sua fibra comprimida mais afastada
 ε_{cu} - deformação última do concreto
 ε_f - deformação do CFC
 $\varepsilon_{fd,e}$ - valor de cálculo da deformação efetiva do CFC
 $\varepsilon_{f,e}$ - deformação efetiva do CFC
 $\varepsilon_{f,lim}$ - deformação limite do CFC
 ε_{fu} - deformação última do CFC
 ε_{fud} - valor de cálculo da deformação última do CFC
 ε_{su} - deformação última do aço
 ε_{s1} - deformação do aço tracionado
 ε_{s2} - deformação do aço comprimido
 ε_{yd} - valor de cálculo da deformação de escoamento do aço
 ε_{yk} - valor característico da deformação de escoamento do aço
 ε_0 - deformação inicial da fibra tracionada mais afastada
 ρ_f - taxa de reforço de CFC
 ρ_s - taxa de aço
 σ - tensão
 σ_c - tensão no concreto
 σ_f - tensão no CFC
 σ_{fd} - tensão de cálculo no CFC
 σ_{fk} - tensão característica no CFC
 σ_s - tensão no aço

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Estruturas de concreto armado podem precisar de reforço por diversos motivos: seja porque atingiram sua vida útil e necessitam de manutenção; porque a destinação de sua utilização será alterada e seus elementos deverão passar a resistir a esforços maiores; pela criação de aberturas em lajes e paredes; por problemas de fluência do concreto; fissuração e/ou deformação excessivas da estrutura; ou ainda, por anomalias ou falhas de concepção ou realização que implicam na redução da capacidade portante da estrutura, exigindo correções.

Ao longo da história recente da engenharia diversos métodos de reforço foram desenvolvidos e vêm sendo empregados, tais como: introdução de apoios extras para diminuir o vão de flexão; aumento da seção transversal com adição de aço e concreto; aplicação de protensão externa; aplicação de chapas de aço na superfície do concreto, entre outros. De forma alternativa a esses sistemas tradicionais de reforço, surgiram os polímeros reforçados com fibra (PRF). São alguns deles, o polímero reforçado com fibra contínua de aramida (PRFA), cujos nomes comerciais mais conhecidos são Kevla e Nomex, de vidro (PRFV) e o de carbono (PRFC), objeto do presente estudo e que apresenta a maior resistência à tração entre os citados. São utilizados para técnicas de reforço, embutidos ou colados na superfície do concreto. [KRAUS, 2014]

Apresentando diversas vantagens construtivas como leveza, alta resistência e fácil aplicação, essa técnica vem sendo amplamente utilizadas em pontes, viadutos, silos, edifícios e para reforço de pilares, lajes e vigas, ao cisalhamento e à flexão.

A realização deste trabalho é motivada pelo crescimento da necessidade de reforços estruturais e pelo grande potencial de utilização dos compósitos de fibra de carbono (CFC) como solução.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo apresentar e estudar os Sistemas Compostos Estruturados com Fibras de Carbono (CFC), apresentar as premissas de seu dimensionamento e detalhar os procedimentos para a sua aplicação como reforço estrutural de vigas e lajes submetidas ao cisalhamento e à flexão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Material

As fibras de carbono são produto de um processo de oxidação de fibras orgânicas precursoras, tais como o poliácridonitril ou com base no alcatrão derivado do petróleo o do carvão, seguido do processamento em ambiente inerte a elevadas temperaturas, cerca de 1500°C, pelo qual o polímero torna-se muito fino e dá origem à fibra carbono. Quando esse processamento ocorre sob temperaturas próximas a 3000°C, são obtidas fibras de grafite.

O produto final apresenta elevadíssima resistência mecânica devido ao alinhamento dos átomos de carbono ao longo da fibra precursora que ocorre durante o processo térmico.

O módulo de elasticidade do material resultante varia de 100GPa a 300GPa para as fibras de carbono, até 650 GPa, para as fibras de grafite. Quanto maior o módulo de elasticidade, mais caro o material, sendo a fibra de grafite cerca de 15 a 20 vezes mais cara que a fibra de carbono.

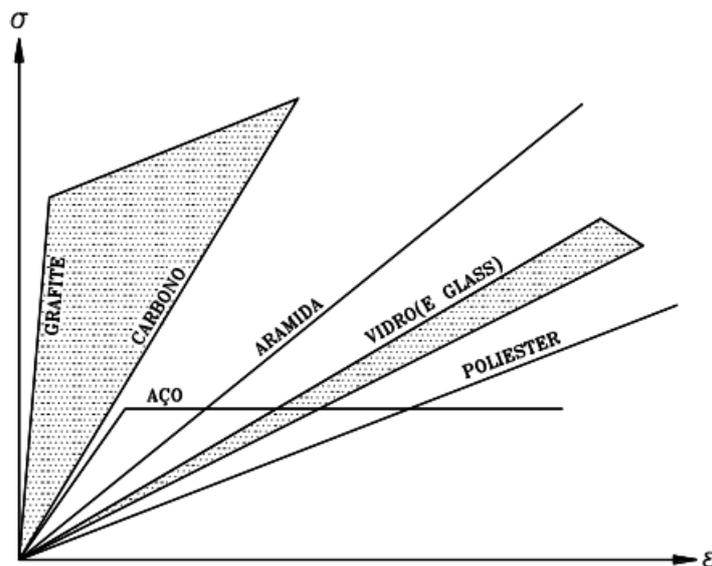


Figura 2.1 - Diagrama comparativo Tensão vs. Deformação

Os sistemas compostos estruturados que utilizam as fibras de carbono como elemento resistente apresentam diversas vantagens provenientes das seguintes características:

- Extraordinária resistência mecânica aos esforços de tração ($f_{fk} = 2800MPa$).
- Extraordinária rigidez frente aos esforços axiais de tração.

- Bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas.
- É um material inerte e que, portanto apresenta elevada resistência a ataques químicos, não sofre corrosão e possui estabilidade térmica e reológica.
- Baixo peso específico, $1,6 \text{ g/cm}^3$ (cerca de 5 vezes mais leve que o aço).
- Coeficiente de dilatação térmica na direção longitudinal da fibra $-10^{-6}/^\circ\text{C}$ (10 vezes menos que o do concreto).

O compósito estruturado com fibra de carbono, CFC, é construído com dois elementos distintos e fundamentais:

- **Matriz polimérica** que deve apresentar ruptura dúctil com um alongamento muito maior que o da fibra de carbono para cumprir com a sua função de manter a coesão entre as fibras e o substrato de concreto, propiciando a transferência das tensões cisalhantes entre os dois elementos estruturais. O material mais comumente utilizado para tal aderência é um adesivo à base de resina epóxi. Suas variações serão apresentadas mais à frente neste estudo.
- As **fibras de carbono**, que podem ser encontradas nos formatos de placas (lâminas), tecidos e barras dispostas unidirecionalmente absorvendo as tensões de tração decorrentes da atuação de esforços solicitantes. [MACHADO, 2006]

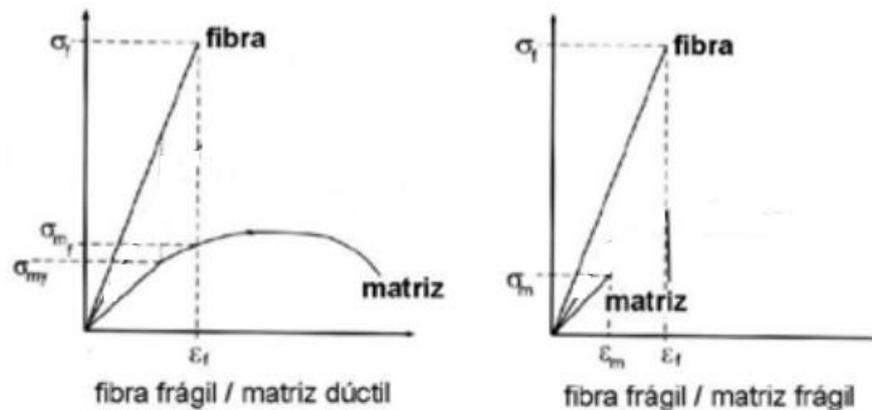


Figura 2.2 - Ruptura frágil vs. dúctil da matriz.



Figura 2.3 - Lâminas, barras e tecido de PRFC

2.2 Histórico

A tecnologia que utiliza o sistema CFC para reforços de estruturas de concreto armado, até mesmo em fases construtivas, com utilização prevista em projeto, foi desenvolvida na Suíça, nos anos 1980. Surgiu como alternativa ao tradicional reforço com placas de aço externamente coladas ou parafusadas, e levou pelo menos 20 anos para sair dos laboratórios de pesquisa e ganhar o mercado. Hoje está consolidada nos canteiros de obras europeus, japoneses, onde foi pela primeira vez usada para o reforço de pilares por confinamento, assim como nos Estados Unidos e Canadá, onde é largamente utilizada para manutenção, reforço e construção de pontes e viadutos. Seu uso é aprovado e normatizado em mais de 15 países e permite o reforço das mais variadas estruturas: vigas, lajes, pilares, paredes, juntas, chaminés, silos, domos, túneis e canos. A tecnologia é também utilizada na substituição da armadura de aço por barras de fibra de carbono. No entanto, é uma técnica quase exclusiva das estruturas para ambientes em que ocorram fenômenos como a ressonância magnética, casos em que o emprego do aço é inadmissível [SOUZA, 1998].

No Brasil, a tecnologia demorou a chegar e ainda é usada muito timidamente, sobretudo pela falta de uma norma técnica nacional. Quando utilizada aqui, as referências são principalmente as normas técnicas norte-americanas [ACI 440 2R:02 2008] e o boletim 14 da *fib* (Federação Internacional do Concreto). No ano de 2015 a ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural) estimulou um comitê na ABNT a estudar a criação de uma NBR sobre aplicação de fibra de carbono em estruturas de concreto armado.

2.3 Classificações e tipos de sistemas CFC disponíveis no mercado

- **Composto de fibra de carbono embutido**

Denominada como NSM (*Near Surface Mounted*) trata-se de uma técnica de reforço ou fortalecimento da estrutura de concreto armado por meio da colagem de lâminas ou barras de fibra de carbono em entalhes feitos no cobrimento da estrutura. Ao contrário de outras aplicações, a instalação do sistema NSM em concreto fissurado ou ligeiramente danificado é possível e independente da resistência à tração da superfície do concreto.

Essa técnica foi criada para evitar o descolamento ou destacamento da superfície de concreto, que acaba levando à ruptura prematura. Esse aspecto observado por vários pesquisadores é apontado como principal ponto negativo da utilização do CFC. A ruptura de vigas reforçadas, causada pelos problemas de ancoragem dos laminados de fibra carbono, indica que os métodos de dimensionamento normalmente utilizados estão

superestimando sua capacidade com o detalhamento utilizado. As cargas últimas verificadas experimentalmente alcançaram em média 78% das cargas estimadas para vigas reforçadas ao cisalhamento [SALLES NETO M. 2000]. Além da aplicação em concreto, o sistema NSM também pode ser usado para estruturas de madeira e de alvenaria. Outra de suas vantagens é diminuir a possibilidade de vandalismo ou dano no reforço aplicado.

Sua aplicação é feita após preparação do substrato e corte de sulcos cuja profundidade depende das dimensões do composto de fibra carbono a ser inserido e cuja execução deve ser feita levando em conta a profundidade na qual se encontram armaduras, tubulações e outros materiais no interior do concreto. Após a aplicação feita com um adesivo que garante a aderência entre o composto e o substrato, pode ou não ocorrer a execução de uma camada adicional de revestimento.

- **Composto de fibra de carbono aderido externamente**

Denominado como EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), esse tipo de composto, por sua vez, é simplesmente colado na superfície previamente preparada do substrato de concreto e possui uma enorme variedade de classificações em relação a como são entregues no local e como são instaladas: lâminas, tecidos, cabos, saturados via úmida, saturados via seca, pré-saturados, curados in loco ou pré-curados. Tais classificações serão melhor explicadas no item 2.4, onde serão diferenciadas as formas de recebimento e aplicação do composto. A escolha do tipo de sistema a ser empregado deve ser baseada na viabilidade da transferência de esforços para o reforço e na facilidade e simplicidade de aplicação [ACI 440.2R-2].

2.4 Processo Construtivo dos sistemas compostos

Os procedimentos de instalação dos compósitos podem variar de acordo com o sistema adotado e com o tipo e condições da estrutura na qual será aplicado. Os fabricantes ao longo do tempo desenvolveram sistemas de instalação e fornecem em seus manuais, procedimentos e especificações para a utilização do CFC como reforço de estruturas. Neste tópico serão apresentadas linhas gerais para a correta instalação de lâminas e tecidos de compostos de fibra carbono em estruturas de concreto armado.

- **Recuperação do Substrato de Concreto**

Para qualquer procedimento de reforço, se adotado como medida corretiva quando a estrutura já apresenta patologias, é fundamental promover reparos para garantir um substrato íntegro e são, que disponha de suficiente resistência mecânica para promover a transferência dos esforços da estrutura para o reforço e de boa aderência da superfície para, no caso de reforços colados, impedir que a ruptura ocorra na interface entre o reforço e o substrato.

Uma das manifestações patológicas mais frequentes e que exige correção quando se for efetuar o reforço é a corrosão das armaduras. Após identificar as causas do

fenômeno de corrosão e impedir que este volte a ocorrer, a sequência de procedimentos para o reparo em caso de corrosão é a seguinte:

- remoção do concreto desagregado junto às armaduras corroídas;
- limpeza da corrosão das barras da armadura;
- passivação das armaduras;
- recomposição do substrato de concreto.

Outra manifestação patológica frequente que, mesmo tendo, às vezes, apenas cunho estético, deve ser corrigida para posterior aplicação do reforço, é a presença de trincas e fissuras na peça estrutural. Todas as trincas e fissuras com aberturas maiores que 0,25mm devem ser recuperadas com procedimentos convencionais de injeção.

• Preparação da Superfície

A preparação da superfície para o recebimento do sistema composto é determinada em função do princípio de funcionamento estrutural que se deseja que ocorra. As aplicações com o objetivo de reforçar resistências à flexão e ao cisalhamento normalmente caracterizam uma *condição crítica de colagem*, logo, deve-se garantir um bom sistema de colagem para que seja possível uma boa transferência de esforços da peça estrutural para o reforço. Para esse bom funcionamento do sistema de colagem, a superfície deve ser limpa, nivelada e preparada para apresentar boas condições de aderência por procedimentos como:

-utilização de abrasivos ou jatos de areia ou lixamento com limalhas metálicas, promovendo assim um nivelamento e uma limpeza que remova poeira, pó, substâncias oleosas ou graxas, partículas sólidas e os recobrimentos como pintura e argamassas. Para superfícies pequenas, podem ser utilizadas politrizes com aspirador integrado.

É recomendada a verificação do nivelamento da superfície. O padrão da fib Boletim 14 estabelece os seguintes limites de tolerância:

Padrão	<i>fib Bulletin 14</i>
Tolerância para 2 m de comprimento	10 mm
Tolerância para 0,3 m de comprimento	4 mm

Tabela 2.1 - Padrão de tolerância - *fib*

Recomenda-se, ainda, que este nivelamento/lixamento ocorra imediatamente antes da instalação do sistema de reforço, para que a superfície não corra o risco de ser contaminada ou suja novamente.

- no caso em que o composto recubra mais de uma superfície pode ser necessário o arredondamento de quinas ou cantos com raio mínimo de 10mm para evitar a concentração de tensões na fibra e o aparecimento de vazios por deficiência na colagem. Esse arredondamento pode ser feito com a utilização de politriz no caso de quinas, como mostrado na figura 2.4 ou com a aplicação de massa regularizadora com acabamento lixado no caso de cantos convexos.

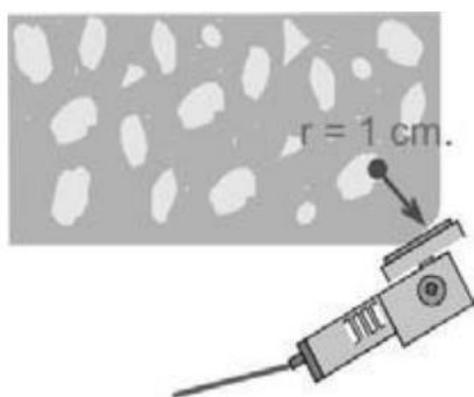


Figura 2.4 - Arredondamento de quina com politriz.

- **Aplicação de *primer***

Uma demão de *primer* pode ser aplicada na superfície preparada do substrato com a função de impregnar o concreto, consolidando as partículas soltas e impedindo que a porosidade do concreto absorva a água que pode conter as resinas, garantindo assim boas condições para a colagem das folhas, tecidos ou lâminas.

- **Aplicação do compósito**

A colação do CFC deve ser imediata, visto que o tempo para aplicação (*pot-life*) da resina saturante ou do adesivo (para sistemas pré-curados) é muito curto, no máximo 25 a 30 minutos. Vale ressaltar que este intervalo de tempo varia conforme a temperatura ambiente, sendo menor a temperaturas mais elevadas.

A ACI estabelece um limite máximo de desalinhamento entre o sentido das fibras de carbono e o eixo da peça estrutural (seja ele longitudinal, para o reforço à flexão, ou transversal, para o reforço ao cisalhamento). Este desvio na inclinação é aceitável quando for menor que 5°.

A partir dessa etapa os procedimentos se diferenciam de acordo com o tipo de compósito de fibra de carbono a ser utilizado. As alternativas aqui contempladas serão a saturação *in loco* via úmida, saturação *in loco* via seca, e sistemas pré-curados.

- Saturação via úmida

Após o corte das lâminas ou das folhas de fibra carbono, passa-se para o procedimento de aderência à peça de concreto. Nessa alternativa a impregnação das fibras com resina (ou saturante) é feita em bancada própria e depois transportada para aplicação na peça a ser reforçada. A prática demonstra que esse tipo de aplicação é de fácil execução e pouco trabalhosa. No entanto, existem limitações no transporte da lâmina saturada, cujo comprimento não deve ultrapassar 3,5m a 4,0m.

- Saturação via seca

Nessa alternativa a saturação (aplicação da resina) é feita diretamente sobre o concreto para em seguida ser aplicada a lâmina de fibra carbono. A aplicação é feita com a utilização de rolo metálico ou espátula que servem para promover o alinhamento das fibras e a expulsão de bolhas de ar aprisionadas. O reposicionamento da lâmina é possível em até 25 a 30 minutos, tempo de aplicação da resina. Uma vez aplicada a lâmina de fibra carbono deve-se esperar em torno de 30 minutos para se proceder a uma segunda saturação, por sobre a lâmina instalada, de modo a garantir que as fibras estejam completamente imersas em resina. Caso sejam necessárias diversas camadas de lâminas, repetem-se os procedimentos de saturação, respeitando os períodos de cura e aplicam-se as lâminas uma sobre as outras. Uma importante observação é que cada lâmina requer duas camadas de resina independentes, não podendo a última camada da lâmina anterior ser considerada a de aplicação da próxima.



Figura 2.5 - Sistema de saturação in loco

- Sistema pré-curado

Sistemas pré-curados, como definido pela norma da ACI, são os produtos fabricados por meio de processos de pultrusão, ou seja, de prensagem a quente. Esses compósitos pré-fabricados apresentam-se no mercado na forma de laminados, barras, cabos e tecidos e são tipicamente instalados com um adesivo (base epóxi)

que deve ser uniformemente espalhado na superfície do substrato já imprimado¹. A aplicação é também feita com a utilização de rolos metálicos. O compósito de fibra carbono pré-curado deve ser previamente limpo e preparado de acordo com as especificações do fabricante. A SIKA, fabricante destes produtos no mundo todo, por exemplo, especifica a limpeza com um produto a base de isopropanol espalhado com um pano até não haver mais sinais de pó de carbono negro no pano. Existem aparatos que facilitam a aplicação uniforme do adesivo nas lâminas. Sua utilização é recomendada quando for necessário instalar diversas lâminas.



Figura 2.6 - Ferramenta para aplicação de adesivo sobre lâmina

¹ Imprimação é o termo utilizado no meio prático para se referir à aplicação do primer, que tem a função de impregnar e preparar o concreto para receber o material do reforço.



Figura 2.7 - Aplicação de lâmina pré-curada em viga de concreto

Quando se tem a aplicação de laminados pré-fabricados, cuidados especiais devem ser tomados devido face à rigidez e à magnitude de esforços que se observam nesses compósitos mais espessos e, portanto, com maior quantidade de fibras. Quando houver o cruzamento de laminados o posicionamento das fibras e espessura do adesivo devem ser levados em consideração na determinação do comprimento do braço de alavanca para dimensionamento. Além disso, a utilização e experiência referentes ao uso desse tipo de compósito mostram necessidade de uma ancoragem adicional para garantir que não se tenha a delaminação ou descolamento do compósito.

- **Recomendações Construtivas Adicionais**

Existem algumas precauções que devem ser tomadas de modo que as condições de aderência e transferência de esforços entre as interfaces sejam garantidas.

Mesmo em arestas internas, o arredondamento da quina deve ser efetuado para que a aderência do sistema seja contínua ao longo das superfícies de concreto, assim como o fluxo de esforços ao longo das fibras de carbono.

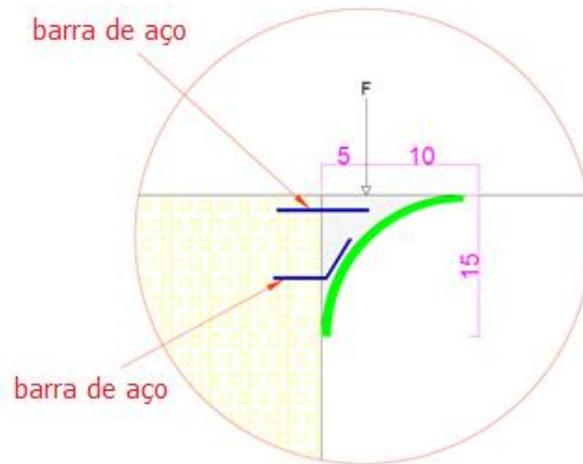


Figura 2.8 - Detalhe da especificação de “console” para arredondamento de quina

A prática tem mostrado que, quando forem feitas emendas entre lâminas de reforço relativamente longas e/ou haja uma ondulação sensível da superfície do substrato, deve-se especificar um trespasse entre as lâminas emendadas de no mínimo 10cm (5cm a mais que o recomendado por normas).

Quando são especificadas mais de uma camada de CFC, normalmente para o reforço de vigas, é importante, por questões econômicas e mecânicas que ocorra a defasagem entre os comprimentos das camadas, lembrando que a camada mais externa é sempre menor que a anterior.

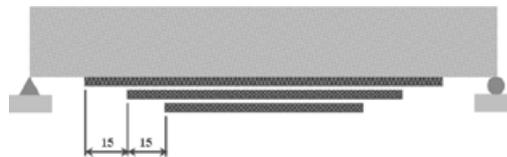
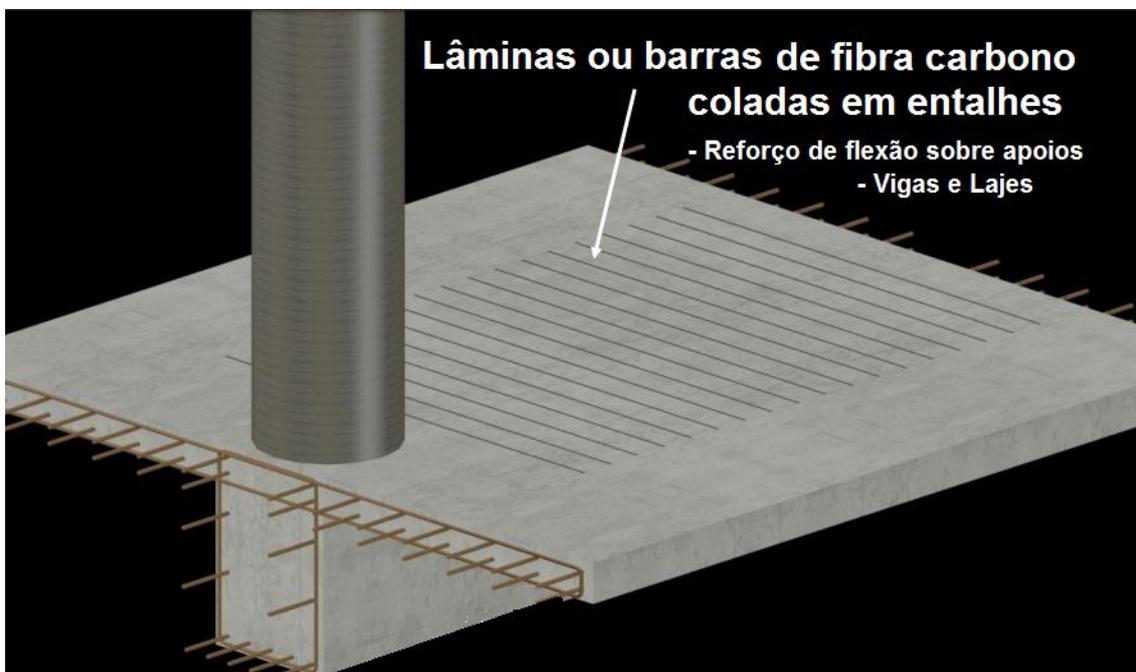


Figura 2.9 – Defasagem entre os comprimentos das camadas de CFC

2.5 Aplicações do CFC na construção civil

Os dois tipos de sistema CFC citados acima (NSM e aderidos externamente) são aplicáveis como reforço estrutural em qualquer situação em que exista, nas estruturas de concreto, uma falta de aço tracionado. Suas utilizações mais corriqueiras são:

- Reforço à flexão na superfície inferior de lajes e vigas;
- Reforço à flexão (na região dos apoios, balanços e varandas) na superfície superior de lajes e vigas;
- Reforço de lajes e paredes quando há aberturas não previstas em projeto (aberturas, furos, portas, janelas);
- Reforço ao cisalhamento em vigas;
- Reforço de pilares por confinamento;
- Controle de deformação.



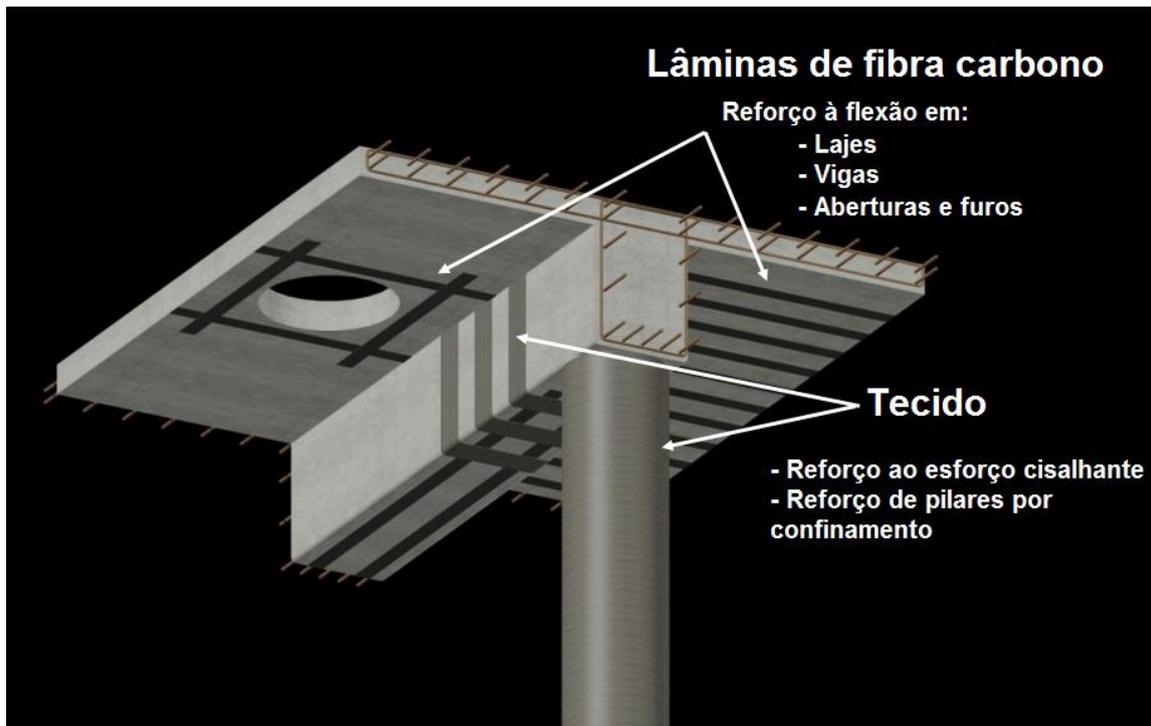


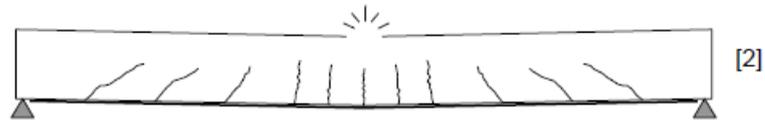
Figura 2.10 – Representações gráficas dos diversos tipos de reforço

2.6 Métodos de dimensionamento

As diretrizes básicas para o projeto de reforço com compósitos de fibra de carbono seguem os mesmos princípios do projeto de estruturas convencionais de concreto armado, dadas as devidas particularidades do material, já apontadas previamente e uma atenção especial para o projeto de ancoragem. O comportamento de reforços com CFC é similar ao comportamento de elementos estruturais reforçados com chapa de aço colada [BEBER, 2003].

Antes de serem apresentados os métodos de cálculo para o dimensionamento e as diretrizes para o correto detalhamento do projeto de reforço com CFC, é importante apresentar os modos de ruptura de uma peça reforçada, para que se tenha em mente os eventuais problemas que devem ser solucionados com uma correta especificação em projeto e a devida execução da aplicação. Os modos de ruptura são vários e, de forma geral, podem ser divididos em 4 categorias:

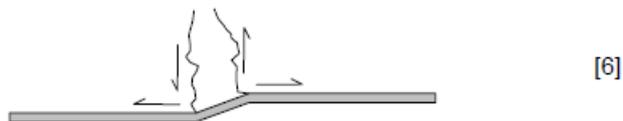
- Ruptura clássica da peça fletida de concreto armado:
 - 1 - Deformação plástica excessiva da armadura longitudinal e ruptura do reforço à tração.
 - 2 - Esmagamento do concreto.
 - 3 - Colapso da viga por cisalhamento.



- Efeitos de extremidade:
 - 4 - Arrancamento da camada de concreto junto à armadura longitudinal
 - 5 - Destacamento do compósito nas extremidades (*end-peeling*).



- Destacamento do reforço:
 - 6 - Destacamento do compósito devido à fissuração de cisalhamento (*shear-peeling ou sudden peel-off*).
 - 7 - Destacamento do compósito devido à fissuração de flexão (*continous peel-off*).
 - 8 - Destacamento do compósito devido a irregularidades da superfície.



- Inerentes ao compósito:
 - 9 - Ruptura do adesivo na interface adesivo/compósito.
 - 10 - Ruptura do adesivo na interface adesivo/concreto.
 - 11 - Cisalhamento interlaminar do compósito. [BUYUKOSTURK & HEARING, 1997]

Objetivando o combate desses diversos modos de ruptura, os projetistas devem efetuar o correto dimensionamento e especificar de forma clara o detalhamento do reforço em CFC. Os métodos de dimensionamento já consagrados e amplamente utilizados em âmbito mundial são o da norma americana ACI 440-2R-08 e o do Boletim 14 da *fib* (Federação Internacional do Concreto) que é pautado na norma europeia, o *Eurocode*. Na falta de uma NBR (Norma Brasileira) que normatize reforços em CFC, quando utilizados, no Brasil, são normalmente dimensionados por um dos dois métodos citados. Além disso, os fabricantes ativos no mercado fornecem Fichas Técnicas e recomendações, normalmente baseadas em tais métodos.

3 DIMENSIONAMENTO *FIB* BOLETIM 14

Esta recomendação, publicada em julho de 2001, complementa o *Eurocode 2* no que tange o assunto de Projeto e Uso de fibras poliméricas externamente coladas para reforço de estruturas de concreto. Ela, além de estabelecer diretrizes para a execução do reforço e explicar a constituição e propriedades dos materiais, apresenta os métodos de dimensionamento para o reforço de peças de concreto submetidas à flexão, cisalhamento, torção, ação do fogo e para o reforço de pilares por confinamento.

3.1 Reforço à Flexão

Os elementos de concreto reforçados, tal como vigas, lajes e pilares, podem ser reforçados à flexão através do uso de CFC para as zonas de tensão, com a direção das fibras paralela à direção onde se verificam maiores tensões de tração. Os cálculos descritos são em função dos Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS).

A capacidade resistente à flexão da peça estrutural pode corresponder aos modos de ruptura já citados, modos de ruptura clássicos e modos de ruptura por arrancamento ou descolamento. Portanto, além das hipóteses clássicas para o dimensionamento de peças de concreto armado convencionais (hipótese de Bernoulli, aderência perfeita entre aço e concreto, resistência à tração do concreto nula, entre outras) devem ser adicionadas hipóteses de aderência perfeita entre o concreto e o reforço, para as quais devem ser feitos cálculos de verificação de sua validade.

- **Situação Inicial**

O primeiro passo do cálculo é determinar a deformação ε_0 , presente na fibra de extremidade da seção transversal quando se dá a operação do reforço. Esta deformação resulta do momento M_0 (momento de serviço) que atua na seção crítica durante o reforço, provocado pelo peso próprio e qualquer outra carga adicional existente que atue durante o reforço. Pode ser calculada por meio do equilíbrio interno de forças e momentos, como demonstrado pela figura 3.1:

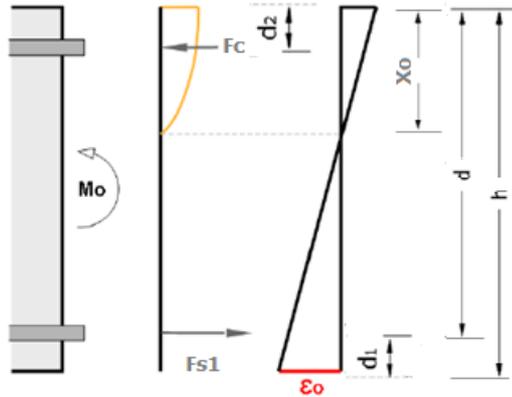


Figura 3.1 - Equilíbrio Situação Inicial

Como M_0 é normalmente maior que o momento de fissuração M_{cr} , o cálculo é feito com base na seção fissurada. A altura da linha neutra x_0 pode ser obtida por solução iterativa da equação:

$$\left(\frac{1}{2}\right) b x_0^2 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_0 - d_2) = \alpha_s A_{s1} (d_1 - x_0) \quad (3.1)$$

Onde, α_s é a razão entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto ($\alpha_s = E_s/E_c$).

A deformação do concreto (ε_{c0}) na fibra superior é dada por:

$$\varepsilon_{c0} = M_0 x_0 / E_c I_{02} \quad (3.2)$$

Onde, I_{02} é o momento de inércia da seção fissurada.

Baseado na hipótese de Bernoulli e utilizando a semelhança de triângulos chega-se à deformação inicial da fibra mais afastada onde será colado o CFC:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} \left(\frac{h-x_0}{x_0} \right) \quad (3.3)$$

• Dimensionamento no ELU

O dimensionamento ótimo no estado limite último (ELU) corresponde à multaneidade entre o esmagamento do concreto ($\varepsilon_{cu} = 0.0035$) e a falha do compósito (ε_{fud}). Para membros onde predomina a flexão, frequentemente o estado limite último é que governará o dimensionamento.

Uma vez calculada a deformação inicial ε_0 , a análise da seção transversal é feita com base no diagrama de tensões e forças resultantes mostrado na figura 3.2:

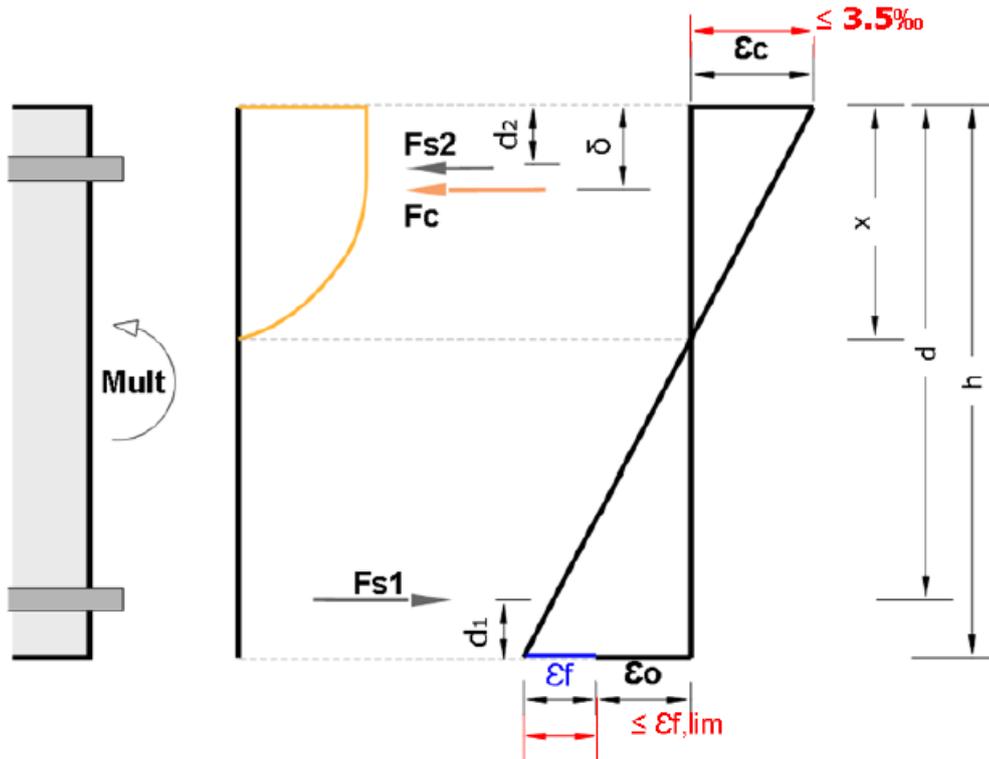


Figura 3.2 - Diagrama de tensão e deformação para o ELU

O Equilíbrio de Forças é realizado com o uso da curva parábola-retângulo que representa a resistência do concreto, como previsto no *Eurocode 2*. A **tensão no concreto** é por ele determinada de acordo com as equações (para $f_{ck} \leq 50MPa$):

$$\sigma_c = f_{cd} \left(1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{0,002} \right)^2 \right) \quad \text{para } 0 \leq \varepsilon_c \leq 2\text{‰}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{para } 2\text{‰} \leq \varepsilon_c \leq 3,5\text{‰}$$

Onde, $f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c}$.

A **tensão no aço** é dada por:

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s \text{ e deve ser menor que } f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}.$$

A máxima deformação no concreto é limitada por ε_{cu2} (3,5‰ para $f_{ck} \leq 50MPa$). Da mesma maneira, a deformação no CFC, ε_f , é restringida à deformação limite, $\varepsilon_{f,lim}$, devido ao descolamento do compósito. Ambos os valores devem ser selecionados de acordo com o estabelecido no *Eurocode 2* e nos respectivos anexos nacionais, caso existam.

O equilíbrio interno de forças é dado pela equação:

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} + F_f \quad (3.4)$$

Onde, F_c é a força no concreto obtida a partir do diagrama parábola-retângulo de compressão do concreto. F_{s2} é a força de compressão na armadura de compressão dada por $A_{s2}\varepsilon_{s2}Es$. F_{s1} é a força de tração nas barras, dada por $A_{s1}\varepsilon_{s1}Es$. E, por último, temos que $F_f = A_f\varepsilon_fEf$, onde $\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{(h-x)}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{f,lim}$.

O equilíbrio de momentos é dado por:

$$M_{sd} = F_{s1}(h - d_1 - \delta) + F_{s2}(\delta - d_2) + F_f(h - \delta) \quad (3.5)$$

Onde, δ pode ser aproximado por $0,4x$ seguindo a assimilação do diagrama de tensões parábola-retângulo a um retângulo de altura equivalente igual $0,8x$.

A partir da resolução do sistema composto pelas equações (3.4) e (3.5) podemos achar a incógnita que buscamos, A_f , área do reforço em fibra carbono dimensionado para atender ao ELU.

• Verificações no ELS

Os cálculos para verificar o estado limite de serviço devem ser feitos seguindo uma análise elástica linear. Dessa forma a partir do equilíbrio de forças e da compatibilidade das tensões demonstrados na figura abaixo, obtemos a altura da linha neutra dada pela equação 3.6.

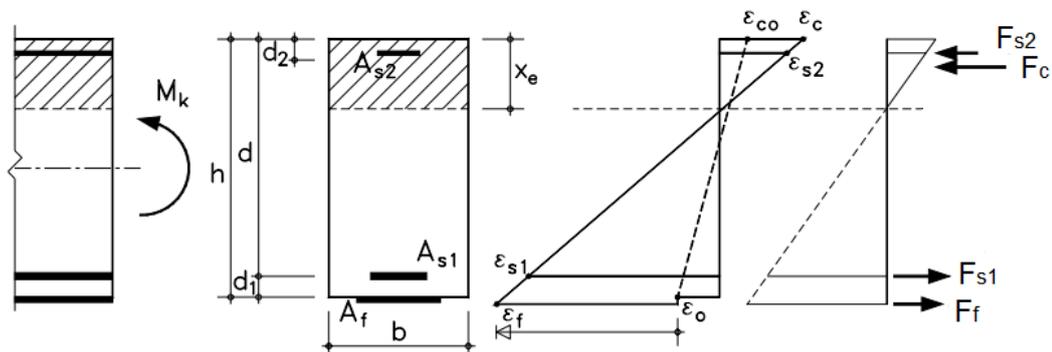


Figura 3.3 - Análise elástica linear da seção fissurada

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_e^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_e - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_e) + \alpha_f \cdot A_f \cdot [h - (1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c}) \cdot x_e] \quad (3.6)$$

Onde, $\alpha_f = E_f/E_c$. Para valores pequenos da deformação inicial ε_0 , o termo $(1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c})$ tende a 1 e, portanto, a equação 3.6 pode ser resolvida diretamente para x_e . Caso

contrário, deve ser resolvido, de forma iterativa, o sistema composto pelas equações (3.6) e (3.7) para a obtenção de x_e .

$$E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_e \cdot \left(h - \frac{x_e}{3} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot \left(\frac{x_e - d_2}{x_e} \right) \cdot (h - d_2) - \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot \left(\frac{d - x_e}{x_e} \right) \cdot (h - d) \right)} \quad (3.7)$$

- Limitação de tensões:

Para prevenir a compressão excessiva no concreto, que causa fissuras e deformações irreversíveis, aplicam-se os seguintes limites:

$$\begin{aligned} \sigma_c &\leq 0,60 f_{ck} && \text{para as combinações de carga excepcionais;} \\ \sigma_c &\leq 0,45 f_{ck} && \text{para as combinações de carga quase-permanentes;} \end{aligned}$$

Para prevenir o escoamento do aço sob carregamento de serviço, limita-se:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_c \left(\frac{d - x_e}{x_e} \right) \leq 0,80 f_{yk} \text{ para as combinações de carga excepcionais;}$$

De maneira similar, a tensão no CFC sob carregamento de serviço, limita-se a:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_c \left(\frac{h - x_e}{x_e} - \varepsilon_0 \right) \leq 0,80 f_{fk} \quad (3.8)$$

- Verificação de deslocamentos (flechas)

Normalmente, o dimensionamento no ELU leva à utilização de pequenas áreas de seção transversal do compósito A_f . Essa área é comumente insuficiente para limitar as curvaturas e deformações da peça reforçada, e pode ter de ser aumentada para que se cumpram integralmente as exigências do ELS. Uma metodologia bem simples para o cálculo de flechas, que pode ser utilizada, é a do CEB *Método bi-linear*. Não serão expostos aqui detalhes do método, visto que sua aplicação é feita de maneira análoga à de uma peça sem reforço, onde o coeficiente β_1 leva em conta as características do reforço aderido (CEB-FIP/90).

- Verificação da fissuração

Para proteger o aço e garantir a funcionalidade da peça, a abertura das fissuras deve ser limitada. Para os elementos reforçados com CFC, novas fissuras aparecem em meio às que surgiriam na peça não reforçada, visto o ganho de rigidez da peça. Dessa forma a fissuração se dá mais distribuída e com aberturas pequenas. Isso acaba fazendo com que esta verificação seja na maioria das ocasiões, desnecessária.

- Verificação da fissuração na interface entre o compósito e o concreto

O boletim 14 da *fib* prevê uma fórmula para verificar se a resistência ao arrancamento na extremidade do CFC é maior que o esforço cisalhante observado na

interface entre o compósito e o concreto. No entanto, essa verificação pode ser descartada se um devido comprimento de ancoragem extra for previsto para o reforço. O cálculo desse comprimento de ancoragem é mostrado na equação (3.9).

- Verificação da aderência

O fenômeno do *peeling-off*, já citado entre os modos de ruptura, geralmente está relacionado com a abertura de fissuras que se propagam na horizontal ao longo da peça no sentido do momento decrescente e que acabam por induzir elevadas tensões de cisalhamento causando a perda de aderência do CFC (descolamento). Para evitá-lo, faz-se necessário garantir uma ancoragem apropriada do compósito em zona de concreto não fissurado, ou seja, afastada da posição onde ocorre a última fissura de flexão no ELU. Para o cálculo do comprimento de ancoragem necessário (l_b), procede-se da seguinte forma:

Primeiramente encontramos o valor de M_{cr} , momento crítico de flexão em que a tensão na fibra inferior é igual ao valor médio da tensão de ruptura à tração do concreto ($f_{ctm,fl}$).

$$f_{ctm,fl} = \text{máx}\left\{\left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) f_{ctm}; f_{ctm}\right\}$$

Onde, h é a altura total do elemento em milímetros.

Uma vez determinado o valor de M_{cr} , a posição da fissura mais próxima ao apoio pode ser estimada através da determinação do ponto (x) em que o momento solicitante no ELU coincide com o valor correspondente do momento crítico de fissuração, como mostra a figura 4.4.

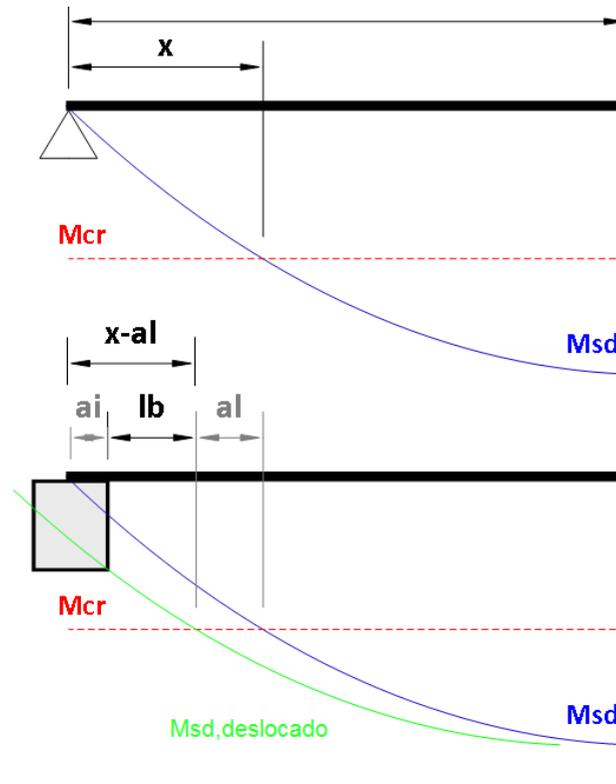


Figura 3.4 - Determinação de l_b .

O comprimento l_b é então determinado por $x - a_l - a_i$. Onde a_i é o comprimento não acessível dentro do apoio e $a_l = 0,45d$ para vigas e $a_l = 0,9d$ para lajes. Em seu Anexo A1, o boletim da fib ainda aponta a seguinte fórmula como alternativa para a determinação do comprimento máximo de ancoragem do CFC externamente colado:

$$l_{b,máx} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_{ctm}}} \quad (3.9)$$

Onde, t_f é a espessura do compósito.

3.2 Reforço ao Cisalhamento

O reforço ao cisalhamento de elementos de concreto armado usando CFC pode ser realizado por aderência externa com a direção da fibra principal orientada paralelamente, tanto quanto possível, à direção principal das tensões de tração. Assim a eficiência do CFC é maximizada. Para os casos mais comuns dos elementos estruturais sujeitos a carregamentos laterais, analogamente ao modelo de diagonais tracionadas da treliça de Mörsch, as principais trajetórias de tensão máxima na zona crítica de cisalhamento formam um ângulo com o eixo do elemento que pode ser assumido como igual a 45° . No entanto, normalmente é mais prático orientar as mantas de CFC com as fibras de forma perpendicular ao eixo do elemento.

A maioria dos pesquisadores que estudaram o comportamento de vigas reforçadas com CFC idealizou a resistência do reforço aos esforços cisalhantes de maneira análoga aos estribos, assumindo que a sua contribuição para a capacidade de resistência ao cisalhamento provém do trabalho das fibras em resistir às tensões, sob deformação aproximadamente constante. Além disso, seus experimentos mostram que normalmente as peças reforçadas atingem sua capacidade de resistência ao cisalhamento (logo antes da ruptura) quando o reforço está tracionado em sua direção principal apresentando uma deformação que é menor que a máxima deformação esperada no estado limite último (ϵ_{fu}). Esta deformação é definida como a deformação máxima efetiva ($\epsilon_{f,e}$). Seu valor é extremamente difícil, se não impossível, de ser determinado analiticamente, devido ao elevado número de variáveis.

Uma possível explicação para que o reforço não atinja a máxima tensão que pode suportar antes da ruptura da peça é que, no estado limite último, um certo grau de descolamento do reforço é sempre esperado. Para evitar esse grau de incerteza e garantir a segurança da peça, o confinamento contínuo ou tiras devidamente ancoradas são preferíveis se comparados com o confinamento aberto (figura 3.2.1), pois apresentam maior resistência ao descolamento.

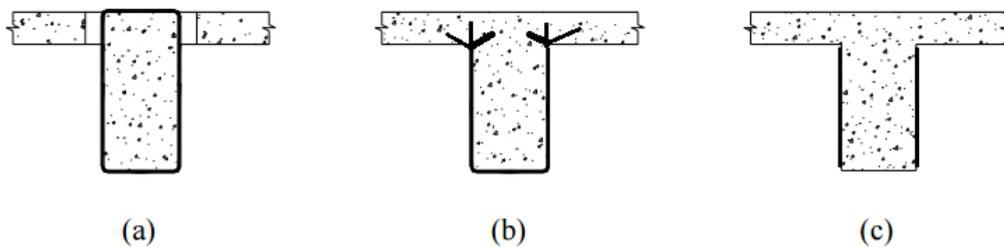


Figura 3.5 - Configurações de reforço ao cisalhamento. A) Confinamento contínuo, B) Tiras ancoradas, C) Tiras ou confinamento aberto

• Dimensionamento no ELU

De acordo com o *Eurocode 2*, a capacidade de resistência ao cisalhamento de um elemento de concreto armado reforçado é a soma das parcelas resistentes do concreto, do aço e do reforço:

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}) \quad (3.10)$$

Onde, no caso do reforço em CFC, a parcela V_{fd} pode ser escrita por:

$$V_{fd} = 0,9 \cdot \epsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \text{sen}\alpha \quad (3.11)$$

Onde,

$\varepsilon_{fd,e}$ é o valor efetivo da deformação máxima do reforço no ELU;
 E_{fu} é o módulo de elasticidade do CFC no sentido principal da fibra;
 α é o ângulo entre a orientação da fibra e o eixo longitudinal da peça;
 θ é o ângulo da biela usado para cálculo, assumido como 45°;
 ρ_f é a taxa de reforço igual a $2t_f \cdot \text{sen}\alpha / b_w$ para reforço contínuo de espessura t_f ,
 ou igual a $(2t_f / b_w) \cdot (b_f / s_f)$ para tiras ou lâminas de largura b_f espaçadas entre si
 de um comprimento s_f .

O valor de $\varepsilon_{fd,e}$ é obtido pela seguinte manipulação:

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f} = \frac{k\varepsilon_{f,e}}{\gamma_f}, \quad k=0,8 \text{ e } \gamma_f = 1,30 \text{ para o caso da ruptura por descolamento ser dominante ou } \gamma_f = 1,20 \text{ para o caso de ruptura do CFC.}$$

Por sua vez, o valor de $\varepsilon_{f,e}$ é determinado de acordo com a configuração do reforço:

- Para o reforço contínuo ou devidamente ancorado:

$$\varepsilon_{f,e} = 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \quad (3.12)$$

- Para tiras laterais ou reforço em formato de U:

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3}; 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \right] \quad (3.13)$$

Descolamento

Ruptura do CFC

f_{cm} é a resistência média à compressão do concreto dada em MPa e E_{fu} o módulo de elasticidade do compósito em GPa.

Deve-se observar que caso o valor da deformação efetiva do CFC seja menor que a deformação de escoamento do aço (2,5‰), a contribuição de resistência dada pelos estribos deve ser baseada nesta deformação ($\varepsilon_{f,e}$).

Além disso, alguns pesquisadores propõem que o valor da deformação máxima efetiva deve ser limitado a 0,006. Existem também, dependendo do país, anexos nacionais que sugerem valores para esse limite (ex. França 8,5‰).

• Verificação no ELS

A única verificação do cisalhamento no estado limite de serviço recomendada pela *fib* é que a deformação no estado limite de serviço deve respeitar o seguinte limite:

$$\varepsilon_{fk,e} \leq 0,8f_{yk}/E_s \quad (3.14)$$

4 DIMENSIONAMENTO ACI 440.2R-08

Essa norma americana foi publicada em Julho de 2008 e serve como guia para o dimensionamento e construção de sistemas de CFC externamente colados para reforço de estruturas de concreto.

De acordo com a norma ACI 440.2R-02, os reforços com sistemas compostos estruturados com fibras de carbono devem ser projetados de acordo com as recomendações de utilização e resistência da ACI 318-99, utilizando-se os fatores de majoração e minoração dos carregamentos e das ações ali indicados, prevendo a ocorrência tanto do estado limite ultimo (ELU) quanto do estado limite de serviço (ELS).

Limites de resistência estrutural das peças reforçadas com CFC devem ser cuidadosamente estabelecidos para que não ocorra o colapso devido a ocorrências tais como descolamento do reforço, fogo e incêndios, vandalismo ou outras causas. Portanto, fabricantes e projetistas estruturais, baseados nesta norma, recomendam que o elemento estrutural, a partir do momento em que não se pode contar com a atuação resistente do reforço, deve apresentar uma capacidade resistente residual sem que entre em colapso. Segundo as recomendações da norma a estrutura deve apresentar resistência para o seguinte nível de carregamento:

$$\phi R_n \geq (1,1S_{DL} + 0,75S_{LL}) \quad (4.1)$$

ϕ - fator de redução da resistência;

R_n - resistência nominal do elemento;

S_{DL} - ações da carga permanente e de longa duração;

S_{LL} - ações da carga acidental e de curta duração.

4.1 Reforço à Flexão

As hipóteses e considerações iniciais são análogas às já apresentadas no dimensionamento à flexão pelo boletim da *fib* (hipótese de Bernoulli, aderência perfeita entre aço e concreto, resistência à tração do concreto nula, aderência perfeita entre o CFC e o substrato), salvo a deformação máxima do concreto que segundo as recomendações da ACI é de $\epsilon_{cu} = 3,0\%$ (e não $3,5\%$ como determinam o *Eurocode 2* e a ABNT). Para que sejam asseguradas as hipóteses de cálculo a norma também apresenta um capítulo (13) com as recomendações para se evitar o modo de ruptura prematura de arrancamento do reforço.

Aplica-se também a consideração de que quando o reforço é aderido à superfície do substrato a peça já se encontra carregada e apresenta uma deformação inicial, implicando que o nível de tensão ao qual o reforço será submetido não é o mesmo da tensão na fibra inferior do concreto. Para levar isso em conta a norma apresenta a seguinte fórmula para determinar a deformação máxima permissível na fibra de carbono:

$$\varepsilon_{fc} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad (4.2)$$

Onde, ε_b é a deformação da fibra inferior da viga para o carregamento máximo, ε_{bi} é a deformação pré-existente quando da instalação do reforço e ε_{fu} é obtido de acordo com o valor da resistência informado pelo fabricante reduzido por fator que depende das condições de exposição e agressividade (C_E), cujos valores são apresentados na tabela a seguir:

Condições de Exposição	TIPO DE FIBRA	C_E
Exposição ao interior	Carbono	0.95
	Vidrio	0.75
Exposição ao exterior	Carbono	0.85
	Vidrio	0.65
Ambiente agressivo	Carbono	0.85
	Vidrio	0.50

Tabela 4.1 - Condições de exposição – ACI 440.2R-08

Analogamente os valores da resistência efetiva e do módulo de elasticidade do material do reforço podem ser obtidos pelas fórmulas abaixo:

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^*$$

$$E_{fu} = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}}$$

A fim de evitar a ruptura por descolamento, o valor da deformação máxima permitida do CFC é ainda limitado a nível em que o descolamento do reforço pode ocorrer. Esta deformação máxima efetiva é dada por:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (4.3)$$

A própria norma deixa estabelecido que pesquisas ainda são necessárias para que se compreenda melhor a influência da presença do reforço transversal no descolamento do reforço longitudinal. Ela prescreve ainda uma margem razoavelmente grande para a estimativa do valor da deformação máxima efetiva no caso do reforço embutido (NSM), ε_{fd} varia entre 0,6 e 0,9 de ε_{fu} .

O fator de redução da resistência (ϕ) já citado anteriormente existe, entre outras razões, para garantir uma ductilidade mínima da peça de concreto armado, para que esta apresente uma ruptura segura e com avisos. Pela norma ACI 318-05, para elementos de concreto armado reforçados e sem protensão, uma ductilidade adequada é atingida se a deformação no aço quando se atinge o esmagamento do concreto ou a falha do CFC, seja por ruptura do composto, arrancamento ou descolamento, é de, no mínimo, 5%. O valor de ϕ é então dado pela seguinte fórmula em função da deformação prevista no CFC (ϵ_f):

$$\begin{aligned} \phi &= 0,90 \text{ para } \epsilon_f \geq 0,005 \\ \phi &= 0,65 + \frac{0,25 \cdot (\epsilon_f - \epsilon_{sy})}{0,005 - \epsilon_{sy}} \text{ para } \epsilon_{sy} < \epsilon_f < 0,005 \\ \phi &= 0,65 \text{ para } \epsilon_f \leq \epsilon_{sy} \end{aligned}$$

• Dimensionamento no ELU

O cálculo para o dimensionamento do sistema CFC, no estado limite último, deve satisfazer a compatibilidade de deformações aceitáveis dos materiais envolvidos e o equilíbrio de forças levando em conta qual modo de ruptura governa a falha da peça em estudo.

O procedimento descrito pela norma da ACI é também baseado em um método iterativo de tentativa e erro, no qual, primeiramente assumimos um valor (c) para a profundidade da linha neutra (figura 4.1).

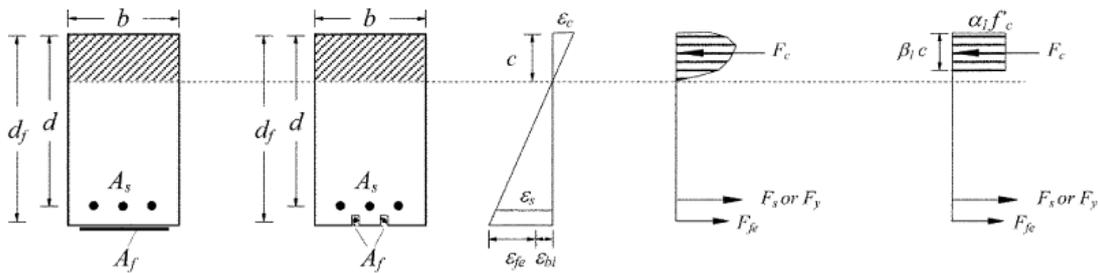


Figura 4.1-Deformação e equilíbrio de forças em seção de viga retangular reforçada

Para qualquer valor assumido da profundidade da linha neutra, pode-se definir a deformação no CFC por meio da equação abaixo, advinda da hipótese de Bernoulli e semelhança de triângulos aplicada no diagrama (linear) de deformações:

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \quad (4.4)$$

Analogamente a deformação no aço pode ser determinada por:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{d-f-c}\right) \quad (4.5)$$

A partir das deformações obtidas, as tensões no CFC e no aço são obtidas respectivamente por:

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (4.6)$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y \quad (4.7)$$

Com as tensões no CFC e no aço determinadas, checamos o equilíbrio de forças por meio da equação:

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} \quad (4.8)$$

Onde, α_1 e β_1 são fatores determinados na norma ACI 318-05, que buscam uma melhor aproximação para a força resultante do diagrama de tensões no concreto, e dependem do modo de ruptura previsto para a peça.

Por método iterativo, o valor (c) da profundidade da linha neutra é obtido quando são satisfeitas simultaneamente as equações (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8), respeitando-se assim a compatibilidade das deformações e o equilíbrio interno de forças.

O momento nominal resistente é determinado por:

$$M_n = A_s \cdot f_s \cdot \left(d \cdot \frac{\beta_1 \cdot c}{2}\right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h \cdot \frac{\beta_1 \cdot c}{2}\right) \quad (4.9)$$

As equações (4.8) e (4.9), formuladas a partir do equilíbrio de forças e momentos respectivamente, devem ser devidamente modificadas se considerada a parcela de contribuição à resistência da armadura comprimida (A'_s). Se satisfeita a condição $\phi M_n \geq M_{m\acute{a}x}$, onde $M_{m\acute{a}x}$ é o máximo valor de momento solicitante encontrado na análise estática da peça, temos que a peça está devidamente dimensionada e reforçada à flexão.

• Verificações

Analogamente às limitações de tensão no concreto, aço e compósito de fibra de carbono, apresentadas pelo boletim da *fib*, o ACI especifica as seguintes verificações:

$$f_{c,s} \leq 0,45 \cdot f_{c'}$$

$$f_{s,s} \leq 0,8 \cdot f_y$$

$$f_{f,s} \leq 0,55 \cdot f_{fu}$$

• Detalhes do reforço

A norma ACI também determina um cálculo para o comprimento de ancoragem mínimo, para garantir a capacidade do reforço em desenvolver a resistência para a qual foi calculado. Esse comprimento é calculado como a distância entre o apoio e a região da peça que desenvolve o momento crítico M_r , referente ao aparecimento de fissuras e tem seu valor definido pela equação:

$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{f'c}}} \quad (4.10)$$

Além disso, para prevenir o modo de ruptura por *end peeling* ou delaminação, o capítulo 13 da norma prevê a utilização de ancoragens mecânicas ou de tecidos de CFC colados transversalmente (envelopando a peça) nas zonas de momentos próximos de zero, com a finalidade de “apertar” a extremidade da lâmina colada para resistir à flexão. A quantidade de tecido de reforço a ser utilizada para esta operação é indicada pela fórmula:

$$A_{f,ancoragem} = \frac{(A_f \cdot f_{fu}) \cdot longitudinal}{(E_f \cdot k_v \cdot \epsilon_{fu})_{ancoragem}} \quad (4.11)$$

4.2 Reforço ao Cisalhamento

Todas as hipóteses, considerações e utilizações mencionadas no tópico referente ao método da *fib* são aqui cabíveis também. Em adição, a ACI prevê possíveis utilizações do reforço para peças resistindo a esforços causados por ações sísmicas.

Analogamente à *fib*, esta norma prevê três tipos principais de reforço em seções retangulares de vigas. Completamente envelopadas, aderida às 3 superfícies e aderidas apenas nas laterais. As duas últimas tipologias citadas tendem a ser mais eficientes quanto ao reforço nas regiões de momentos positivos. Observa-se também por esta norma que o esquema completamente envelopado é o mais eficiente no acréscimo de resistência, seguido respectivamente pelos outros dois. Quando definida a utilização de tiras discretas e espaçadas para o envolvimento da peça, a distância de centro a centro das tiras não deve exceder $4d$, onde d é a altura útil da viga.

• Dimensionamento no ELU

Seguindo as premissas do método de tensões admissíveis, a fórmula principal que define o dimensionamento do CFC para resistir ao cisalhamento, dada pelo ACI é:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (4.12)$$

Onde, ϕ é o fator de redução da tensão nominal

V_n é a resistência nominal ao cisalhamento do elemento reforçado

V_u é a solicitação de cisalhamento máxima de cálculo.

A resistência nominal ao cisalhamento pode ser destrinchada nas seguintes parcelas: V_c - resistência fornecida pelo concreto, V_s - resistência da armadura transversal e V_f - a resistência do sistema de reforço:

$$V_n = V_c + V_s + \psi_f \cdot V_f \quad (4.13)$$

Sendo ψ_f um fator adicional de redução para a parcela de contribuição do CFC, definido com base na confiabilidade de análises de dados de diversas pesquisas ao redor do mundo. O ACI recomenda a adoção de ψ_f igual 0,85, quando o reforço é aderido nas três superfícies da peça em formato de U ou quando é aplicado apenas nas laterais da peça. Quando se tem o caso da peça completamente envolvida, embora ainda exista uma falta de dados e pesquisas que testem essa tipologia específica, o valor de ψ_f pode ser adotado como 0,95.

As equações para se chegar aos valores das contribuições de resistência V_c e V_s são estabelecidas na ACI 318-05 (eq. 11.3 a 11.8). Uma vez definidas, pode-se, a partir da equação (4.14), encontrar a parcela V_f que deve ser resistida pelas fibras de carbono, e assim prossegue-se o dimensionamento do CFC pela fórmula a seguir.

$$V_f = \frac{A_f \cdot f_{fe} \cdot (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) \cdot d_f}{s_f} \quad (4.14)$$

Onde, A_f é a área da seção transversal da lâmina de reforço de fibra carbono, e pode ser escrita como, $A_f = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f$, sendo, n o número de camadas de reforço e t_f a espessura da lâmina de fibra de carbono. Os parâmetros geométricos α , d_f , s_f e w_f são, respectivamente, o ângulo de inclinação da aplicação das tiras, altura útil da lâmina de fibra carbono na lateral da viga, espaçamento entre as tiras e a largura das tiras, como mostra a figura 5.2.

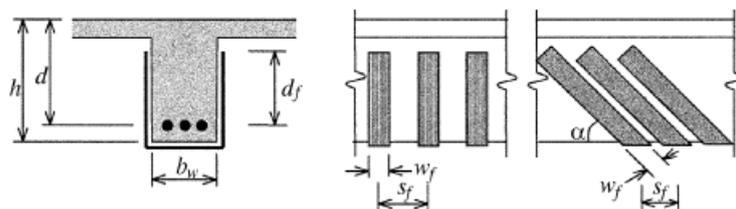


Figura 4.2 - Ilustração dos parâmetros geométricos

A deformação efetiva das fibras de carbono (ϵ_{fe}) é a máxima deformação que pode ser atingida ao se exigir a máxima resistência nominal da peça e é governada pelos modos de ruptura no reforço e do elemento de concreto. A determinação do seu valor depende do modo crítico de ruptura que será previsto pelo projetista. A norma do ACI guia a escolha desse valor dependendo da tipologia da aplicação do reforço.

Elementos de concreto, completamente envolvidos pelo reforço em CFC, costumam apresentar, mais frequentemente, a ruptura por meio da perda de coesão do concreto

interno do que o alcance da deformação última das fibras de carbono. Para evitar que este modo de ruptura ocorra, a máxima deformação admitida para o dimensionamento é limitada a 0,4%.

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (4.15)$$

Para os elementos com o reforço aderido em formato de U ou aderido apenas nas faces laterais, tipologias em que o CFC não envolve completamente a peça estrutural, a delaminação ou descolamento são os modos de ruptura mais observados. Por isso, a deformação máxima efetiva é calculada usando um coeficiente de redução referente à colagem do reforço, como apresentado a seguir:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (4.16)$$

Este coeficiente de redução depende de fatores como a resistência característica do concreto, o tipo de envolvimento da peça pelo reforço e a espessura do reforço. O seu valor é obtido por um método de cálculo proposto por Khalifa – 1998 e é apresentado pela equação abaixo:

$$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (4.17)$$

Onde, L_e é o comprimento da região reforçada onde são mantidas a maior parte das tensões de descolamento e é estimado por:

$$L_e = \frac{23300}{(n_f \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}}$$

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

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \text{ para elemento envolvidos em U}$$

$$k_2 = \frac{d_f - 2L_e}{d_f} \text{ para duas faces laterais aderidas com reforço}$$

Essa metodologia para a obtenção de k_v é validada para as regiões do elemento estrutural que apresenta grande esforço cortante e baixo momento fletor. A norma do ACI sugere que, para casos onde a combinação de esforços é diferente, o valor de k_v acaba sendo conservador. Ela sugere ainda, que a capacidade do CFC em desenvolver maiores resistências ao cisalhamento pode ser aumentada pela execução de ancoragens mecânicas.

- **Verificação no ELS**

Obedecendo ao mesmo critério apresentado na ACI 318-05, que limita a resistência da armadura de aço transversal, deve-se limitar a soma das componentes resistentes do reforço e dos estribos por meio da equação:

$$V_s + V_f \leq 0,66\sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (4.18)$$

5 METODOLOGIA

A título de comparação entre os dois métodos de cálculo apresentados, foi criada a tabela abaixo.

	Boletim 14 fib	ACI 440-2R-08
Metodologia	Dimensionamento e verificações nos estados limites, por meio de coeficientes de segurança parciais.	Dimensionamento e verificações por meio do cálculo de tensões admissíveis, usando fator de segurança global.
Coeficientes de segurança	Coeficiente de majoração da carga: $\gamma_f = 1,5$ ou 1,35. Coeficiente de minoração da resistência do concreto: $\gamma_c = 1,4$. Coeficiente de minoração da resistência do aço: $\gamma_s = 1,15$.	Fator de segurança global. É o fator de redução da resistência ϕ , que varia de 0,9 a 0,65 dependendo da deformação prevista no CFC. Coeficiente de redução da resistência do CFC (informada pelo fabricante), C_E , que depende das condições de exposição. Coeficiente de majoração dos esforços permanentes (1,1) e acidentais (0,75).
FLEXÃO		
Hipóteses	Bernoulli, aderência perfeita entre concreto e aço e entre concreto e compósito, concreto não contribui para resistir à tração.	Bernoulli, aderência perfeita entre concreto e aço e entre concreto e compósito, concreto não contribui para resistir à tração.
Deformação máxima admitida no concreto	$\varepsilon_c \leq 3,5\text{‰}$	$\varepsilon_c \leq 3,0\text{‰}$
Limitação da deformação do CFC	A deformação limite do CFC a ser usada para dimensionamento, $\varepsilon_{f,lim}$, referente ao descolamento deve ser definida pelo projetista, baseado no Eurocode 2 e/ou anexos nacionais caso existam.	Para evitar o descolamento a deformação máxima no CFC é limitada pela equação 4.3, não podendo ultrapassar $0,9\varepsilon_{fu}$ (resistência informada pelo fabricante). Para o NSM esse valor varia de 0,6 a $0,9\varepsilon_{fu}$.
Situação inicial	Deformação da fibra inferior do concreto, antes do reforço e sob carregamento de serviço, ε_0 , definida pela equação 3.3.	Deformação da fibra inferior do concreto, antes do reforço, ε_{bi} , definida pela equação 4.2.
Determinação da profundidade da linha neutra	Representada pela letra “x” é determinada por método iterativo envolvendo equações de equilíbrio interno e compatibilidade deformações entre os materiais. Equações 3.1 a 3.3.	Representada pela letra “c” é determinada por método iterativo envolvendo equações de equilíbrio interno e compatibilidade deformações entre os materiais. Equações 4.4 a 4.8.

Dimensionamento da área necessária de CFC	Resolução do sistema composto pelas equações 3.4 e 3.5, que tratam do equilíbrio de forças e momentos.	Obtido quando se atende a condição $\phi M_n \geq M_{m\acute{a}x}$, onde M_n é definido pela equação 4.9.
Verificações	Limitações de tensões sob carregamentos de serviço, verificação de flechas (CEB), verificação do comprimento de ancoragem necessário (equação 3.9).	Limitações de tensões sob carregamentos de serviço, verificação do comprimento de ancoragem necessário (equação 4.10). Cálculo de “aperto” por aplicação transversal de tecido dimensionado pela equação 4.11.
CISALHAMENTO		
Dimensionamento da área necessária de CFC	A partir da comparação do valor de cálculo do esforço cortante solicitante e das equações 3.10 e 3.11 combinadas.	A partir da utilização das equações 4.12, 4.13 e 4.14.
Máxima deformação efetiva no CFC	Dependendo do tipo de envolvimento da peça pelo reforço utiliza-se ou a equação 3.12 ou a equação 3.13	Dependendo do tipo de envolvimento da peça pelo reforço utiliza-se ou a equação 4.15 ou a combinação das equações 4.16 e 4.17.
Verificação	Equação 3.14	Equação 4.18

Tabela 5.1 - Comparação das diretrizes de dimensionamento

Até este ponto, o estudo apresentou a comparação feita apenas no âmbito teórico entre as normas aplicáveis e em relação aos procedimentos, hipóteses e valores característicos adotados. A partir de agora, pretende-se fazer alguns estudos de caso com os cálculos do dimensionamento efetuados pelos dois métodos, afim de obter uma comparação quantitativa e mais tangível. Os estudos de caso propostos foram escolhidos em meio a casos reais de projetos de reforço estrutural dos escritórios de projetos estruturais Simetria Engenharia com sede em Brasília, e Sarl Clair'Equeaux, com sede em Reims-França, onde o autor fez estágio.

A análise comparativa, a ser feita após o dimensionamento pelos dois métodos, poderá dizer, caso a caso, qual o método que se faz mais conservador, econômico e/ou mais aplicável e adequado à nossa realidade.

Para servir como ferramenta para o dimensionamento foi elaborada uma planilha Excel (Anexo 1) que, a partir dos dados de entrada, nos fornece automaticamente os resultados encontrados pelos dois métodos, com as verificações inclusas. Além disso, para efeito de comparação e checagem, dispõe-se ainda de dois softwares já existentes: *SIKA Carbodur*, desenvolvido pela multinacional SIKA e que usa o método e critérios do ACI, e *La Soft 3.1*, recém desenvolvido pela multinacional alemã Mc-Bauchemie, e que utiliza o método e critérios da *fib*.

6 ESTUDOS DE CASO

6.1 Ginásio Bauvin

Este primeiro caso se trata de um ginásio poliesportivo situado em Villers-lés-Nancy na França, que foi efetivamente reforçado com fibras de carbono pelo escritório Sarl Clair Equeaux. Construído em 1959, apresentava um estado de fissuração inquietante dos pórticos de concreto armado que compõem sua estrutura.

O pórtico em questão é composto por uma viga com 18,2 metros de vão, $f_{ck} = 40$ MPa e seção variável apresentada na figura 6.1.

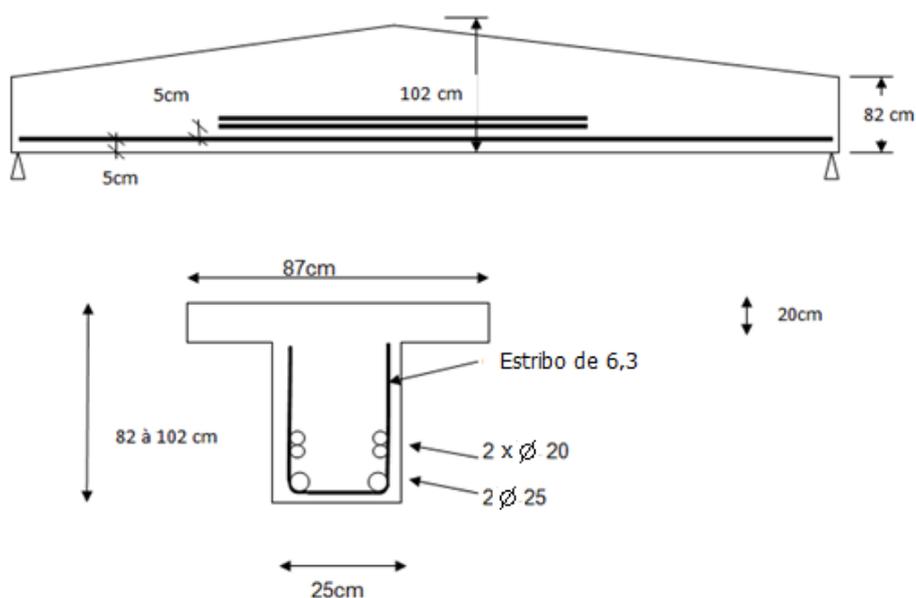


Figura 6.1 - Viga de seção variável

Um ensaio de pacometria feito pela empresa MASTERDIAG concluiu que a viga apresenta armadura de flexão que totaliza $22,38 \text{ cm}^2$ de aço na seção crítica (meio do vão), cuja altura útil é de 94 cm. Os estribos são de 6,3 mm de diâmetro em formato de “U” e se encontram com espaçamentos variando de 12 cm a 19 cm. A análise da pacometria apontou ainda para um comprimento de ancoragem insuficiente da armadura de flexão dentro do pilar.

Somada à pacometria, uma análise visual in loco foi feita e foram observadas fissuras no encontro entre os pilares e a viga, como mostra a figura 6.2.

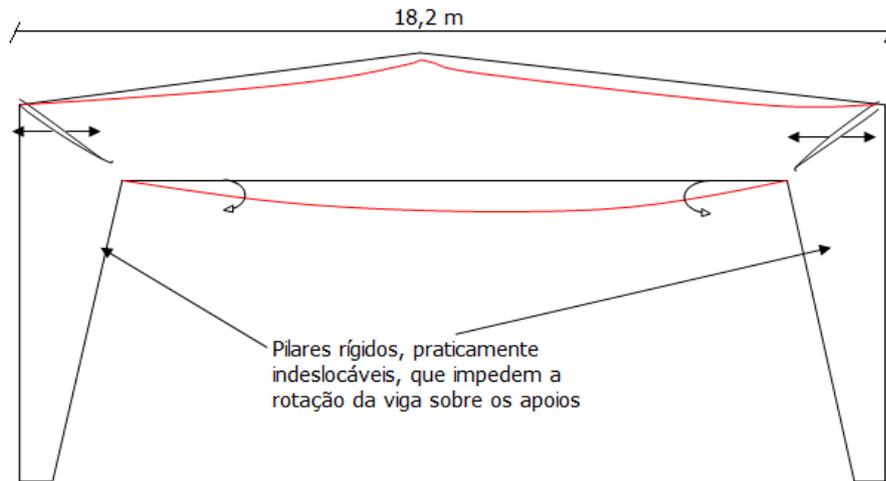


Figura 6.2 - Representação das fissuras observadas in-loco

Essas fissuras podem ter várias origens ou ser o resultado de vários fatores. Entre eles pode-se citar: a fluência do concreto já relativamente “velho”; uma viga de vão muito grande, e que, portanto, apresenta uma flecha elevada, ligada a pilares rígidos pouco deformáveis; e a própria insuficiência da armadura, constatada na pacometria.

A partir de um cálculo rápido de dimensionamento da viga (desconsiderando a colaboração da mesa comprimida) é possível notar que a armadura encontrada não é suficiente para suportar o momento característico máximo (712 kN.m) gerado no meio do vão pela combinação mais crítica de carregamentos (cargas permanentes + vento + neve). Será feito então o dimensionamento do reforço com compósitos de fibra de carbono para a flexão e cisalhamento por meio dos dois métodos aqui estudados.

• Resultados do dimensionamento

Abaixo, serão apresentados, em formato de tabela, os dados gerados pelo dimensionamento de ambos os métodos, tanto pela planilha quanto pelos softwares:

	Planilha FIB	Planilha ACI	LaSoft	Sika Carbodur
Dimensionamento	Msd	1068 kN.m	ϕ Mn 871,21807 kN.m	Msd 1068 kN.m Mn 940 kN.m
	Vsd	192 kN	Vn 142,38498 kN	Vsd 179,2 kN Vn - kN
	Mo	527 kN.m	Mo 527 kN.m	Mo 527 kN.m Mo 527 kN.m
	ϵ_0	0,0016	ebi 0,0018	ϵ_0 0,0015 ebi -
	X	21,47 cm	c 31,29 cm	x 11,46 cm c 10,66 cm
	Ec	0,0026	ec 0,003	ec 0,0013 ec 0,0008
	es1	0,0091	es 0,0060	es1 0,0096 es 0,0069
	Ef	0,0084	efe 0,0050	ef 0,0088 efe 0,0057
	ef,lim	0,0085	efd 0,014535	ef,lim 0,00883 efd 0,014535
	Af	1,8910403 cm ²	Af 1,7287399 cm ²	Af 1,25 cm ² Af 2,16 cm ²
ELS	Msk	712 kN.m	Mn 712 kN.m	Msk 712 kN.m Mn 712 kN.m
	Vsk	128 kN	Vn 128 kN	Vsk 128 kN Vn 128 kN
	Xe	27,48 cm	c' 23,86 cm	Xe 16,46 cm c' 15,23 cm
	σ_c	23,15 MPa	fc,s 14,82 MPa	σ_c 12,24 MPa fc,s 13,18 Mpa
	σ_s	351,73 MPa	fy,s 366,36 MPa	σ_s 373,4 MPa fy,s 408,79 Mpa
	σ_f	315,04 MPa	ff,s 39,83 MPa	σ_f 84,31 MPa ff,s 76,15 Mpa
	lb	-0,027 cm	ldf 36,55 cm	lb 0,5 cm ldf -
Cisalhamento	Vsd	192 kN	Vn 156,62347 kN	
	Vcd	0 kN	Vc 0 kN	
	Vwd	117,76 kN	Vs 125,73 kN	
	Vfd	74,24 kN	Vf 19,59 kN	
	Af	3,14 cm ² /m	Af 2,47 cm ² /m	
	Tf	0,167 cm	tf 0,167 cm	
	bf/sf	0,188	bf/sf 0,148 cm/m	

Tabela 6.1 - Resultados Ginásio Bauvin

• Observações

Certas explicações e alguns adendos devem ser feitos para a correta interpretação dos dados acima.

Primeiramente, uma grande diferença entre a planilha e os softwares é que a planilha foi programada para não se levar em conta a colaboração da mesa comprimida. Já os softwares não nos permitem fazer essa simplificação, pois se não considerarmos a mesa colaborante, eles acusam a ruptura da seção sem reforço por esmagamento do concreto. Nestes casos a utilização de reforço apenas na parte tracionada da viga não é indicada, no entanto, as observações feitas no local mostram que o problema está sendo sim um déficit de armadura, o que torna a simplificação feita na planilha adequada. Logo, ao comparar os dados, é importante lembrarmos que a seção calculada pelos softwares contém uma área maior de concreto comprimido. Isso explica, por exemplo, a menor

profundidade da linha neutra dada pelos softwares e também menores deformações das fibras de concreto.

Observa-se que o modo de ruptura é diferente conforme o método. Pelo dimensionamento da *fib* a ruptura se dá no CFC, tanto na planilha quanto no software LaSoft 3.1. Isso é evidenciado pela deformação ε_f que ultrapassa o limite de 8,5‰, estipulado também pelo fabricante dos produtos da MC-Bauchemie. Já pelo ACI, conforme os dados gerados pela planilha, a ruptura da seção reforçada é caracterizada pelo esmagamento do concreto, pois a deformação ε_c atinge os 3‰ limitados pela norma. Nesse caso, a norma do ACI ainda exige que a deformação no aço, ε_s , seja maior ou igual a 5‰, para que se garanta uma ruptura com avisos, ou seja, com um escoamento mínimo do aço que gere fissuras na parte tracionada da viga. Isso é verificado nos resultados dados pela planilha.

Os dados gerados pelo software *SikaCarbodur*, são os mais destoantes. Lembrando que neste caso se considera a contribuição da mesa comprimida, a diferença na área de CFC necessária se justifica também pelo fato do software levar em conta a resistência ao fogo (não abordada nesse presente trabalho) e gerar resultados de área necessária arredondados e compatíveis com as dimensões dos produtos do catálogo da SIKA.

Para a avaliação do reforço ao cisalhamento, apenas a planilha foi utilizada nesse primeiro estudo de caso. Isso porque se optou por desconsiderar a contribuição da parcela da resistência ao cisalhamento do concreto (V_{cd}), uma vez que próximo aos apoios a viga se encontra com um estado de fissuração que pode prejudicar a resistência do concreto. Os softwares não nos permitem zerar esta parcela, que, quando calculada, é consideravelmente grande, e torna a seção da viga não reforçada já suficiente para resistir à sollicitação do esforço cortante, resultando em uma seção de tecido de carbono necessária nula.

A verificação do comprimento de ancoragem mostrou em todos os casos que se o reforço à flexão for colocado até junto do apoio, o comprimento de ancoragem é suficientemente atendido. No entanto, para impedir a evolução das fissuras do encontro entre viga e pilar, pode ser especificado um “envelopamento” da região, como é apresentado na figura 6.3. Deve-se atentar ainda para o significado do comprimento $l_{df} = 36,55\text{cm}$ apresentado na coluna da planilha do ACI. Este é o comprimento de ancoragem necessário a partir do L_e , ponto em que o momento solicitante ultrapassa o momento crítico de fissuração da peça. Neste caso o L_e vale 63,06 cm, contado a partir da face do apoio. Logo, se colarmos a placa até junto do apoio, o comprimento de ancoragem estará largamente satisfeito.

• Análise Comparativa

Dadas as observações feitas acima, pode-se perceber que o dimensionamento efetuado por cada ferramenta foi muito particular e diferem bastante entre si, seja porque consideram uma seção de concreto ou modo de ruptura diferentes, ou ainda por verificações que são feitas em um caso e não no outro. Por agora, podemos comparar os

momentos e cortantes de cálculo que resultam maiores no método da FIB do que no do ACI. No entanto, ao final do dimensionamento, as áreas necessárias calculadas pelos dois métodos foram bem próximas, tanto do laminado para combater a flexão quanto do tecido para reforçar ao cisalhamento.

A área de laminado ($2,16 \text{ cm}^2$) dada pelo software SIKKA Carbodur, além de ter sido calculada com a consideração da seção “T”, foi obtida pela influência de verificações adicionais que não cabem no caso do presente ginásio, onde o pé direito é bem alto, impossibilita um eventual vandalismo e reduz a influência de um incêndio. A área mínima ($1,25 \text{ cm}^2$) encontrada pelo software LaSoft 3.1, também considera a contribuição da mesa comprimida. A partir da análise da pacometria, percebe-se que não existe solidarização nenhuma entre a mesa e a alma da viga, já que não existem estribos na mesa e os estribos da viga, em formato de U não ancoram suficientemente na mesa. Logo, a hipótese feita para o cálculo com as planilhas se torna mais condizente com a realidade e adequada para esse estudo.

Comparando então os resultados gerados pela planilha, conclui-se que o dimensionamento pelo método da *fib* gerou áreas de laminado e tecido levemente maiores que o dimensionamento pelo método do ACI.

Enfim, especifica-se, para o reforço da viga, duas lâminas de 80 mm de largura e 1,2 mm de espessura, coladas lado a lado na base da viga, resultando numa área real de $1,92 \text{ cm}^2$ de CFC. Para o cisalhamento adotam-se, em cada extremidade da viga, três tiras de 50 cm de largura, 0,167 mm de espessura espaçadas de 40 cm, envolvendo a viga em forma de U. Na figura 6.3 é mostrado um croqui do detalhamento do reforço.

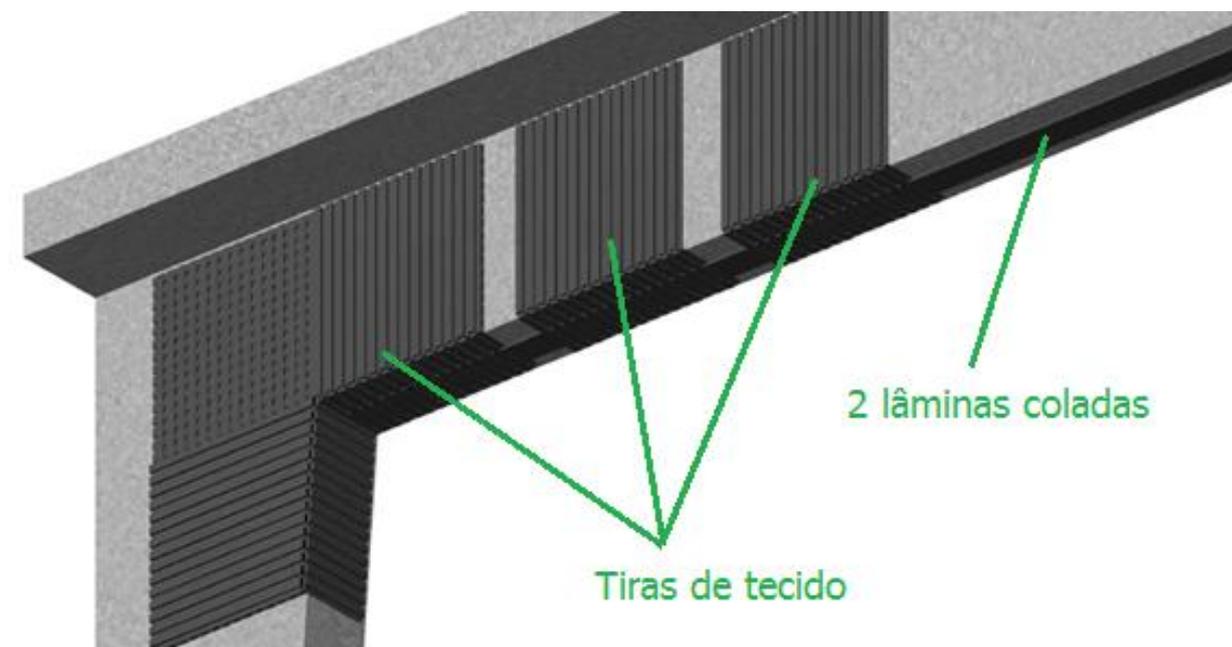


Figura 6.3 - Representação 3D do reforço da viga

6.2 Viga VD815 – Edifício BRS

A planta de forma mostrada na figura abaixo se trata de um pavimento da junta D do edifício BRS. Projeto do escritório de cálculo estrutural Simetria Engenharia.

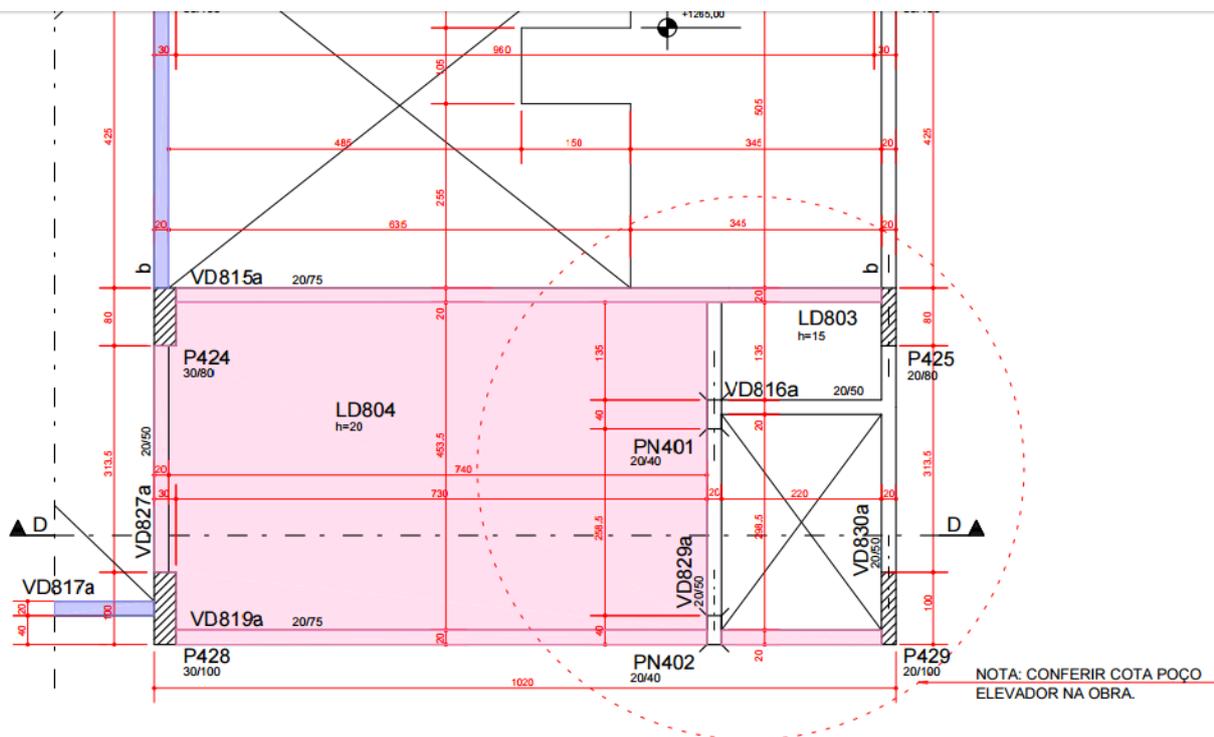


Figura 6.4 - Parte da planta de formas do 8º pavimento do edifício BRS

A viga denominada VD815, bi engastada, seção de 20x75 cm, vão de 10 metros e $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$ não foi projetada para receber as cargas oriundas da laje LD804, pois em seu lugar anteriormente existia um vazio. As cargas distribuídas citadas são consideravelmente altas, pois se trata da laje que suporta as caixas d'água do prédio, totalizando $1,5 \text{ t/m}^2$. Logo, a viga que antes continha uma armadura positiva de $9,42 \text{ cm}^2$, armadura negativa de $6,15 \text{ cm}^2$ e armadura de cisalhamento de estribos de $6,3 \text{ mm}$ a cada 16 cm , apresentava um déficit de área de aço, em todas as armaduras. A figura 7.5 descreve os procedimentos e detalha o reforço com barras de aço coladas.

PROCEDIMENTOS :

- 1) APICOAR LATERAIS, FUNDO E FACE SUPERIOR DAS VIGAS QUANDO NECESSÁRIO PARA COLAGEM DE ARMADURA POSITIVA, NEGATIVA E ESTRIBOS.
DEIXAR ESTRIBOS EXISTENTES EXPOSTOS.
- 2) LAVAR BEM PARA A RETIRADA DE RESÍDUOS SOLTOS.
- 3) GRAMPEAR E COLAR COM ARGAMASSA EPOXÍDICA (QUARTZO MAIS EPOXI) GARANTINDO SEMPRE ESPAÇO DE (1 cm) ENTRE ARMAÇÃO E CONCRETO EXISTENTE.
- 4) UTILIZAR ARGAMASSA EPOXÍDICA COM ESPESSURA DE =5cm (COBRIMENTO DAS ARMADURAS = 2,5 cm).
- 5) O REFORÇO DEVERA SER EXECUTADO SOMENTE POR FIRMA ESPECIALIZADA COM EXPERIÊNCIA COMPROVADA NO RAMO.

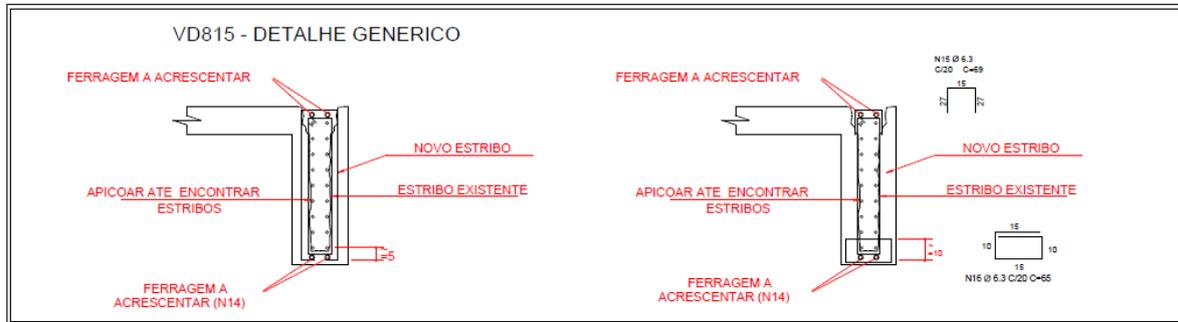


Figura 6.5 - Reforço em barras de aço coladas

As armaduras adicionadas são $2\phi 20$ na posição N14, $4\phi 16$ para a armadura negativa nas extremidades da viga, e estribos de $\phi 8$ a cada 30cm.

O objetivo deste estudo de caso será dimensionar para esta viga, o reforço utilizando compósitos de fibra de carbono, tanto a flexão quanto ao cisalhamento, comparando os resultados dos dois métodos de cálculo estudados e se possível fazer um comparativo qualitativo com a tecnologia (de barras de aço coladas) já especificada no documento.

• Dados de entrada

Por meio da modelagem do edifício já existente no software TQS, foram obtidos os diagramas de esforços solicitantes na viga. Considerando que a viga deverá ser reforçada antes do acréscimo da laje, os valores dos momentos observados nestes diagramas serão adotados como M_0 (momento atuante durante o reforço).

Após se acrescentar a laje e as sobrecargas atuantes no modelo do TQS, novos diagramas foram gerados. Abaixo são listados, respectivamente, os esforços característicos à esquerda, no meio e à direita da viga:

Esquerda: $M_k = -212,9$ kN.m e $V_k = 220,4$ kN.

Meio: $M_k = 314,8$ kN.m.

Direita: $M_k = -95,3$ kN.m e $V_k = -179,5$ kN.

A partir destes dados e das informações já contempladas na apresentação deste estudo de caso utilizou-se a planilha e os dois softwares para o dimensionamento.

- **Resultados do dimensionamento para a extremidade esquerda da viga**

	Planilha FIB		Planilha ACI		LaSoft		Sika Carbodur	
Dimensionamento	Msd	-319,35 kN.m	ϕM_n	-260,81012 kN.m	Msd	-307,5 kN.m	Mn	-319,56 kN.m
	Vsd	330,60 kN	Vn	270,00 kN	Vsd	- kN	Vn	- kN
	Mo	-101,9 kN.m	Mo	-101,9 kN.m	Mo	-101,9 kN.m	Mo	-101,9 kN.m
	ϵ_0	0,0013	Ebi	0,0016	ϵ_0	0,00146	ϵ_{bi}	0,00144
	X	8,95 cm	c	16,68 cm	x	13,09 cm	c	12,3 cm
	Ec	0,0013	ϵ_c	0,0018705	ϵ_c	0,0022	ϵ_c	0,0024
	ϵ_{s1}	0,0094	ϵ_s	0,0061	ϵ_{s1}	0,0092	ϵ_s	0,0069
	Ef	0,0085	ϵ_{fe}	0,0050	ϵ_f	0,0088	ϵ_{fe}	0,0061
	$\epsilon_{f,lim}$	0,0085	ϵ_{fd}	0,014535	$\epsilon_{f,lim}$	0,00883	ϵ_{fd}	0,014535
	Af	1,4171124 cm ²	Af	1,8538338 cm ²	Af	1,32 cm ²	Af	2,16 cm ²
ELS	Msk	-212,9 kN.m	Mn	-212,9 kN.m	Msk	-212,9 kN.m	Mn	-212,9 kN.m
	Vsk	220,4 kN	Vn	220,4 kN	Vsk	220,4 kN	Vn	220,4 kN
	Xe	14,87 cm	c'	8,91 cm	xe	14,92 cm	c'	15,3 cm
	Σc	20,42 MPa	$f_{c,s}$	9,85 MPa	σ_c	22,2 MPa	$f_{c,s}$	19,61 Mpa
	Σs	453,92 MPa	$f_{y,s}$	461,14 MPa	σ_s	488,65 MPa	$f_{y,s}$	458,63 Mpa
	Σf	385,45 MPa	$f_{f,s}$	138,89 MPa	σ_f	214,78 MPa	$f_{f,s}$	156,27 Mpa
	Lb	- cm	ldf	- cm	lb	- cm	ldf	-
Cisalhamento	Vsd	330,60 kN	Vn	270,00 kN				
	Vcd	162,82 kN	Vc	121,34 kN				
	Vwd	52,63 kN	Vs	56,19 kN				
	Vfd	115,15 kN	Vf	79,91 kN				
	Af	5,91 cm ² /m	Af	10,16 cm ² /m				
	Tf	0,167 cm	Tf	0,167 cm				
	bf/sf	0,354	bf/sf	0,608				

Tabela 6.2 - Esquerda do vão – Viga VD815

• **Resultados do dimensionamento para o meio da viga**

	Planilha FIB	Planilha ACI	LaSoft	Sika Carbodur				
Dimensionamento	Msd	471 kN.m	ϕM_n 418,06565 kN.m	Msd	471 kN.m	Mn	430,16 kN.m	
	Vsd	- kN	Vn - kN	Vsd	- kN	Vn	- kN	
	Mo	163,6 kN.m	Mo	163,6 kN.m	Mo	163,6 kN.m	Mo	163,6 kN.m
	ϵ_0	0,0014	ϵ_{bi}	0,0017	ϵ_0	0,00150	ϵ_{bi}	0,00137
	X	13,56 cm	c	19,93 cm	x	17,97 cm	C	16,31 cm
	Ec	0,0019	ϵ_c	0,0020974	ϵ_c	0,0028	ϵ_c	0,0016
	ϵ_{s1}	0,0081	ϵ_s	0,0054	ϵ_{s1}	0,0080	ϵ_s	0,0053
	Ef	0,0071	ϵ_{fe}	0,0041	ϵ_f	0,0074	ϵ_{fe}	0,0043
	$\epsilon_{f,lim}$	0,0085	ϵ_{fd}	0,014535	$\epsilon_{f,lim}$	0,00883	ϵ_{fd}	0,014535
	Af	2,5501636 cm ²	Af	4,0569408 cm ²	Af	2,14 cm ²	Af	4,08 cm ²
ELS	Msk	314 kN.m	Mn	314 kN.m	Msk	314 kN.m	Mn	314 kN.m
	Vsk	- kN	Vn	- kN	Vsk	- kN	Vn	- kN
	Xe	17,94 cm	c'	14,78 cm	xe	18,24 cm	c'	18,6 cm
	Σc	25,34 MPa	$f_{c,s}$	15,88 MPa	σ_c	26,45 MPa	$f_{c,s}$	23,56 MPa
	Σs	441,47 MPa	$f_{y,s}$	448,18 MPa	σ_s	457,83 MPa	$f_{y,s}$	443,26 MPa
	Σf	376,08 MPa	$f_{f,s}$	115,86 MPa	σ_f	206,75 MPa	$f_{f,s}$	134,8 MPa
	Lb	- cm	ldf	- cm	lb	- cm	ldf	-

Tabela 6.3 - Meio do vão – Viga VD815

• **Observações**

A deformação do CFC no estado limite último é mais limitada no método do ACI devido o cálculo do ϵ_{fe} gerar valores menores que aqueles propostos pelos anexos nacionais da FIB (8,5‰ na planilha e 8,83‰ no LaSoft). Talvez por esse fato, no ELU o dimensionamento se mostrou novamente mais conservador pelo método do ACI. Tanto comparando os softwares como as planilhas.

No entanto, observa-se que em nenhum dos cálculos das verificações do Estado Limite de Serviço tivemos a tensão no aço dentro do limite, que para ambas as normas é 0,8 da tensão de escoamento, o que, no caso, resulta em 400 MPa.

Logo, o dimensionamento do reforço à flexão foi condicionado pelo ELS. Por meio de tentativa e erro, o campo da área real de lâminas de fibra de carbono foi alterado nas ferramentas de cálculo até se satisfazerem os limites de tensões. As áreas resultantes para a extremidade esquerda da viga foram:

- 5,2 cm² para a Planilha FIB;
- 7,0 cm² para a Planilha ACI;
- 5,8 cm² para o software LaSoft;
- 7,2 cm² para o software SikaCarbodur.

E as áreas necessárias de reforço para o meio do vão foram:

- 6,9 cm² para a planilha da FIB;
- 14,36 cm² para a planilha do ACI;
- 7,84 cm² para o software LaSoft;
- Mais do que 14,04 cm² (máximo permitido) pelo software SikaCarbodur.

Novamente o que se observa é que o método do ACI, para este caso gerou uma maior área de CFC necessária, tanto para o reforço à flexão quanto ao cisalhamento (considerado igual a zero no meio do vão).

Outra observação que deve ser feita para a extremidade da viga é que o comprimento de ancoragem não é verificado já que o reforço deve de alguma forma ser ancorado no pilar ao qual a viga é engastada. Isso pode ser feito por meio da superposição de tecidos de fibra de carbono ou por produtos pré-fabricados conhecidos como mechas ou cordas unidirecionais de fibra de carbono. Neste quesito, o método do ACI se torna mais apropriado por determinar uma área mínima de tecido envelopando a viga para proporcionar o “aperto” da armadura de flexão. No caso ela foi calculada igual a 4cm²/m para o “aperto do reforço negativo” e 7,28cm²/m para o “aperto do reforço positivo”. Ambos valores são satisfeitos pela área calculada para se reforçar ao cisalhamento (10,16 cm²/m). Além disso, o fato de o ACI limitar as deformações da lâmina de carbono a um valor mais baixo contribui justamente para evitar o fenômeno de peeling-off ou descolamento na extremidade do reforço. Abaixo é apresentado um esquema de como seria reforçada a viga assumindo o resultado obtido pelo método do ACI:

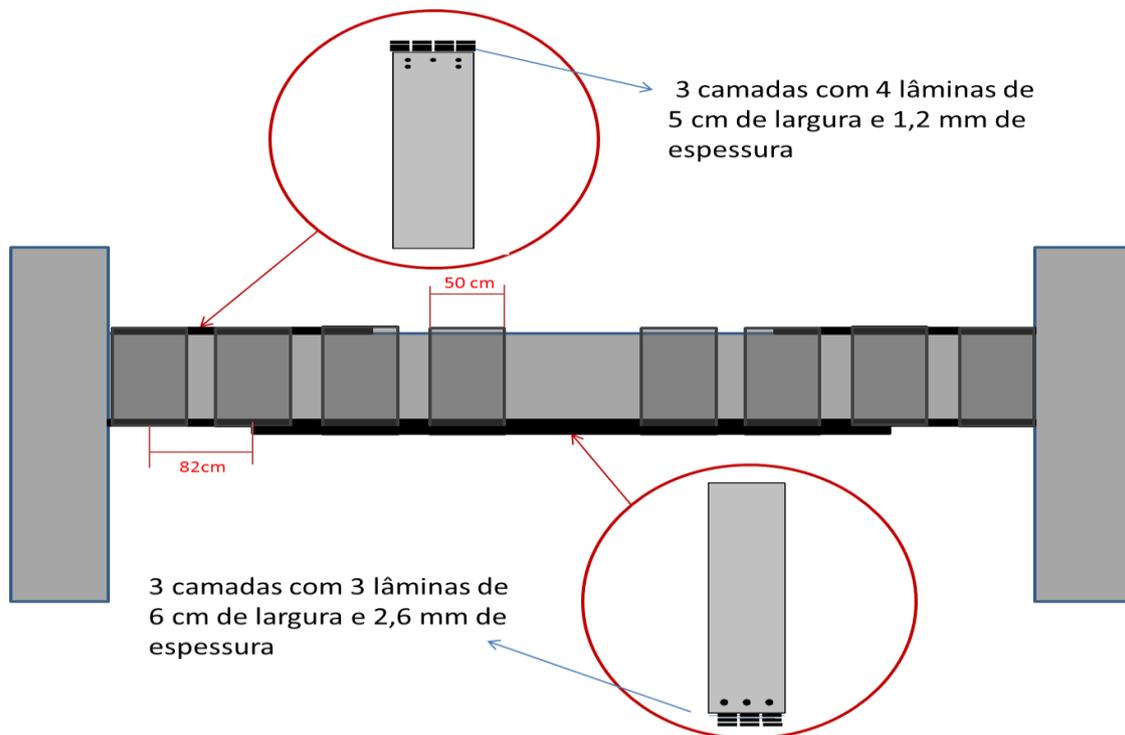


Figura 6.6 - Reforço em CFC da viga VD815

• **Análise Comparativa**

O presente caso, quando analisado de uma ótica precedente ao dimensionamento, se apresenta como extremamente propício e viável para receber o reforço em CFC. A viga seria reforçada antes de receber a sobrecarga advinda da laje e nada impede que o reforço ao cisalhamento seja feito na disposição em forma de “O” ou contínuo, o que é mais recomendado para que se evite o descolamento e que proporciona um melhor “aperto” do reforço à flexão. Levando apenas esses fatores em conta, o reforço em CFC é muito mais vantajoso por ser muito mais rápido e fácil de executar, além de não ser destrutivo.

No entanto, como a sobrecarga é muito elevada o que acabou condicionando o dimensionamento foi o estado limite de serviço, e a área necessária das lâminas de fibra de carbono resultou muito grande, próxima até das áreas de barras de aço de reforço. Por ser um material ainda escasso no mercado brasileiro e, portanto, mais caro, a viabilidade econômica começa a ser questionável.

6.3 Abertura em laje – Edifício Monnet 4

Esse é outro caso de reforço do escritório Clair’Equeaux, no qual foi efetivamente reforçada uma laje de 7,70m x 6,00m e espessura de 25cm, apoiada nos 4 bordos, que vai sofrer uma abertura de 3,00m x 2,80m.

A carga de utilização da laje é considerada 1,0 kN/m², visto que se trata de uma cobertura inacessível. Além disso, em volta da abertura, será construída uma pequena mureta de 40 cm que será encarada como uma carga linear de 2,68 kN/m.

Para o cálculo do reforço ao redor da abertura, 2 simplificações serão feitas. Uma viga fictícia de 50cm de largura e 25cm de altura será considerada no bordo mais crítico da abertura. A seção de CFC encontrada será então usada nas duas direções.

O valor de $M_o=6,30$ kN.m foi obtido da modelagem no software TQS da laje sem a abertura. Este é o momento na maior direção da laje (atuante na região da viga fictícia). Considera-se ainda que o reforço é colado antes da abertura e que nesse instante atuam apenas as cargas permanentes.

Utilizando-se novamente o software TQS, a laje, já com a abertura foi modelada. Analisando os resultados gerados pelo modelo de grelha, obteve-se o momento máximo na borda da abertura $M_{sk}=13$ kN.m.

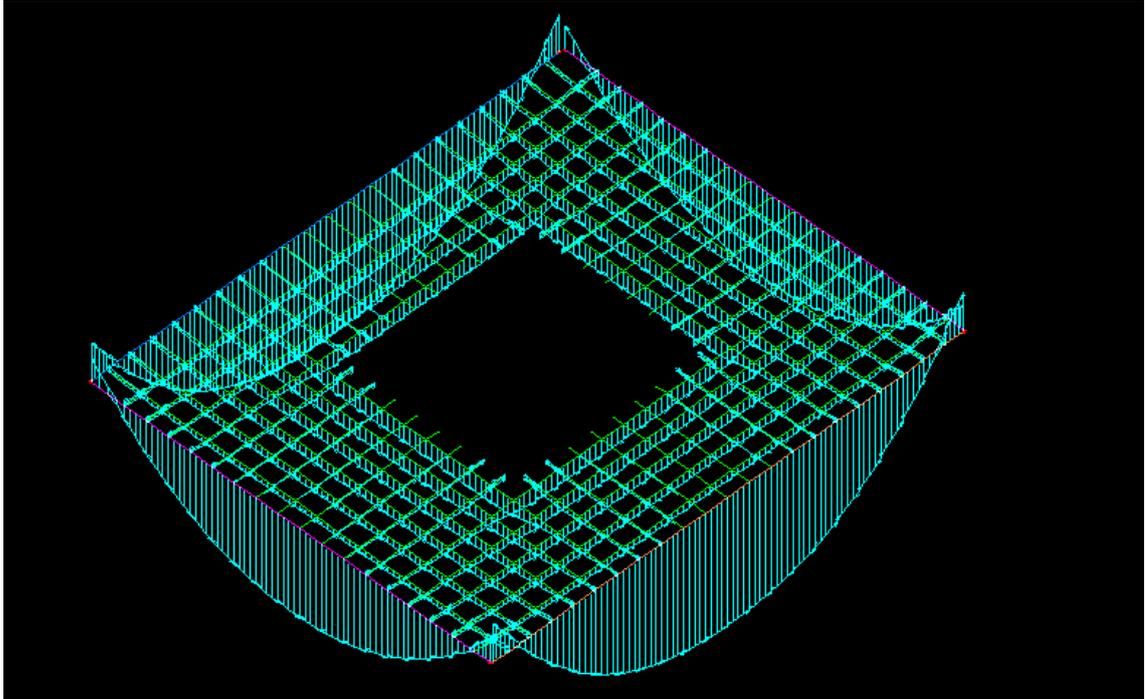


Figura 6.7 - Modelagem TQS - Laje com abertura

A armadura positiva presente na viga fictícia, admitindo o caso mais desfavorável é de 2 barras de 10,0mm de diâmetro ($1,58 \text{ cm}^2$ de área de aço), uma vez que a laje é armada com $3,95 \text{ cm}^2/\text{m}$, correspondente a barras de 10 mm de diâmetro a cada 20 cm.

• Dados de entrada

A partir da análise explicitada acima se obtiveram os seguintes dados de entrada:

- Viga fictícia de 50 cm de largura e 25 cm de altura;
- F_{ck} de 25 MPa;
- Momento atuante no instante do reforço (M_o): 6,30 kN.m;
- Momento solicitante característico (M_{sk}): 13 kN.m;
- Armadura positiva de flexão na viga fictícia $A_s = 1,58 \text{ cm}^2$;

Entrando com os dados acima nas ferramentas de dimensionamento já citadas gera-se a tabela de resultados:

• Resultados do dimensionamento

	Planilha FIB	Planilha ACI	LaSoft	Sika Carbodur
Dimensionamento	Msd	19,5 kN.m	ϕM_n 19,025797 kN.m	Msd 19,5 kN.m Mn 18,21 kN.m
	Vsd	- kN	Vn - kN	Vsd - kN Vn - kN
	Mo	6,3 kN.m	Mo 6,3 kN.m	Mo 6,3 kN.m Mo 6,3 kN.m
	ϵ_0	0,0011	ϵ_{bi} 0,0013	ϵ_0 0,00117 ϵ_{bi} 0,0012
	x	1,21 cm	c 9,24 cm	x 2,67 cm c 2,7 cm
	ϵ_c	0,0004	ϵ_c 0,0026585	ϵ_c 0,0012 ϵ_c 0,0008
	ϵ_{s1}	0,0066	ϵ_s 0,0038	ϵ_{s1} 0,0086 ϵ_s 0,0059
	ϵ_f	0,0063	ϵ_{fe} 0,0033	ϵ_f 0,0088 ϵ_{fe} 0,0048
	$\epsilon_{f,lim}$	0,0085	ϵ_{fd} 0,014535	$\epsilon_{f,lim}$ 0,00883 ϵ_{fd} 0,014535
	Af	0,1772515 cm ²	Af 0,6448864 cm ²	Af 0,19 cm ² Af 0,24 cm ²
ELS	Msk	13 kN.m	Mn 13 kN.m	Msk 13 kN.m Mn 13 kN.m
	Vsk	- kN	Vn - kN	Vsk - kN Vn - kN
	xe	3,27 cm	c' 1,39 cm	xe 3,25 cm c' 3,54 cm
	σ_c	7,05 MPa	$f_{c,s}$ 2,46 MPa	σ_c 8,93 MPa $f_{c,s}$ 6,79 MPa
	σ_s	343,48 MPa	$f_{y,s}$ 330,57 MPa	σ_s 396 MPa $f_{y,s}$ 374,64 MPa
	σ_f	310,46 MPa	$f_{f,s}$ 94,16 MPa	σ_f 179,91 MPa $f_{f,s}$ 132,42 MPa
	lb	21,20 cm	ldf 41,108651 cm	lb 1 cm ldf -

Tabela 6.4 - Resultado Monnet 4

• Observações

Analisando o resultado obtido da modelagem em grelha discretizada em uma malha de 25 cm de espaçamento, observa-se que a região que sofre concentração de tensão e que, portanto, um aumento significativo do momento solicitante é realmente a mesma abrangida pela viga fictícia. Isso faz razoável e aplicável a hipótese de se reforçar apenas a referida faixa de 50 cm em torno da abertura.

O reforço ao cisalhamento não se aplica no caso de lajes e logo, não foi calculado. Ainda assim, faz-se necessário verificar se a parcela resistente do concreto resistente ao cisalhamento é suficiente.

O comprimento de ancoragem das placas adotadas se mostrou suficiente por ambos os métodos se este se estender de uma borda a outra da laje. Ainda assim, é aconselhável prever uma ancoragem adicional como a mecha pré-fabricada mencionada no caso anterior ou uma tira de tecido que faça o “aperto” da extremidade.

• Análise Comparativa

Comparando as 4 colunas da tabela de resultados, tem-se que o único resultado divergente dos demais foi o da planilha ACI. A resolução do sistema indeterminado de equações apontou para uma solução em que o equilíbrio entre o binário resistente e o momento solicitante é atingido na seção crítica com uma linha neutra mais baixa, uma

maior deformação do concreto e uma área de CFC maior e conseqüentemente menos deformada.

Optando por descartar este resultado e comparando os valores obtidos pelo método da FIB com os do software Sika Carbodur, são obtidas áreas necessárias de CFC para o reforço bem próximas, que traduzidas em valores de produtos comerciais provavelmente não apresentariam diferença. Ainda assim, o método do ACI exigiu mais uma vez, uma maior área de CFC.

7 CONCLUSÃO

Este estudo contou com uma exposição teórica bastante abrangente, abordando a caracterização dos compósitos de fibra de carbono, suas vantagens e desvantagens. Apresentaram-se ainda, as técnicas de aplicação do reforço, que vem sendo cada vez mais amadurecidas e têm apresentado segurança quando observamos os resultados de testes reais recentes. Por fim, e como um dos objetivos deste trabalho, compararam-se os métodos consagrados de dimensionamento do reforço em CFC que foram aplicados em três estudos de caso distintos.

A tabela comparativa do capítulo 6 nos permite avaliar os métodos qualitativamente, perceber que as hipóteses, premissas e até processos iterativos de obtenção de resultados se assemelham, mas que têm particularidades, como os coeficientes de segurança e deformações limites a serem adotadas. Este último ponto se mostra determinante para que ocorram as divergências de resultados nos estudos de caso.

Enquanto a recomendação da *fib* deixa o limite de deformação do CFC para reforço à flexão ser adotado pelo projetista baseado em anexos nacionais ou pesquisas, o ACI estabelece a deformação máxima efetiva por meio da equação (4.3), e limita ainda a 0,9 do valor especificado pelo fabricante. Em todos os estudos de caso esse valor (ϵ_f) ficou abaixo de 0,006, tanto na planilha quanto no software que dimensionam pelo método do ACI. Enquanto isso, o valor limite adotado para o método da *fib* foi de 0,0085 na planilha e 0,00883 no software (LaSoft 3.1).

Apesar dos valores das solicitações de cálculo serem sempre maiores pelo método da *fib*, devido ao fato apresentado, de que o ACI restringe mais a deformação do compósito, em todos os estudos de caso o resultado do dimensionamento foi mais conservador utilizando o método de dimensionamento do ACI, ou seja, resultava em uma maior área de CFC necessária para o bom funcionamento do reforço.

Ainda que seja possível chegar a essa conclusão para os estudos de caso tratados neste trabalho, não se deve generalizá-la. É importante observar que todos os casos tratam de estabelecimentos comerciais e residenciais, com os maiores vãos típicos medindo de 7 a 10 metros de comprimento. A norma americana surgiu em um cenário em que o reforço com CFC estava sendo amplamente utilizado para obras de arte, pontes e viadutos, que possuem uma escala muito maior, tanto de vãos quanto de cargas. Além disso, neste tipo de obra, existem fatores adicionais a serem considerados, como a vibração e a aplicação de cargas cíclicas, e são observadas maiores flechas e maiores rotações. Estes elementos podem ser suficientes para justificar um maior conservadorismo, e pode ser que para este tipo de estruturas o método do ACI acabe sendo mais adequado.

Uma vez que nos voltamos para o cenário em que se inserem os estudos de caso aqui apresentados, nos deparamos com elementos de dimensões habituais que já foram amplamente ensaiados em diversas pesquisas. CASTRO (2005) concluiu em sua pesquisa, na qual foram ensaiadas mais 50 vigas “T”, que a deformação máxima medida

no reforço antes da ruptura atingiu, na média, 11‰, e que mesmo as rupturas por descolamento ou destacamento, não foram prematuras ou sem aviso. Ainda em sua pesquisa, tanto o ACI 440-2R quanto o boletim 14 da *fib* acertaram satisfatoriamente a previsão do modo de ruptura das peças (75% e 68% respectivamente). Assim sendo, para estes casos, se buscarmos o método mais econômico e que mais se mostrou condizente com as observações expostas, este seria o método da *fib*.

Os três estudos de caso aqui apresentados e suas conclusões, mostram que cada caso é um caso, e deve ser estudado e encarado como único. O caso da Viga VD815 é um exemplo de situação em que à primeira vista o reforço com CFC é adequado e até vantajoso, uma vez que é possível envelopar completamente a viga para o reforço ao cisalhamento e que sua aplicação será simples e prática. No entanto, se tratando de uma viga pouco larga e que, portanto, possui uma área de concreto reduzida pra suportar a compressão, ao se fazer as verificações do ELS, a solução do reforço em CFC acaba se tornando questionável economicamente.

Muitas são as aplicações dessa tecnologia de reforço estrutural e em muitos casos pode ser a solução mais adequada. Enquanto não temos uma norma brasileira que regulamente o uso dos compósitos de fibra de carbono para reforço de estruturas, cabe aos projetistas optarem pelo método de dimensionamento caso a caso, sempre atentando para aspectos como segurança, responsabilidade, economia e contexto no qual se insere.

7.1 Sugestão para trabalhos futuros

- Comparação dos métodos de cálculo para o reforço de pilares com CFC.
- Estudos de casos para obras de arte, pontes e viadutos.
- Reforço de lajes e vigas utilizando Compósitos de Fibra de Carbono protendidos.
- Modelagens computacionais pelo método de elementos finitos que testem os resultados sugeridos pelos métodos.

8 ANEXOS

• Anexo I – Planilha de Cálculo – Boletim 14 da *fib*

DADOS DE ENTRADA		DIM. FLEXÃO		1,33	%	VERIFICAÇÕES				
b	20 cm	σc	32,14285714 MPa			xe	14,86681 cm			
h	75 cm	Vsd	308,56 kN			x=8,94934	αf	4,667591		
d	71,5 cm	Msd	319,35 KN.m				ec	0,000596		
d1	3,5 cm	εc	0,001330207				Tensões			
d2	4 cm	εf,lim	0,0085	8,50	%	σc	20,42301	27	OK	
fck	45 MPa	εf	0,008499999			σs	453,9163	400	FALSO	
Es	200000 MPa	Ec	34278,9221 MPa			σf	385,4495	1120	OK	
Ef	160000 MPa	αs	5,834489178			Comprimento de Ancoragem				
As1	6,15 cm ²	Xo	14,32345921 cm			fctm	5,788057 MPa	M(x)	-2,1E-12	
As2	0 cm ²	I02	0,001368951 m4			Mcr	11,99619 kN.m			
Asw	1,88 cm ² /m	εc0	0,000311034			x	0,054303 m			
q	18,8 kN/m	ε0	0,001317589			lb	-0,26745 m	OK		
Vsk	220,4 kN	x	8,94934987 cm			lb,máx	5,432222 m			
Mo	101,9 kN	Af	1,417112357 cm ²	nº de laminas	1	Verificações				
Msk	212,9 KN.m	tf	0,14 cm	Af,real	1,4					
Resolver		bf	10 cm	Af,real>Af	par lâminas					
DIM. CISCALHAMENTO		es1	0,009359435 OK							
Vsd	330,60 kN	Resolver								
Vcd	162,824676 kN									
VRd2	1017,649286 kN									
Vwd	52,62543 kN									
Vfd	115,15 kN									
Tipo	Reforço Contínuo									
efd,e	1,89391E-05									
pf	0,29526077									
tf	0,167 cm									
Af	5,905215401 cm ²									
bf/sf	0,353605713									
sf	141,4004305 cm									

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI - American Concrete Institute Committee 318 - *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*. Farmington Hills, Michigan, 2011.
- ACI - American Concrete Institute Committee 440 - *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento, 2014.
- _____. NBR 6120: Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações, 1980.
- ALTAIR SANTOS MTB 2330, Entrevista de Gustavo Pérez, 2015.
- ARAÚJO, A. S. Reforço ao cisalhamento de vigas “T” de concreto armado com fibra de carbono com dois tipos de ancoragem - Dissertação de Mestrado, Publicação E. DM. 006A/2002. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. 2002. 201 p.
- BEBER, A. J. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono - Tese de Doutorado em Engenharia. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2003.
- BS EN 1992, Eurocode 2: *Design of concrete structures*, 2006.
- CASTRO, ELIANE KRAUS - Reforço em Vigas “T” de Concreto Armado com Vários Tipos de Compósitos em Entalhes no Cobrimento de Concreto (CEC) [Distrito Federal] 2005.
- FIB, International Federation for Structural Concrete - *Bulletin 14 - Externally Bonded FRP reinforcement for RC structures*, 2001.
- KANEGAE, MITSUO NOGUEIRA – Estudo de Reforço ao Cisalhamento de vigas de concreto armado com Compósitos de Fibra de Carbono [Distrito Federal] 2015. 65p.
- KHALIFA, A; Gold, W. J.; NANNI, A. ; AZIZ, M. I. A. - *Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members*. ASCE- Journal of Composites for Construction, Vol. 2, n.4.Nov 1998, p. 195-203.
- MACHADO, ARI DE PAULA – Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono, VIAPOL.
- SIKA SERVICES AG – Guia do Usuário Sika CarboDur Software de Cálculo, 2014.
- NORBERTO B. LICHTENSTEIN – Patologia das Construções, Boletim técnico 06/86, 1986.
- OLIVEIRA JUNIOR, F. S. - Reforço à Flexão de Vigas “T” de Concreto Armado com Colagem Externa e Inserção de Compósitos com Fibra de Carbono e Barras de Aço no Concreto de

Cobrimento - Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM – 009A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p., 2005.

SOUZA, VICENTE CUSTÓDIO - THOMAZ RIPPER – Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto, Pini, 1998.

SALLES NETO, M. Comportamento ao cisalhamento de Vigas “T” de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono - Dissertação de Mestrado, Publicação DM 012A/00, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 219 p. 2000.

TES-TECHNIFOR – Le Specialiste du Renforcement Structurel. 2015.