



**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE
REFORÇOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO À FLEXÃO COM POLÍMERO
REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO**

LEONARDO RONCETTI

VITÓRIA
2011



LEONARDO RONCETTI

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE
REFORÇOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO À FLEXÃO COM POLÍMERO
REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em Patologia nas Obras Civas, Pós-graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Civas.

Orientador: Prof. M.Sc. Luís César Siqueira De Luca.

VITÓRIA

2011

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO À FLEXÃO COM POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO

Por

LEONARDO RONCETTI

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS OBRAS CIVIS, NO
INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS PROFESSORES A SEGUIR
MENCIONADOS.

Vitória (ES), 02 de dezembro de 2011

Prof. M. Sc. Luis César Siqueira De Luca
Professor Orientador

Prof. M. Sc. César Henrique Sato Daher

Prof. M. Sc. Jorge Mikaldo Júnior

AGRADECIMENTOS

Ao Deus da Bíblia, que proveu todas as coisas para que eu pudesse chegar ao fim deste desafio.

Aos meus pais, sem os quais não haveria este curso.

Aos meus funcionários, pela paciência.

Ao professor orientador Luis César Siqueira De Luca, pela motivação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	HIPÓTESE.....	16
1.4	JUSTIFICATIVAS	16
1.4.1	Justificativa tecnológica	16
1.4.2	Justificativa social	17
1.4.3	Justificativa ecológica.....	18
1.4.4	Justificativa econômica.....	18
1.5	LIMITAÇÕES DE PESQUISA.....	19
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
1.7	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	HISTÓRICO	21
2.2	PRFC E MATERIAIS CONSTITUINTES	22
2.2.1	Resinas.....	22
2.2.2	Matriz	23
2.2.3	Fibra de carbono	23
2.2.4	Revestimentos protetores.....	25
2.3	APLICAÇÕES DOS SISTEMAS COM PRFC.....	26
2.4	ESTADO ATUAL DA NORMALIZAÇÃO DE PROJETO COM PRFC.....	27
2.4.1	FIB <i>Bulletin</i> 14	28
2.4.2	<i>Concrete Society</i>	28
2.4.3	<i>Pre-code</i> SIA166	28
2.4.4	CNR-DT 200/2004	28
2.4.5	ACI 440.2R-08	29

2.4.6	ISIS <i>Design Manual</i> 4	29
2.4.7	JSCE STANDART SPECIFICATION	30
2.5	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO EM ESTUDOS	30
2.5.1	Método do ACI 440.2R-08.....	31
2.5.1.1	Visão Geral.....	31
2.5.1.2	Premissas principais	31
2.5.1.3	Formulação.....	32
2.5.2	Método do ISIS.....	39
2.5.2.1	Visão geral.....	39
2.5.2.2	Premissas principais	39
2.5.2.3	Formulação.....	39
2.5.3	Método do FIB <i>Bulletin</i> 14.....	43
2.5.3.1	Visão geral.....	43
2.5.3.2	Formulação.....	44
3	APLICAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	48
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES	48
3.1.1	Viga de concreto armado.....	48
3.1.2	Cargas e esforços	49
3.1.3	Materiais	50
3.2	APLICAÇÃO NUMÉRICA	51
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
4.1	CÁLCULO DA ÁREA DE FIBRA.....	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS MÉTODOS ESTUDADOS	60
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A ANÁLISE NUMÉRICA	61
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
	APÊNDICE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades de algumas fibras de carbono utilizadas em PRFC e outros materiais.	24
Tabela 2.2. Fator de redução ambiental para vários sistemas FRP e condições de exposição, ACI (2008).	33
Tabela 2.3. Tensões limite no reforço de PRF para estado limite de serviço para fibra de vidro, fibra de aramida e fibra de carbono (ACI, 2008).	38
Tabela 2.4. Tabela comparativa dos principais parâmetros dos métodos em estudo utilizando fibra de carbono.	47
Tabela 3.1. Propriedade das fibras de carbono.	50
Tabela 3.2. Características da viga.	50
Tabela 4.1. Exemplo de resultado do cálculo da área mínima de fibra, A_f , em mm^2 , entre os três métodos, para uma determinada combinação.	53
Tabela 4.2. Métodos com o menor consumo de fibra para cada combinação de parâmetros. Fibra SikaWrap-300 C/60.	55
Tabela 4.3. Métodos com o menor consumo de fibra para cada combinação de parâmetros. Sika CarboDur S.	56
Tabela 4.4. Métodos com o menor consumo de fibra para cada combinação de parâmetros. Sika CarboDur M.	57
Tabela 4.5. Métodos com o menor consumo de fibra para cada combinação de parâmetros. Sika CarboDur H.	58
Tabela 4.6. Participação dos métodos quanto à conduzir ao menor consumo de fibras para as combinações analisadas.	59
Tabela A.1. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do ACI. Fibra SikaWrap-300 C/60.	66
Tabela A.2. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do ACI. Fibra SikaCarboDur S.	67
Tabela A.3. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do ACI. Fibra SikaCarboDur M.	67
Tabela A.4. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do ACI. Fibra SikaCarboDur H.	68

Tabela A.5. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do ISIS. Fibra SikaWrap-300 C/60.	68
Tabela A.6. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do ISIS. Fibra SikaCarboDur S.	69
Tabela A.7. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do ISIS. Fibra SikaCarboDur M.	69
Tabela A.8. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do ISIS. Fibra SikaCarboDur H.	70
Tabela A.9. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do FIB. SikaWrap-300 C/60....	70
Tabela A.10. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do FIB. Fibra SikaCarboDur S.	71
Tabela A.11. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do FIB. Fibra SikaCarboDur M.	71
Tabela A.12. Área mínima de fibra calculada (mm^2). Método do FIB. Fibra SikaCarboDur H.	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (RJ) após implosão de um trecho, devido à problemas estruturais.	17
Figura 2.1. Gráfico de tensão versus deformações de fibras e aços.	25
Figura 2.2. Materiais componentes do sistema PRF (acervo do autor).	26
Figura 2.3. Deformações internas e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão no estado limite último, adaptado de ACI (2008).	35
Figura 2.4. Deformações internas e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão no estado limite de serviço, adaptado de ACI (2008).	35
Figura 2.5. Tensão interna e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão no estado limite último, adaptado de ISIS (2008).	42
Figura 2.6. Tensão interna e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão no estado limite último, adaptado de FIB (2001).	44
Figura 3.1. Viga apoiada com reforço de PRF, adaptado de ACI (2008).	49
Figura 4.1. Momento fletor resistente em função da área de fibra.	52
Figura 4.2. Exemplo de curvas de área mínima calculada em função da taxa de armadura da seção, para os tipos de fibra utilizados.	54

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

Letras latinas

A_{FRP}	–	Área da seção transversal do reforço de PRF
A_f	–	Área da seção transversal do reforço de PRF
A'_s	–	Área da seção transversal da armadura passiva longitudinal de compressão
A_s	–	Área da seção transversal da armadura passiva longitudinal de tração
A_{s1}	–	Área da seção transversal da armadura passiva longitudinal de tração
A_{s2}	–	Área da seção transversal da armadura passiva longitudinal de compressão
b	–	Largura da seção transversal
c	–	Distância entre a fibra mais comprimida e linha neutra da seção
c_b	–	Distância da fibra mais comprimida até a linha neutra da seção transversal para situação balanceada
C_c	–	Resultante da força devido à tensão de compressão no concreto inferior a f'_c
d	–	Altura útil da seção. Distância entre a fibra mais comprimida e o centróide da armadura tracionada.
d'	–	Distância entre a fibra mais comprimida e o centróide da armadura passiva longitudinal comprimida
E_{FRP}	–	Módulo de elasticidade na tração do PRF
E_f	–	Módulo de elasticidade na tração do PRF
E_{fu}	–	Módulo de elasticidade na tração do PRF na ruptura
f'_c	–	Resistência nominal à compressão do concreto
f_{cd}	–	Resistência de cálculo à compressão do concreto
f_{ck}	–	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{c,s}$	–	Tensão de compressão no concreto em serviço
f_{fe}	–	Tensão efetiva de tração no reforço de PRF na ruptura
$f_{f,s}$	–	Stress level in FRP caused by a moment within elastic of member, psi
f_{fu}	–	Tensão última de tração de cálculo do PRF
f_{fu}^*	–	Tensão última de tração de cálculo do PRF informada pelo fabricante do sistema
f_s	–	Tensão de tração na armadura passiva
$f_{s,s}$	–	Tensão de tração na armadura passiva em serviço
f_y	–	Tensão de escoamento do aço da armadura passiva
f_{yd}	–	Tensão de escoamento do aço da armadura passiva

h	–	Altura total da seção
M_s	–	Momento fletor em serviço na seção
n	–	Número de camadas aplicadas de PRF
R_n	–	Resistência nominal do elemento estrutural
S_{DL}	–	Solicitação nominal para carga permanente
S_{LL}	–	Solicitação nominal para carga variável
t_f	–	Espessura nominal de uma camada de PRF
T_{FRP}	–	Resultante da força devido à tensão de tração no reforço de PRF
T_s	–	Resultante da força devido à tensão de tração na armadura tracionada
x	–	Profundidade da linha neutra

Letras Gregas

α_1	–	Taxa para tensão média de compressão do diagrama retangular para o concreto
β_1	–	Taxa da profundidade do diagrama retangular e a profundidade da linha neutra da seção
ε_0	–	Deformação específica inicial do substrato onde será aderido o PRF
ε_{bi}	–	Deformação específica inicial do substrato onde será aderido o PRF
ε_c	–	Deformação específica do concreto à compressão
ε_{cu}	–	Deformação específica axial última do concreto não confinado
ε_f	–	Deformação específica do PRF
ε_{fd}	–	Deformação específica do reforço de PRF na ruptura por descolamento
ε_{fe}	–	Deformação específica efetiva no reforço de PRF no estado limite último
ε_{fi}	–	Deformação específica inicial do substrato onde será aderido o PRF
ε_{FRP}	–	Deformação específica no reforço de PRF
ε_{FRPu}	–	Deformação última no reforço de PRF
ε_{fu}	–	Deformação específica última de cálculo do PRF
ε_{fud}	–	Deformação específica última de cálculo do PRF
ε_{fu}^*	–	Deformação específica última do PRF
ε_s	–	Deformação específica da armadura passiva tracionada
ε'_s	–	Deformação específica da armadura passiva comprimida
ε_{sy}	–	Deformação específica da armadura passiva tracionada correspondente à tensão de escoamento
ε_{sl}	–	Deformação específica da armadura passiva tracionada

ε_{s2}	–	Deformação específica da armadura passiva comprimida
ε_t	–	Deformação específica da armadura passiva tracionada na tensão nominal máxima
ε_y	–	Deformação específica da armadura passiva tracionada no escoamento
$\emptyset$	–	Fator de minoração da resistência
$\emptyset_c$	–	Fator de minoração da resistência do concreto
$\emptyset_{FRP}$	–	Fator de minoração da resistência do reforço de PRF
$\emptyset_s$	–	Fator de minoração da resistência da armadura passiva
ψ_f	–	Fator de minoração da resistência do reforço de PRF

RESUMO

RONCETTI, L. (2011). *Estudo comparativo entre métodos de dimensionamento de reforços de vigas de concreto armado à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono.* Curso de Pós-Graduação em Patologia nas Obras Cíveis do Instituto IDD.

Orientador: Prof. M.Sc. Luís César Siqueira De Luca.

Este trabalho visa realizar um estudo comparativo dos métodos de dimensionamento de reforços à flexão com polímeros reforçados com fibra de carbono, aplicados à vigas de concreto armado com seção retangular. São analisados três dos principais métodos de dimensionamento, consagrados no mercado mundial: ACI 440.2R-08 de 2008, *ISIS Design Manual* 4 de 2008 e *FIB Bulletin* 14 de 2001, visando comparar a eficácia de cada um quanto ao consumo de fibras. Para o propósito de reforço estrutural, os polímeros reforçados com fibra de carbono têm demonstrado grande eficácia no restabelecimento ou aumento da capacidade resistente das estruturas, sendo a escolha de um método confiável e competitivo, fundamental para o êxito do projeto do reforço. Confrontam-se os métodos de reforço à flexão, analisando-se os parâmetros que influenciam no consumo de fibras, no aproveitamento dos materiais da seção original, indicando qual dos métodos consome menos fibra para uma determinada combinação desses parâmetros. Conclui-se que, dependendo dos parâmetros da peça a ser reforçada, pode-se necessitar de quantidades significativamente diferentes dependendo do método adotado.

Palavras-chave: Reforço estrutural; polímeros, fibra de carbono, otimização.

ABSTRACT

RONCETTI, L. (2011). *Comparative study of design methods for flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fiber-reinforced polymers.* Post-graduation Course of Pathology in Civil Engineering of IDD Institute, Curitiba.

Advisor: Prof. M.Sc. Luís César Siqueira De Luca.

This work aims to perform a comparative study of design methods for flexural strengthening using carbon fiber-reinforced polymers, applied to reinforced concrete beams with rectangular cross section. Three of the main design methods are analyzed: ACI 440.2R-08 of 2008, ISIS Design Manual 4 of 2008 and FIB Bulletin 14 of 2001, aiming to compare the effectiveness of each for the consumption of fiber. For the purpose of structural reinforcement, carbon fiber-reinforced polymers are showing great performance in restoring or increasing the resistance of existing structures, as the choice of a reliable and competitive method fundamental to the success of the design of reinforcement. The methods for flexural strengthening are compared, analyzing the parameters that influence the consumption of fiber, effectiveness use of materials of the original section, indicating which method needs less fiber for a given combination of these parameters. One concludes that, depending on the parameters of the piece to be reinforced, one can require significantly different amounts depending on the method adopted.

Keywords: Structural reinforcement, polymers, carbon fiber, optimization.

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho possui como foco central, o estudo comparativo de métodos de dimensionamento de reforço à flexão com polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) de vigas de concreto armado de seção retangular, examinando o ACI 440.2R-08 (ACI, 2008), o FIB *Bulletin* 14 (2001) e ISIS *Design Manual* 4 (ISIS, 2008).

Na temática do reforço de estruturas de concreto, podem-se destacar duas aplicações principais (MACHADO, 2006): reabilitar ou restaurar elementos estruturais de concreto armado enfraquecidos ou fragilizados por manifestações patológicas específicas; ou reforçar elementos estruturais em boas condições, aumentando a resistência do mesmo para que possa suportar esforços maiores que o projetado inicialmente, devido à mudança de carregamento.

Falhas de projeto, qualidade dos materiais, erros de execução e danos acidentais podem ser classificados na primeira aplicação. Podem-se ter ainda as duas situações concomitantemente, como no caso de estruturas que sofreram danos por terremoto, onde se executará o reforço de elementos danificados e também de elementos intactos específicos julgados fundamentais para a estabilidade da estrutura.

Conforme Beber (2003), atualmente há diversas técnicas de reforço cuja aplicação dependerá da geometria e carregamento, devendo a escolha ser baseada no custo de aplicação, desempenho, durabilidade, facilidade e rapidez na instalação.

Entre as técnicas de reforço mais utilizadas destacam-se as seguintes:

- a) aumento da seção transversal do elemento. Consiste na colocação de camadas adicionais de concreto, geralmente armado, no elemento a reforçar. Pode ser aplicada em pilares, vigas, lajes, tabuleiros de pontes e outros. Esta técnica sofreu considerável avanço a partir da utilização do concreto projetado. Tem como vantagens o baixo custo direto e a não utilização de materiais complexos. Entre as desvantagens estão a dificuldade de compatibilizar o concreto novo com existente, aumento do peso próprio e dificuldade de se garantir a aderência (BEBER, 2003);
- b) protensão externa. Consiste em aplicar uma protensão externa ao elemento a reforçar, acarretando aumento da capacidade resistente e diminuição das deformações. Destacam-se como vantagens a relativa simplicidade construtiva, ausência de problemas com cobrimento dos cabos, facilidade de inspeção do

sistema. Como desvantagem cita-se a vulnerabilidade à ação do fogo, corrosão eletroquímica e vandalismo (BEBER, 2003);

- c) chapa de aço colada. Chapas ou outros elementos de aço são colados na superfície de elementos de concreto através de adesivos epóxi (SAADATMANESH e EHSANI, 1990 apud BEBER, 2003). Cita-se como vantagem a fácil execução quando as chapas são pequenas, pequena alteração das dimensões da peça e eficiência (CARNEIRO, 2004). Como desvantagens, Garcez (2007) cita a dificuldade de uso das chapas com maiores dimensões em espaços confinados, impossibilidade de uso de solda posterior à instalação e possibilidade de corrosão da chapa;
- d) polímeros reforçados com fibras. O sistema de reforço utiliza a fibra embebida em uma matriz de resina, formando o composto, fixado na estrutura. As fibras mais utilizadas são a fibra de vidro, fibra de aramida e fibra de carbono (ISIS, 2007). Como vantagens, citam-se a extrema leveza, relativa facilidade de instalação, ausência de corrosão e são apresentados na forma de laminados, folhas ou barras (ACI, 2008). Como desvantagens estão a possibilidade de deterioração por radiação ultravioleta notadamente em fibras de vidro (Wu et al., 2007), vulnerabilidade a altas temperaturas, vulnerabilidade a vandalismo (BEBER, 2003) e vulnerabilidade a impactos (ATADERO e KARBHARI, 2006).

Com o objetivo de desenvolver a tecnologia de reforço com polímeros, várias pesquisas foram desenvolvidas na Europa, Japão e América do Norte a partir da década de 1980. Mediante a evolução do conhecimento, comitês específicos foram criados o que impulsionou a utilização do sistema (ACI, 2008).

Paralelamente, foram e estão sendo desenvolvidas normas e guias para o sistema de reforço com PRFC, destacando-se as produzidas por: *American Concrete Institute* (ACI), comitê 440 nos Estados Unidos; *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE), *Japan Concrete Institute* (JCI) e *Railway Technical Research Institute* (RTRI) no Japão; FIB na Europa; *Canadian Standards Association* (CSA) e ISIS no Canadá (ACI, 2008).

Em 2006, De Luca (2006) ressaltou que ainda não havia normalização brasileira destinada ao projeto de reforço com PRFC. De fato, até a presente data não só não há norma brasileira publicada sobre o assunto como também não há projeto ou plano para fazê-la.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Para condições determinadas e pré-definidas, qual dos métodos em estudo, a saber: ACI 440.2R-08 (ACI, 2008), FIB *Bulletin* 14 (2001) e ISIS *Design Manual* 4 (ISIS, 2008) conduz ao menor consumo de fibra de carbono para reforço à flexão?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Comparar os métodos de dimensionamento de reforço de vigas de concreto armado à flexão com PRFC, propostos pelo ACI 440.2R-08 (ACI, 2008), FIB *Bulletin* 14 (2001) e o ISIS *Design Manual* 4 (ISIS, 2008), quanto ao consumo de fibra de carbono.

1.2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos deste trabalho a realização do dimensionamento dos reforços com fibra por software desenvolvido pelo autor especificamente para este fim, além de analisar os principais parâmetros utilizados em cada método.

1.3 HIPÓTESE

Presume-se que os três métodos de dimensionamento conduzam a consumos distintos de fibra de carbono.

1.4 JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentam-se as justificativas tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas para a pesquisa.

1.4.1 Justificativa tecnológica

Apesar da recente evolução na pesquisa sobre reforço de estruturas com PRFC, há ainda vários assuntos não esclarecidos, necessitando de investigação adicional para o aperfeiçoamento da validação de desempenho do sistema (ACI, 2008). Com relação à flexão podem ser citados:

- a) efeito do concreto de alto desempenho e concreto leve no comportamento do PRFC;
- b) previsão de máximas aberturas de fissuras e flechas de curto e longo prazo em elementos reforçados com PRFC;
- c) ancoragem do sistema e deformação máxima da fibra na ruptura.

Ainda sobre flexão, Beber (2003) aponta a necessidade para aprimoramento dos modelos numéricos para simular o comportamento de vigas reforçadas.

Estudos comparativos entre os métodos são escassos e comparam no máximo dois métodos como os realizados por Nezamian (2004) e Azevedo (2008).

1.4.2 Justificativa social

Reforços com PRFC são aplicados com sucesso em prédios históricos onde os órgãos gestores limitam consideravelmente a modificação visual, estrutural e funcional que pode ser aplicada à edificação (GARDEN e SHAHIDI, 2002).



Figura 1.1. Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (RJ) após implosão de um trecho, devido à problemas estruturais.

1.4.3 Justificativa ecológica

Com a adoção de métodos ótimos de dimensionamento dos reforços com PRFC, pode-se reduzir o consumo de fibras ao mínimo necessário, preservando recursos naturais.

1.4.4 Justificativa econômica

Ferrari (2007) informa que as rodovias federais possuem 7.500 pontes, sendo 5.000 de responsabilidade do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Mendes (2009) indica que, entre 3.328 pontes cuja idade é conhecida, 41% têm mais de 40 anos e 68% tem mais de 30 anos. Vislumbra-se dessa estatística a potencialidade para aplicação de reforços com fibra de carbono, viabilizando a recuperação da vida útil destas obras de arte especiais.

Não só o número de estruturas para obras de infraestrutura cresce, mas também estruturas para outros usos. Cresce também a idade média das estruturas de concreto, tornando-se inevitável a necessidade de manutenção. O sistema de reforço com PRFC presta-se muito bem para viabilizar o reforço destas estruturas, evitando que as mesmas precisem ser completamente substituídas, preservando recursos naturais e econômicos (HOLLAWAY e LEEMING, 1999 apud BEBER, 2003).

O FIB *Bulletin* 14 (2001) também alerta para o fato do envelhecimento da infraestrutura concomitante com o aumento da demanda e das mudanças de solicitação, como o aumento do trem tipo em pontes rodoviárias e ferroviárias.

A comparação entre os métodos de dimensionamento pode indicar qual deles conduz ao menor consumo de fibras, podendo também indicar qual resulta no reforço mais econômico.

O resultado do estudo comparativo entre os métodos pode subsidiar a escolha de uma determinada norma por uma entidade que deseja padronizar os procedimentos de reforço, como concessionárias de rodovias, órgãos governamentais e proprietários de grandes infraestruturas, como muitas empresas.

1.5 LIMITAÇÕES DE PESQUISA

Este trabalho limitou-se ao reforço à flexão de seções retangulares de concreto armado com armadura passiva de tração, analisando uma seção típica de viga de ponte. Não foram considerados os estados limite de serviço e verificação da aderência da fibra.

Na aplicação dos métodos, o trabalho limitou-se à utilização de fibras de carbono para reforço, não considerando fibras de aramida ou fibras de vidro.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram descritos e caracterizados os componentes envolvidos no sistema de reforço de vigas de concreto com fibra de carbono: fibra, resina, aço e concreto.

Analizou-se a formulação para determinação do momento fletor resistente de vigas retangulares de concreto armado, antes da aplicação do reforço, segundo cada método, através de software desenvolvido pelo autor.

Desenvolve-se a formulação para determinação dos esforços resistentes com a contribuição da fibra de carbono conforme cada método estudado.

Estabeleceu-se uma viga de concreto armado com seção retangular que serviu como base para as comparações.

Estabeleceu-se que para cada viga estudada, a relação entre a carga permanente e a carga variável é fixa e vale 1,30. A fixação deste valor objetivou determinar a relação entre o momento fletor resistente de cálculo da viga reforçada em relação ao momento fletor resistente de cálculo da viga sem reforço, que é limitada por cada método.

Foram calculados, através de ferramenta computacional, os reforços conforme cada método, determinando-se o respectivo consumo de fibra de carbono.

Por fim, foram analisados os resultados para determinação do método que conduz ao menor consumo de fibra de carbono, descrevendo também as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

1.7 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Estrutura-se o presente trabalho em cinco capítulos, cujo conteúdo é resumido a seguir.

Além deste capítulo 1, o capítulo 2 expõe um histórico da utilização de PRFC em reforços de estruturas, descrevendo também as características dos materiais empregados no sistema. Cita exemplos de aplicação em diversos tipos de estruturas e traz um panorama do estado atual da normalização de projeto de reforço utilizando PRFC. Finaliza expondo os três métodos estudados, indicando o conceito e formulação de cada um.

No capítulo 3 expõem-se as características da seção transversal analisada, as propriedades dos materiais empregados e faz-se a aplicação numérica dos três métodos, variando-se parâmetros pré-determinados de armadura e materiais.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na aplicação dos métodos, indicando qual deles leva a um menor consumo de fibras para cada situação de acréscimo de resistência, taxa de armadura, resistência do concreto e tipo de fibra.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre os métodos estudados, considerações sobre os resultados numéricos, além de apresentar recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Abordam-se neste capítulo as informações gerais sobre o sistema de reforço com polímeros reforçados com fibra de maneira geral e especificamente com a utilização de fibras de carbono para o reforço à flexão de vigas de concreto armado com seção retangular, expondo-se o histórico dos sistemas, materiais, exemplos de aplicação, normalização atual e descrição detalhada dos métodos em estudo.

2.1 HISTÓRICO

Segundo Souza e Ripper (1998), compósitos reforçados com fibras começaram a ser utilizados em meados do século XX, substituindo o aço.

Fico (2007) relata que o desenvolvimento da utilização dos polímeros se deu após a segunda Guerra Mundial, sendo empregados na indústria automobilística, aeroespacial, naval e outras.

As primeiras pesquisas iniciaram na década de 1980 na Suíça, no *Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research* (EMPA) (GARCEZ, 2007) e paralelamente em outros países como nos EUA, onde o *U. S. Department of Transportation* patrocinou pesquisas para utilização de PRF para aplicação em obras de arte especiais (FICO, 2007).

Em meados da década de 1990, a agência de rodovias do Reino Unido realizou pesquisas e aplicação de FRP no reforço de obras de arte especiais, sendo que o êxito na aplicação levou a criação de normas de projeto (MOTAVALLI e CZADERSKI, 2007).

No Japão, o terremoto de Hyogoken-Nanbu, na região de Kobe em 1995, considerado na época o maior desastre pós-guerra, desencadeou intensa atividade de pesquisa, criação de guias de projeto e aplicação de PRF para reforço não só das estruturas danificadas, mas também como prevenção de danos futuros nas estruturas que não sofreram danos (JSCE STANDARD SPECIFICATION).

Outro fator de grande impulso para a aplicação de PRF foi a exigência, a partir de 1999, que todas as pontes rodoviárias em uso suportassem veículos de 40 toneladas. Consequentemente as pontes muitíssimo antigas deveriam ser reforçadas e por razões variadas os PRF se mostraram muito eficientes (MOTAVALLI E CZADERSKI, 2007).

No Brasil, o primeiro caso de utilização de PRFC é relatado por Machado (2002 apud BEBER, 2003), tratando-se do reforço estrutural do viaduto Santa Tereza, em 1998, na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. O viaduto foi construído em 1927, tombado pelo patrimônio histórico, teve sua capacidade elevada para classe 45 tf. O sistema PRFC foi bastante eficaz uma vez que havia restrições severas quanto ao aumento de seção das peças.

De Luca (2006) informa que na época já havia no Brasil mais de 150 obras de reforço com PRFC, sendo utilizado em estruturas de concreto de obras de arte especiais, edificações residenciais, comerciais e industriais.

2.2 PRFC E MATERIAIS CONSTITUINTES

Segundo o ISIS (2008), polímeros reforçados com fibras (PRF) são materiais compósitos resultantes da união da fibra com uma matriz de resina, sendo a fibra a responsável pela absorção da maior parcela da carga.

Segundo Beber (2003), os PRF são capazes de suportar tensões mais elevadas do que cada componente individualmente, pois a matriz e as fibras interagem na redistribuição das tensões oriundas das solicitações externas.

Os sistemas de reforço com PRFC combinam materiais com o objetivo de formar um composto altamente resistente à tração para servir de elemento resistente no reforço. Podem ser separados em três partes (ACI, 2008): resinas, fibra de carbono e revestimentos protetores.

2.2.1 Resinas

Uma ampla variedade de resinas tem sido utilizada na composição dos sistemas de PRFC, sendo comuns as epoxídicas, ésteres de vinil, e poliésteres, formuladas de acordo com a aplicação e condição ambiental (ACI, 2008; MACHADO 2006).

De acordo com o ACI (2008) os fabricantes de sistemas de PRFC buscam resinas que tenham compatibilidade e adesão ao concreto e ao compósito, resistência ao ambiente onde está aplicado, boa capacidade de preenchimento, trabalhabilidade, *pot life* compatível com o tempo de aplicação e desenvolvimento de propriedades mecânicas compatíveis com o sistema.

Quando usadas como imprimação, têm a função de penetrar na superfície do concreto, melhorando a aderência das camadas de adesão ou de saturação.

Podem ter a função de regularizadores de superfície, preenchendo pequenos vazios ou corrigindo imperfeições superficiais no substrato, proporcionando uma superfície regular para a colocação do PRFC.

As resinas de saturação são usadas para impregnar as fibras, mantê-las posicionadas, provendo um meio efetivo de transferência das tensões de cisalhamento entre elas. Também servem de adesivo para os sistemas pré-impregnados.

As resinas adesivas são utilizadas para a colagem de PRFC pré-impregnados ao substrato de concreto, proporcionando a transferência das tensões de cisalhamento entre o substrato de concreto e o laminado, ou ainda, entre as várias camadas de laminados (ACI, 2008; MACHADO 2006).

2.2.2 Matriz

Conforme Beber (2003), a matriz é o corpo do compósito, servindo para unir as fibras e dar forma ao compósito, servindo de meio pelo qual as solicitações externas serão transmitidas para as fibras, sendo que a matriz absorve apenas uma pequena parcela desta solicitação. Serve ainda como proteção das fibras, formando uma camada entre elas e o meio ambiente.

Segundo Machado (2006), a matriz deve ter, necessariamente, um alongamento de ruptura muito maior do que o alongamento que ocorre na fibra de carbono, para permitir que a mesma continue a possuir capacidade de carga, mesmo após a tensão na fibra ter atingido sua tensão de ruptura. Portanto, os sistemas PRFC devem trabalhar com a fibra com ruptura frágil e a matriz com ruptura dúctil, devendo-se descartar a ocorrência de ruptura frágil da matriz.

2.2.3 Fibra de carbono

As fibras de carbono são produzidas a partir de fibras orgânicas tais como o poliacrilonitril (PAN), alcatrão derivado de petróleo ou carvão (*pitch*) ou de polímeros celulósicos (rayon). Através de um processo térmico de alta temperatura, as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, conferindo altíssima resistência à tração ao produto (FIB, 2001; GARCEZ, 2007; MACHADO, 2006).

Machado (2006) relaciona as características básicas da fibra de carbono: extraordinária resistência mecânica e rijeza, elevada resistência a ataques químicos, imune à corrosão, alta estabilidade térmica e reológica, bom comportamento à fadiga e leveza.

As propriedades mecânicas de algumas fibras de carbono utilizadas em PRFC são listadas na Tab. 2.1, juntamente com outros materiais para efeito de comparação.

Tabela 2.1. Propriedades de algumas fibras de carbono utilizadas em PRFC e outros materiais.

Material	Peso específico (kN/m³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Fibra de carbono tipo PAN ^{1,2}	17,9	3.650	230,0	1,4
Fibra de carbono base <i>Pitch</i> ^{2,3}	20,4	2.400	380,0	0,5
Sika Wrap-300 C/60 ⁴	-	3.900	230,0	1,5
Sika CarboDur S ⁵	-	3.100	165,0	1,7
Sika CarboDur M ⁵	-	3.200	210,0	0,45
Sika CarboDur H ⁵	-	1.500	300,0	1,7
Sistema MBrace CF-130 ⁶	-	3.790	228,0	1,7
Sistema MBrace CF-530 ⁶	-	3.517	372,0	0,9
Sistema MBrace fibra de vidro EG-900 ⁶	-	1.517	72,4	2,1
Aço CA-50 ^{7,8}	77,0	500	210,0	20,0
Aço CP-190 RB ^{7,9}	77,0	1.900	200,0	3,5
⁽¹⁾ : Poliacrilonitril como fibra precursora; ⁽²⁾ : ISIS, 2008; ⁽³⁾ : Fibras com base em alcatrão derivado de petróleo ou carvão; ⁽⁴⁾ : SIKA, 2008; ⁽⁵⁾ : SIKA, 2009; ⁽⁶⁾ : Machado, 2006; ⁽⁷⁾ : NBR 6118 (ABNT, 2007); ⁽⁸⁾ : NBR 7480 (ABNT, 2007); ⁽⁹⁾ : NBR 7482 (ABNT, 2008)				

Com base na Tab. 2.1 é possível traçar o gráfico de tensão versus deformação específica para alguns materiais, representado na Fig. 2.1.

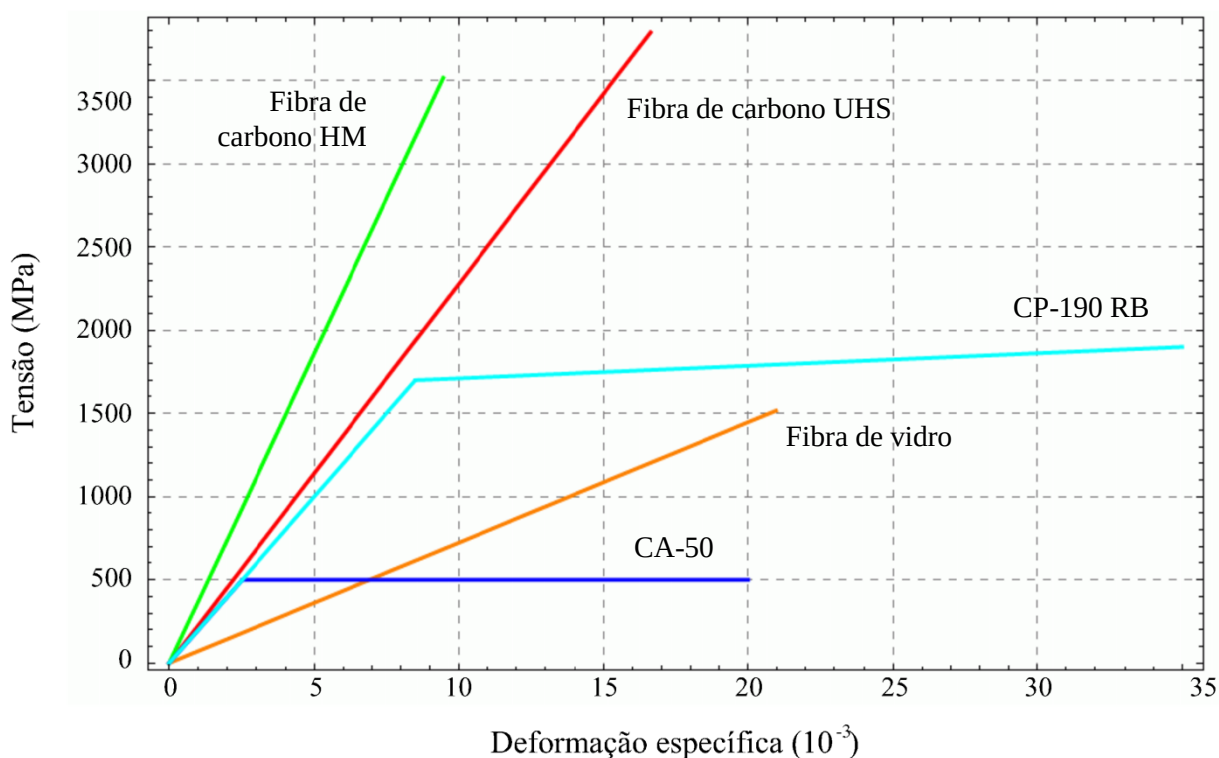


Figura 2.1. Gráfico de tensão versus deformações de fibras e aços.

2.2.4 Revestimentos protetores

Segundo o ACI 440.2R-08 (ACI, 2008), os revestimentos protetores são utilizados para proteger o reforço feito com PRFC contra danos ambientais ou por efeitos mecânicos. São geralmente aplicados externamente, após a cura do sistema, podendo apresentar-se na forma de polímeros (epóxis e poliuretanos), acrílicos, cimentícios e revestimentos intumescentes para situações de incêndio.

Ainda segundo o ACI, as razões principais para proteção do sistema PRFC são ataque de radiação ultravioleta, incêndio, vandalismo, impacto, abrasão, agressão química, estética e preservação da portabilidade da água, quando for o caso.



Figura 2.2. Materiais componentes do sistema PRF (acervo do autor).

2.3 APLICAÇÕES DOS SISTEMAS COM PRFC

Machado (2006) expõe as principais aplicações dos sistemas de reforço com PRFC:

- a) reforço à flexão com lâminas, barras e perfis em elementos de concreto armado ou protendido tais como vigas, lajes e postes;
- b) reforço ao esforço cortante de vigas de concreto armado ou protendido utilizando lâminas ou perfis;
- c) reforço à compressão ou flexo-compressão de pilares de concreto armado;
- d) reforço de alvenarias à flexão e ao esforço cortante utilizando lâminas, perfis e barras.

Além das aplicações em reforço, os sistemas podem ser aplicados em elementos estruturais novos, geralmente na forma de barras, podendo ser ativos ou passivos (MACHADO, 2006).

Além do uso já relativamente difundido para reforço de estruturas de concreto armado e protendido, citam-se outras aplicações eficazes em estruturas com outros tipos de materiais.

Hollaway e Cadei (2002) relatam a utilização de PRFC em várias situações de reforço de estruturas metálicas, entre elas a ponte de ferro fundido mais antiga em serviço, construída no século XIX, reforçada para manutenção do tráfego rodoviário, sendo que o sistema teve espessura máxima de 10 mm, causando pouco impacto visual. Relatam outros casos de reforços de pontes metálicas rodoviárias construídas com diferentes sistemas estruturais. Relatam o uso de PRFC para reparo de um duto submarino e de vigas metálicas de alguns túneis do metrô de Londres.

Dawood e Rizkalla (2008) relatam extensa investigação experimental para aplicação de PRFC em reforço de vigas metálicas de pontes mostrando a adequação do sistema para aumentar a capacidade tanto em serviço como no estado limite último.

Karantzikis et al. (2007) relatam o reforço de tubos de concreto protendido com diâmetro externo de 1,65 m, danificados por corrosão da armadura de protensão.

Sen e Mullins (2006) relatam o uso de PRFC para a recuperação estrutural de estacas de fundações de pontes, na região de variação de maré, onde o sistema mostrou bons resultados. Uma aplicação anterior, instrumentada, em estacas protendidas, mostrou a viabilidade da utilização de PRFC na região de variação de maré, com vantagens sobre outros métodos já consagrados (MULLINS et al., 2005).

Fiorelli (2002) relata diversos trabalhos onde houve a aplicação de PRF, tanto com a utilização de fibras de carbono quanto fibra de vidro para reforço de diversos elementos estruturais de madeira, inclusive vigas de ponte.

Triantafillou (1998) relata as dificuldades técnicas e práticas de se reforçar alvenarias de prédios antigos com as técnicas convencionais, indicando as vantagens da adoção de PRFC como técnica superior, relatando vários casos bem sucedidos de aplicação do sistema.

2.4 ESTADO ATUAL DA NORMALIZAÇÃO DE PROJETO COM PRFC

Apesar do uso da técnica de reforço com PRFC ser relativamente recente, já há normas e guias que tratam do dimensionamento de reforço de concreto armado e protendido. Porém, estes documentos divergem quanto a alguns aspectos e critérios, e vários tópicos ainda estão em pesquisa e desenvolvimento (MOTAVALLI e CZADERSKI, 2007).

Os principais guias e normas são listados a seguir.

2.4.1 FIB Bulletin 14

Externally bonded FRP reinforcement for RC structures – FIB Bulletin 14. Emitido em 2001 e elaborado pelo *task group* 9.3 do FIB composto por cerca de 50 membros entre universidades, institutos de pesquisa e indústrias (MOTAVALLI e CZADERSKI, 2007). O FIB Bulletin 14 (2001) apresenta um guia de cálculo dos reforços com sistemas externos de PRFC, metodologia executiva e controle de qualidade, tudo baseado na experiência corrente estado-da-arte do conhecimento desenvolvido no grupo de pesquisa, até a época de sua publicação.

2.4.2 Concrete Society

Design Guidance for Strengthening Concrete Structures using Fibre Composite Materials (THE CONCRETE SOCIETY, 2004). Em sua segunda edição, esta publicação inglesa aborda dimensionamento de reforços com PRF para edificações e pontes, tratando também da instalação, inspeção e manutenção.

2.4.3 Pre-code SIA166

Pre-code SIA166, Externally Bonded Reinforcement. Norma preliminar suíça, publicada em 2004, que trata dos estados limites últimos, estados limites de serviço (tensões, deslocamentos e abertura de fissura), situações acidentais e verificação da capacidade de deformação (MOTAVALLI e CZADERSKI, 2007).

2.4.4 CNR-DT 200/2004

CNR-DT 200/2004 - *Guide for the design and construction of externally bonded FRP Systems for strengthening existing structures* (CNR, 2004). Guia publicado pelo Conselho Nacional de Pesquisa da Itália em 2004, para projeto e construção de sistemas de reforços com PRF aderidos externamente, para uso em construções existentes, contemplando materiais, conceitos básicos de reforços com PRF, reforço de estruturas de concreto armado e protendido e reforço de alvenarias, tanto em flexão como em flexo-compressão. Contempla também estruturas submetidas a sismos e confinamento de elementos estruturais.

2.4.5 ACI 440.2R-08

Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI, 2008). O ACI 440.2R-08 substitui o ACI 440.2R-02 e foi publicado em 2008, pelo *American Concrete Institute*, através do comitê 440 - *Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement*.

Fornece um guia para seleção, projeto e instalação de sistemas externos de PRF para reforços de estruturas de concreto, contemplando informações sobre as propriedades dos materiais utilizados, dimensionamento, detalhamento, instalação, controle de qualidade e manutenção dos sistemas.

Segundo o próprio guia, foi baseado na experiência adquirida ao longo de 25 anos de pesquisa, incluindo estudos analíticos, trabalhos experimentais e monitoramento de estruturas reais.

O guia ainda declara que sua metodologia de dimensionamento é considerada conservadora, visto serem necessárias pesquisas adicionais para esclarecimento de diversos pontos do comportamento do sistema de reforço.

Pode ser aplicado em estruturas de concreto armado e protendido com armadura aderente. Elementos com armadura protendida sem aderência não são contemplados.

2.4.6 ISIS *Design Manual 4*

O manual de projeto do ISIS, *FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures* (ISIS, 2008), também denominado *ISIS Design Manual 4*, foi inicialmente publicado em 2001, pelo *ISIS Canada Research Network*, tendo impacto positivo no aumento do uso dos PRF como elemento de reforço de estruturas de concreto não só no Canadá, mas também no mundo. Serviu de base para a elaboração da norma técnica nacional canadense CSA-S806-02 (CSA, 2009), *Design of Building with Fibre-Reinforced Polymers*, publicada inicialmente em 2002 e para a norma canadense de projeto de pontes rodoviárias, CSA-S6-06, publicada em 2006.

A segunda edição do Manual em 2008 visa refletir os avanços incorporados às duas normas, alinhando e compatibilizando o manual com a normalização. Portanto, trata-se de um guia de aplicação da normalização de forma mais prática, voltada para os problemas diariamente encontrados na reabilitação de estruturas de concreto.

Como o próprio manual define, é um complemento às duas normas mencionadas acima, que explica o processo de dimensionamento, equações e requisitos para o reforço das estruturas.

O Manual apresenta procedimentos para dimensionamento de reforços com PRF aplicados em vigas, lajes e colunas, apresentando a formulação e exemplos de aplicação.

Apresenta quais os requisitos gerais para o projeto, propriedades dos materiais e avaliação da estrutura existente, reforço à flexão, reforço ao cisalhamento, elementos confinados, instalação do sistema e por último, controle e garantia da qualidade.

Este Manual permite apenas o uso de fibras de carbono, fibra de vidro e fibra de aramida.

2.4.7 JSCE STANDART SPECIFICATION

Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets (JSCE, 2001). Publicada em 2001 pela Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis, as recomendações tratam do projeto e construção de reforços estruturais com PRF externos, para aplicação em estruturas de concreto existentes. Objetivam não apenas a recuperação e o reforço, mas restabelecer a capacidade em serviço dos elementos estruturais.

Contempla a aplicação de fibras de carbono e aramida, permitindo outros tipos com desempenho investigado por ensaios, abordando os conceitos básicos da recuperação e reforço, materiais e sua qualidade, cargas, inspeção da estrutura a ser reforçada, dimensionamento do reforço à flexão, força axial, cisalhamento, fadiga na flexão e cisalhamento, segurança em situação de incêndio, segurança em colisões, estados limites de serviço, execução do reforço, registros e manutenção da estrutura reforçada.

2.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO EM ESTUDOS

Segue-se a descrição da formulação de cada um dos três métodos comparados para dimensionamento de reforço à flexão com a utilização de PRFC.

2.5.1 Método do ACI 440.2R-08

2.5.1.1 Visão Geral

A formulação para o dimensionamento do reforço à flexão com PRFC pelo método do ACI 440.2R-08 (ACI, 2008) é analisada a seguir. É baseado no princípio dos estados limites, levando o dimensionamento a níveis aceitáveis de segurança quanto à ocorrência dos estados limites de serviço (deformação excessiva e abertura de fissuras) e estados limites últimos (ruptura, tensões excessivas e fadiga).

O índice de confiabilidade esperado, quando seguido o método é superior a 3,5. Índices entre 3,0 e 3,5 podem ser encontrados em situações de seções sub-armadas com aço juntamente com uma alta taxa de armadura de fibra.

2.5.1.2 Premissas principais

Seguem-se as principais premissas adotadas pelo ACI 440.2R-08 para o cálculo da resistência à flexão de uma seção reforçada com PRF.

- a) o dimensionamento é baseado nas dimensões, arranjo da armadura interna aderente e propriedades dos materiais do elemento a ser reforçado;
- b) as deformações específicas da armadura e do concreto são diretamente proporcionais à distância da linha neutra, o que acarreta que as seções planas permanecem planas após o carregamento;
- c) não há deslizamento relativo entre o PRF externo e o concreto;
- d) a deformação por cisalhamento da camada adesiva é desprezada;
- e) a deformação específica máxima para o concreto é 0,003;
- f) a resistência à tração do concreto é desprezada;
- g) o reforço de PRF tem comportamento elástico linear quanto à tensão e deformação até a ruptura.

2.5.1.3 Formulação

O elemento estrutural sem a contribuição do reforço deve resistir a uma parte da carga, evitando o colapso imediato caso o sistema de reforço seja danificado, sendo a relação entre a resistência da estrutura existente e a estrutura reforçada dada pela Eq. (2.1).

$$(\phi R_n)_{existente} \geq (1,1 S_{DL} + 0,75 S_{LL})_{nova} \quad (2.1)$$

Onde:

ϕR_n - Resistência de cálculo da estrutura existente, sem reforço.

S_{DL} - Solicitação nominal para carga permanente atuante na estrutura reforçada.

S_{LL} - Solicitação nominal para carga variável atuante na estrutura reforçada.

Para considerar uma possível redução de longo prazo na resistência dos materiais devido aos efeitos ambientais, é aplicado um fator de redução da resistência em função da exposição do PRF. As propriedades dos materiais a serem utilizadas no dimensionamento são indicadas nas Eq. (2.2) a (2.4), a seguir. O fator de redução C_E é apresentado na Tab. 2.2.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2.2)$$

Onde:

f_{fu} - Tensão última de tração de cálculo do PRF, em MPa.

C_E - Fator ambiental de redução.

f_{fu}^* - Tensão última de tração de cálculo do PRFC informada pelo fabricante do sistema.

Tabela 2.2. Fator de redução ambiental para vários sistemas FRP e condições de exposição, ACI (2008).

Condição de exposição	Tipo de fibra	Fator de redução ambiental C_E
Exposição interna	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
Exposição externa (pontes, piers e parques de estacionamento não fechado)	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
Ambiente agressivo (fábricas de produtos químicos e estações de tratamento de águas residuais)	Carbono	0,85
	Vidro	0,50
	Aramida	0,70

A deformação na ruptura também deve ser reduzida pelo fator ambiental de redução, conforme a Eq. (2.3).

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (2.3)$$

Onde:

ε_{fu} - Deformação específica última de cálculo do PRF.

C_E - Fator ambiental de redução.

ε_{fu}^* - Deformação específica última do PRF.

Os PRFC, na tração, possuem comportamento elástico linear, sendo o módulo de elasticidade calculado pela Eq. (2.4), não sendo necessário aplicar o fator ambiental de redução de resistência.

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (2.4)$$

Onde:

E_f - Módulo de elasticidade na tração do PRF.

O momento fletor resistente de cálculo, ϕM_n , deve ser maior ou igual ao momento fletor solicitante de cálculo, M_u , conforme a Eq. (2.5). O valor do fator de minoração da resistência, ϕ , é dado pela Eq. (2.9).

$$\phi M_n \geq M_u \quad (2.5)$$

A fim de se evitar uma falha por descolamento do PRF devido às aberturas de fissuras na região afastada de suas ancoragens, a deformação específica deve ser limitada a um nível especificado pela Eq. (2.6).

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu} \quad (2.6)$$

Onde:

- ε_{fd} - Deformação específica do reforço de PRF na ruptura por descolamento.
- f'_c - Resistência nominal à compressão do concreto.
- n - Número de camadas aplicadas de PRF.
- t_f - Espessura nominal de uma camada de PRF.

A deformação específica efetiva no reforço de PRF no estado limite último é determinado pela Eq. (2.7).

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (2.7)$$

Onde:

- ε_{fe} - Deformação específica do reforço de PRF na ruptura por descolamento.
- ε_{cu} - Deformação axial última do concreto não confinado, correspondente à $0,85f'_{co}$ ou máxima deformação específica do concreto confinado, que pode ocorrer à $0,85f'_{co}$ ou 0,003 dependendo da curva tensão-deformação.
- ε_{bi} - Deformação específica inicial do substrato onde será aderido o PRF (Fig. 2.3).
- c - Profundidade de linha neutra. Distância entre a fibra mais comprimida e linha neutra da seção.
- d_f - Distância altura efetiva do PRF. Distância entre a fibra mais comprimida e o centróide do reforço de PRF.

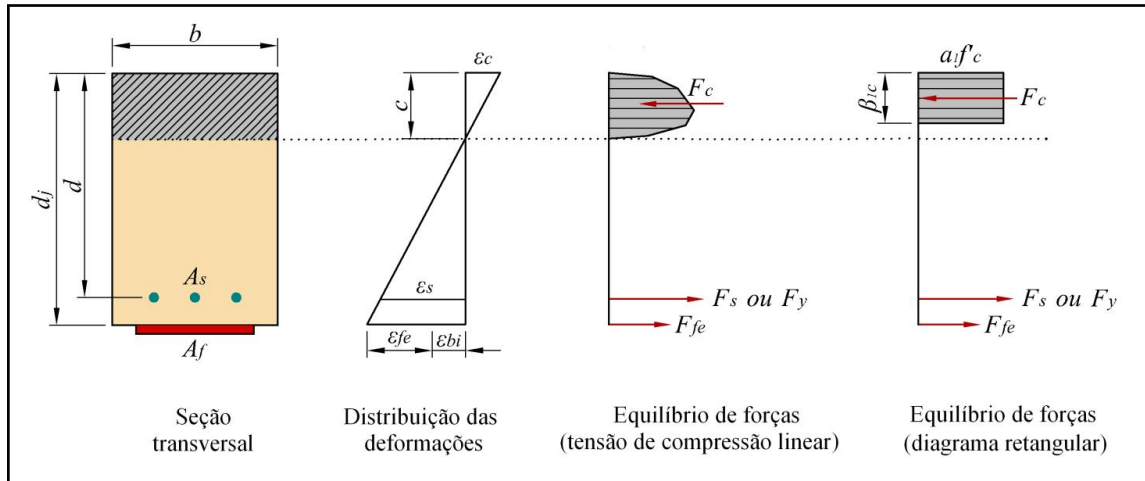


Figura 2.3. Deformações internas e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão no estado limite último, adaptado de ACI (2008).

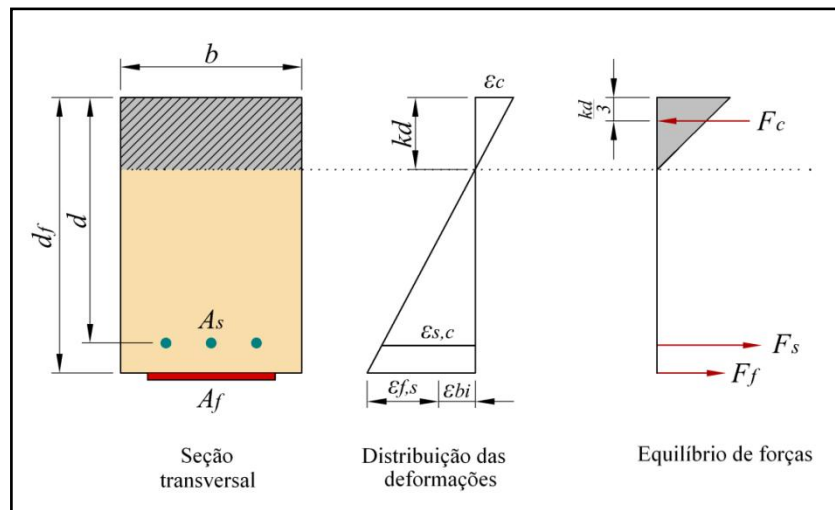


Figura 2.4. Deformações internas e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão no estado limite de serviço, adaptado de ACI (2008).

A tensão efetiva de tração no reforço de PRF é a máxima tensão que pode ser resistida pelo PRF antes da falha por flexão da seção, tensão dada pela Eq. (2.8), assumindo comportamento perfeitamente elástico.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (2.8)$$

Onde:

f_{fe} - Tensão efetiva de tração no reforço de PRF na ruptura.

Segundo o ACI 440.2R-08, o uso de PRF aderidos externamente para reforços de flexão, reduz a ductilidade do elemento reforçado, o que deve ser verificado, analisando-se a deformação específica no aço no estado limite último.

Em elementos com armadura passiva, adequada ductilidade é obtida se a deformação específica do aço na seção onde ocorre o esmagamento do concreto ou falha do PRF é pelo menos 0,005. Um fator de minoração da resistência à flexão é imposto em função do valor da deformação do aço, isto é, da ductilidade da seção, dado pela Eq. (2.9).

$$\phi = \begin{cases} 0,90 \text{ para } \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} \text{ para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005 \\ 0,65 \text{ para } \varepsilon_t < \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (2.9)$$

Onde:

- ε_t - Deformação específica da armadura passiva tracionada correspondente à tensão nominal máxima.
- ε_{sy} - Deformação específica da armadura passiva tracionada correspondente à tensão de escoamento.

O ACI 440.2R-08 não permite que a armadura atinja o limite de escoamento em serviço, limitando tanto a tensão no aço como no concreto através das Eq. (2.10) e (2.11).

$$f_{s,s} \leq 0,80 f_y \quad (2.10)$$

$$f_{c,s} \leq 0,45 f'_c \quad (2.11)$$

Onde:

- $f_{s,s}$ - Tensão de tração na armadura passiva em serviço.
- f_y - Tensão de escoamento da armadura.
- $f_{c,s}$ - Tensão de compressão no concreto em serviço.

Para a determinação do momento fletor resistente de cálculo da seção, utiliza-se a convenção e os diagramas apresentados na Fig. 2.3. Para o cálculo do equilíbrio de forças na seção e compatibilidade de deformações, utiliza-se um processo iterativo para a determinação do valor da profundidade da linha neutra (c).

A deformação específica é calculada pela Eq. (2.7), que considera o modo de falha para o assumido valor da profundidade da linha neutra. Se o termo esquerdo da inequação governa, a ruptura à flexão ocorrerá pelo esmagamento do concreto. Se o termo direito da inequação governa, a ruptura ocorrerá pela falha do PRF (ruptura ou descolamento).

A tensão efetiva no reforço de PRF (f_{fe}) é calculada pela Eq. (2.8) e a deformação específica do aço, por compatibilidade de deformações é dada pela Eq. (2.12).

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (2.12)$$

Onde:

- ε_s - Deformação específica da armadura passiva tracionada.
- d - Altura útil da seção. Distância entre a fibra mais comprimida e o centróide da armadura tracionada.

A tensão de tração no aço é determinada pela deformação específica do mesmo, através da Eq. (2.13), limitada pela sua tensão de escoamento.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.13)$$

Onde:

- f_s - Tensão de tração na armadura passiva.

Obtidas as deformações e tensões no PRF e na armadura para o respectivo valor da profundidade da linha neutra (c), o equilíbrio de forças internas na seção é verificado pela Eq. (2.14).

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \quad (2.14)$$

Onde:

- A_s - Área da seção transversal da armadura passiva.
- A_f - Área da seção transversal do reforço de PRF.
- $f_{c,s}$ - Tensão de compressão no concreto em serviço.
- α_1 - Parâmetro de equivalência do diagrama parábola-retângulo.
- β_1 - Parâmetro de equivalência do diagrama parábola-retângulo.

b - Largura da seção transversal (Fig. 2.3).

Uma vez obtido o valor da profundidade da linha neutra que leve ao equilíbrio da seção, o momento fletor nominal resistente é calculado pela Eq. (2.15). Um fator de redução adicional (ψ) é aplicado à parcela de contribuição da fibra, sendo recomendado o valor de 0,85. Trata-se de um coeficiente empírico, baseado na calibração estatística e confiabilidade do método.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.15)$$

Além da determinação da resistência, é necessário verificar as tensões no aço e no reforço de PRF, atestando que estão dentro dos limites exigidos pela Eq. (2.10) e Tab. 2.3 respectivamente. As tensões em serviço no aço e na fibra são calculadas pelas Eq. (2.16) e (2.17) respectivamente.

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) (d_f - kd)} \quad (2.16)$$

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \frac{d_f - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f \quad (2.17)$$

Onde:

M_s - Momento fletor em serviço na seção.

k - Razão entre a profundidade da linha neutra e a distância entre a fibra mais comprimida e a armadura tracionada.

Tabela 2.3. Tensões limite no reforço de PRF para estado limite de serviço para fibra de vidro, fibra de aramida e fibra de carbono (ACI, 2008).

Tipo de tensão	Tipo de fibra		
	GFRP	AFRP	CRP
Sustentação ao longo do limite de tensão cíclica	$0,30 f_{fu}$	$0,30 f_{fu}$	$0,55 f_{fu}$

2.5.2 Método do ISIS

2.5.2.1 Visão geral

A formulação para o dimensionamento do reforço à flexão com PRFC pelo método é exposta a seguir.

2.5.2.2 Premissas principais

Seguem-se as principais premissas adotadas pelo manual do ISIS (2008) para o cálculo da resistência à flexão de uma seção reforçada com PRF.

- a) as tensões internas na seção transversal analisada estão em equilíbrio devido à aplicação das cargas externas;
- b) as deformações específicas da armadura e do concreto são diretamente proporcionais à distância da linha neutra, o que acarreta que as seções planas permanecem planas após o carregamento;
- c) há compatibilidade de deformações entre os materiais, isto é, perfeita aderência entre concreto e aço e entre concreto e PRF;
- d) a máxima deformação específica do reforço de PRF na tração está limitado à 0,006 para pontes ou 0,007 para edifícios e outras estruturas;
- e) a deformação específica máxima para o concreto é 0,0035;
- f) a resistência à tração do concreto e a resistência à compressão do PRF são desprezados.

Essas premissas apenas são válidas se há suficiente ancoragem do reforço de PRF.

2.5.2.3 Formulação

Para o cálculo da tensão de compressão no concreto da seção transversal analisada, o manual do ISIS (2008), propõe a utilização de um diagrama simplificado equivalente ao diagrama parábola-retângulo em função dos parâmetros α_1 e β_1 , calculados pelas Eq. (2.18) e (2.19) respectivamente.

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 f'_c \geq 0,67 \quad (2.18)$$

$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 f'_c \geq 0,67 \quad (2.19)$$

Onde:

α_1 - Fator de tensão para o diagrama retangular.

β_1 - Razão de profundidade para o diagrama retangular.

Os modos de falha são de dois tipos:

- a) esmagamento do concreto, com ou sem escoamento da armadura, sempre antes da falha do reforço de PRF;
- b) falha no reforço de PRF por tração. Para os casos práticos, esta falha ocorrerá sempre após o escoamento da armadura tracionada. Este escoamento não é considerado um modo de falha devido a grande capacidade de deformação do aço.

Para uma situação balanceada, isto é, o reforço de PRF na iminência de ruptura por tração e o concreto na iminência de esmagamento por compressão, a profundidade da linha neutra da seção transversal é dada pela Eq. (2.20).

$$c_b = \frac{h}{1 + \frac{\varepsilon_{RFP} + \varepsilon_{fi}}{\varepsilon_{cu}}} \quad (2.20)$$

Onde:

c_b - Distância da fibra mais comprimida até a linha neutra da seção transversal para situação balanceada.

h - Altura total da seção.

ε_{RFP} - Deformação específica no reforço de PRF.

ε_{fi} - Deformação específica inicial do substrato onde será aderido o PRF.

ε_{cu} - Deformação específica axial última do concreto não confinado.

O esmagamento do concreto ocorrerá se a somatória das forças abaixo de c_b for maior que o somatório das forças acima de c_b , conduzindo à Eq. (2.21).

$$\alpha_1 \phi_c f'_c b \beta_1 c_b + \phi_s f_y A'_s < \phi_s f_y A_s + \phi_{FRP} E_{FRP} \varepsilon_{FRPt} A_{FRP} \quad (2.21)$$

Onde:

- ϕ_c - Fator de minoração da resistência do concreto.
- b - Largura da seção transversal.
- ϕ_s - Fator de minoração da resistência da armadura passiva.
- A'_s - Área da seção transversal da armadura passiva longitudinal de compressão.
- A_s - Área da seção transversal da armadura passiva longitudinal de tração.
- ϕ_{FRP} - Fator de minoração da resistência do reforço de PRF.
- E_{FRP} - Módulo de elasticidade na tração do PRF.
- ε_{FRPt} - Deformação específica máxima admissível de tração do reforço de PRF.
- A_{FRP} - Área da seção transversal do reforço de PRF.

Baseado na Fig. 2.5 as relações entre deformações específicas podem ser estabelecidas conforme a Eq. (2.22).

$$\frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon'_s}{c - d'} = \frac{\varepsilon_s}{d - c} = \frac{\varepsilon_{fi} + \varepsilon_{FRP}}{h - c} \quad (2.22)$$

Onde:

- ε_c - Deformação específica do concreto à compressão.
- ε'_s - Deformação específica da armadura passiva comprimida.
- d' - Distância entre a fibra mais comprimida e o centróide da armadura passiva longitudinal comprimida.

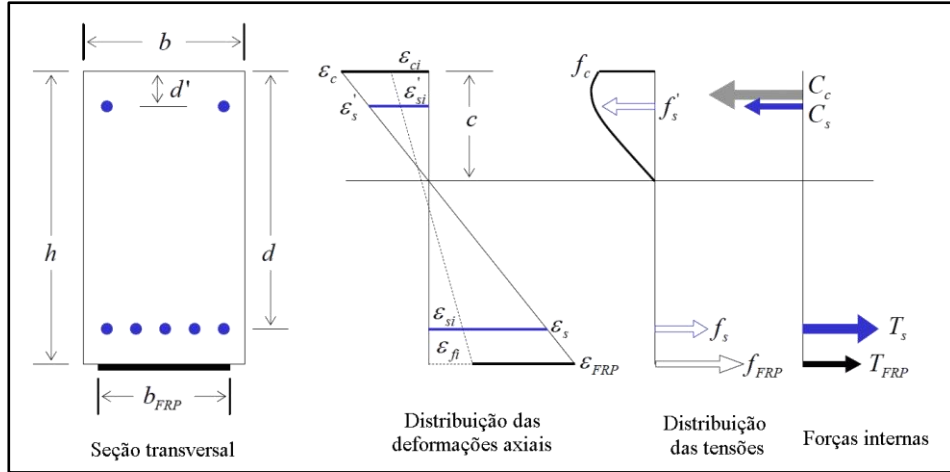


Figura 2.5. Tensão interna e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão no estado limite último, adaptado de ISIS (2008).

Quando a ruptura por esmagamento do concreto inicia, tem-se $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,0035$ e a deformação específica da armadura e do reforço de PRF pode ser determinado pelas Eq. (2.23) a (2.25).

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{c - d'}{c} \right) \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d - c}{c} \right) \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_{FRP} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{fi} \quad (2.25)$$

Quando a falha por flexão for governada pela tração no reforço de PRF, então $\varepsilon_{FRP} = \varepsilon_{FRPu} \leq \varepsilon_{FRPt}$, e as deformações específicas no concreto e nas armaduras são calculadas pelas Eq. (2.26) a (2.28).

$$(\varepsilon_{fi} + \varepsilon_{FRPu}) \left(\frac{c - d'}{h - c} \right) \leq \varepsilon'_s = (\varepsilon_{fi} + \varepsilon_{FRPt}) \left(\frac{c - d'}{h - c} \right) \quad (2.26)$$

$$(\varepsilon_{fi} + \varepsilon_{FRPu}) \left(\frac{d - c}{h - c} \right) \leq \varepsilon_s = (\varepsilon_{fi} + \varepsilon_{FRPt}) \left(\frac{d - c}{h - c} \right) \quad (2.27)$$

$$(\varepsilon_{fi} + \varepsilon_{FRPu}) \left(\frac{c}{h - c} \right) \leq \varepsilon_c = (\varepsilon_{fi} + \varepsilon_{FRPt}) \left(\frac{c}{h - c} \right) \quad (2.28)$$

Onde:

- ε_{FRPu} - Deformação última no reforço de PRF.
 ε_{FRPt} - Deformação específica máxima admissível de tração do reforço de PRF.

O equilíbrio das forças internas mostradas na Fig. 2.5 é calculado pela Eq. (2.29), cujas parcelas são calculadas pelas Eq. (2.30) a (2.33).

$$C_c + C_s = T_s + T_{FRP} \quad (2.29)$$

$$C_c = \alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 cb \quad (2.30)$$

$$C_s = \phi_s f_y A'_s \quad \text{para } \varepsilon'_s > \varepsilon_y \quad \text{ou} \quad C_s = \phi_s E_s \varepsilon'_s A'_s \quad \text{para } \varepsilon'_s < \varepsilon_y \quad (2.31)$$

$$T_s = \phi_s f_y A_s \quad \text{para } \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad \text{ou} \quad T_s = \phi_s E_s \varepsilon_s A_s \quad \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_y \quad (2.32)$$

$$T_{FRP} = \phi_{FRP} E_{FRP} \varepsilon_{FRP} A_{FRP} \quad (2.33)$$

Onde:

- C_c - Resultante da força devido à tensão de compressão no concreto inferior a f'_c .
 C_s - Resultante da força devido à tensão de compressão na armadura comprimida.
 ε_y - Deformação específica da armadura passiva tracionada no escoamento.
 T_s - Resultante da força devido à tensão de tração na armadura tracionada.
 T_{FRP} - Resultante da força devido à tensão de tração no reforço de PRF.

Finalmente, o momento fletor resistente de cálculo da seção (M_r) é calculado pela Eq. (2.34).

$$M_r = C_s \left(\frac{a}{2} - d' \right) + T_s \left(d - \frac{a}{2} \right) + T_{FRP} \left(h - \frac{a}{2} \right) \quad (2.34)$$

2.5.3 Método do FIB *Bulletin* 14

2.5.3.1 Visão geral

A formulação para o dimensionamento do reforço à flexão com PRFC pelo FIB *Bulletin* 14 (2001) segue o método dos estados limites últimos, onde a resistência da seção é determinada em função do modo de falha, que é dividido em duas classes, sendo a primeira

caracterizada pelo trabalho conjunto entre fibra e concreto até que este falhe por esmagamento ou a fibra falhe por tração.

Na segunda classe, o modo de falha é caracterizado pela perda da ação conjunta entre o concreto e o compósito, antes da falha de um deles, causado pelo descolamento prematuro do PRF.

O controle da ductilidade da seção é feito limitando-se a profundidade da linha neutra, fazendo com que a armadura tracionada escoe.

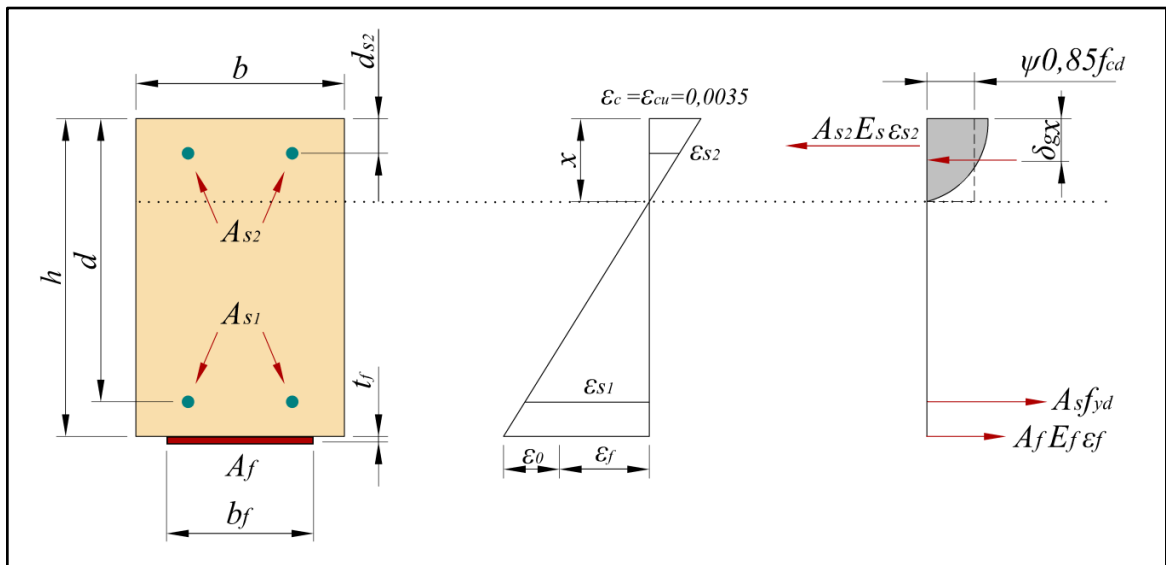


Figura 2.6. Tensão interna e distribuição de tensões para uma seção retangular sob flexão no estado limite último, adaptado de FIB (2001).

2.5.3.2 Formulação

A seguir expõe-se a formulação pelo método do FIB para dimensionamento do reforço à flexão.

Inicialmente, considera-se que o modo de falha ocorre por escoamento do aço e esmagamento do concreto. Com isso pode-se calcular a profundidade da linha neutra, x , por um processo iterativo, utilizando a Eq. (2.35).

$$0,85 \psi f_{cd} b x + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f \quad (2.35)$$

Onde:

ψ - Coeficiente igual a 0,8.

- f_{cd} - Resistência de cálculo à compressão do concreto.
 x - Profundidade da linha neutra (Fig. 2.7).
 A_{s2} - Área da seção transversal da armadura passiva longitudinal comprimida.
 ε_{s2} - Deformação específica da armadura passiva comprimida.
 A_{s2} - Área da seção transversal da armadura passiva longitudinal tracionada.
 E_{fu} - Módulo de elasticidade na tração do PRF na ruptura.
 ε_f - Deformação específica do PRF.

As deformações específicas na armadura comprimida e na fibra são calculadas pelas Eq. (2.36) e Eq. (2.37) respectivamente, devendo atender à condição da Eq. (2.38).

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x} \quad (2.36)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \quad (2.37)$$

$$E_s \varepsilon_{s2} \leq f_{yd} \quad (2.38)$$

Onde:

- ε_0 - Deformação específica inicial do substrato onde será aderido o PRF.

O momento resistente de cálculo da seção reforçada é calculado pela Eq. (2.39).

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} (\delta_G x - d_2) \quad (2.39)$$

Onde:

- δ_G - Coeficiente igual a 0,8.
 d_2 - Distância entre o centróide da armadura comprimida até a fibra mais comprimida, conforme a Fig. 2.7.

Para que as Eq. (2.35) a (2.39) sejam válidas é necessário que sejam atendidas as seguintes condições, expressas pelas Eq. (2.40) e (2.41).

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (2.40)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{fud} \quad (2.41)$$

Onde:

ε_{fud} - Deformação específica última de cálculo do PRF.

Como o método do FIB não estabelece limites para efud, adotou-se neste trabalho a limitação recomendada por Rostasy (ROSTASY et al, 1998 apud AZEVEDO, 2008), expressa pela Eq. (2.42).

$$\varepsilon_{fd} \leq 0,5 \varepsilon_{fk} \quad (2.42)$$

Caso o modo de falha não seja o descrito acima, deve-se utilizar as equações indicadas modificadas pelos seguintes valores:

$$\phi = \begin{cases} 1000 \varepsilon_c \left(0,5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) \text{ para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000 \varepsilon_c} \text{ para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (2.43)$$

e

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000 \varepsilon_c}{4(6 - 1000 \varepsilon_c)} \text{ para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000 \varepsilon_c (3000 \varepsilon_c - 4) + 2}{2000 \varepsilon_c (3000 \varepsilon_c - 2)} \text{ para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (2.44)$$

Tabela 2.4. Tabela comparativa dos principais parâmetros dos métodos em estudo utilizando fibra de carbono.

Parâmetro	ACI	ISIS	FIB
Deformação específica máxima do concreto na compressão	0,003	0,0035	0,0035
Deformação específica máxima do reforço de PRF na tração	$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu}$	0,006 ou 0,007	Não define. A literatura recomenda valores entre 0,006 e 0,008.
Fator de redução da parcela resistente à flexão do PRF	0,85		
Fator ambiental de redução das propriedades da fibra	0,95		
Tensão máxima no aço em serviço	$0,80 f_y$	$0,80 f_y$	$0,80 f_y$
Tensão máxima no concreto em serviço	$0,45 f'_c$	Não especifica.	$0,60 f_{ck}$ p/ combinações raras e $0,45 f_{ck}$ para combinações quase-permanentes
Tensão máxima na fibra em serviço	$0,55 f_{fu}$	Pontes: $0,65 f_{FRPu}$ Edifícios: $0,6 f_{FRPu}$	$0,8 f_{fk}$
Fator de minoração da resistência do concreto	Fatores internos nas equações e um fator de redução global entre 1,11 a 1,54 em função da ductilidade da seção (Eq. (2.9))	1,67	1,5
Fator de minoração da resistência do aço		1,176	1,15
Fator de minoração da resistência do PRFC		1,33	1,20 ou 1,35
Limite do momento de cálculo da peça reforçada em relação à situação inicial	$(\phi R_n)_{existente} \geq (1,1 S_{DL} + 0,75 S_{LL})_{nova}$	$(\phi R_n)_{existente} \geq (S_{DL} + S_{LL})_{nova}$	$(\phi R_n)_{existente} \geq (S_{DL} + S_{LL})_{nova}$
Controle da ductilidade da seção	Em função do alongamento da armadura tracionada (Eq. (2.9))	O reforço não pode alterar a falha dúctil da peça reforçada	$x/d \leq 0,45$ para $f_{ck} \leq 35$ $x/d \leq 0,35$ para $f_{ck} > 35$
Resistência à tração do substrato de concreto por ensaio de <i>pull-off</i>	1,4 MPa		1,5 MPa

3 APLICAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo faz-se a aplicação numérica de cada método em estudo à uma viga de concreto armado específica, descrita a seguir. Caracterizam-se todos os materiais utilizados na análise e expõem-se as variações dos parâmetros de cálculo utilizados.

Toda notação empregada neste capítulo é conforme o ACI 440.2R.-08.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

São descritos a seguir a viga e os materiais utilizados na aplicação, indicando as considerações feitas, dimensões e propriedades mecânicas.

3.1.1 Viga de concreto armado

Aplicam-se os métodos a uma viga de concreto armado submetida a uma carga uniformemente distribuída, aplicada no sentido de cima para baixo, o que ocasiona tração na armadura inferior. A análise é feita em sua seção transversal no meio do vão, cuja geometria está representada na Fig. 3.1.

Trata-se de uma geometria típica de vigas retas bi-apoiadas de pontes de concreto armado construídas a partir da década de 1950 (Vasconcelos, 1992). Como a análise é feita considerando apenas a seção transversal, os resultados podem ser estendidos para outros casos como seção em regiões de momento negativo ou seção variável ao longo do vão.

A armadura na região comprimida foi desconsiderada, bem como a presença da laje na região de compressão, resultando em uma seção retangular com armadura simples. A deformação específica inicial da fibra mais tracionada do concreto foi considerada com valor de 0,08%.

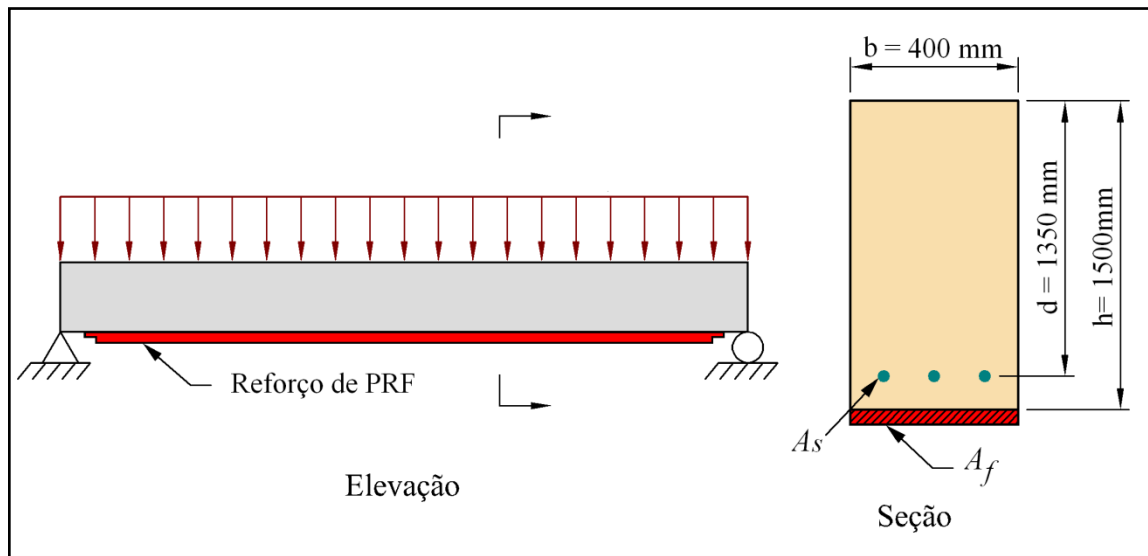


Figura 3.1. Viga apoiada com reforço de PRF, adaptado de ACI (2008).

3.1.2 Cargas e esforços

Para a avaliação do consumo de fibra por cada método, foi necessário o estabelecimento de um valor alvo de momento resistente da seção (M_{Rd}) após o reforço. Como a resistência à compressão do concreto e a taxa de armadura são variáveis na análise, o valor do momento alvo M_{Rd} foi tomado em função do valor do momento resistente de cálculo da seção sem reforço (M_{R0}) para cada combinação de materiais e taxa de armadura, tendo a seguinte relação, expressa pela Eq. (3.1):

$$M_{Rd} = j M_{R0} \quad (3.1)$$

Onde:

M_{Rd} - Momento resistente de cálculo da seção reforçada.

j - Taxa de aumento da resistência da seção, que vale 1,1; 1,2; 1,3 ou 1,4 dependendo da análise.

M_{R0} - Momento resistente de cálculo da seção sem reforço.

Os valores de M_{Rd} ficam limitados aos valores máximos de reforço permitidos por cada método, em função das parcelas de momentos devido às cargas permanentes e momentos devido às cargas variáveis, expressos na Tab. 2.4.

Neste trabalho considerou-se que a relação entre as parcelas permanentes e variáveis seja constante, representada pela Eq. (3.2), relação aceitável para pontes médias e outras obras de infraestrutura.

$$M_{LL} = 1,3 M_{DL} \quad (3.2)$$

3.1.3 Materiais

Considerou-se a análise para cada combinação de tipo de fibra, resistência do concreto e taxa de armadura onde foram utilizados quatro tipos de sistema de fibras de carbono disponíveis no mercado. As propriedades destes sistemas estão resumidas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1. Propriedade das fibras de carbono.

Parâmetro	Sika CarboDur S	Sika CarboDur M	Sika Wrap-300 C/60	Sika CarboDur H
E_f (MPa)	165.000	210.000	230.000	300.000
f_{fu} (MPa)	3.100	3.200	3.900	1.500
ε_{fu}^*	1,7%	1,35%	1,5%	0,45%

A resistência do concreto variou com os seguintes valores: 20, 25, 30, 35 e 40 MPa e para a taxa de armadura da seção foram utilizados os seguintes valores: 0,15% que geralmente é taxa mínima para armadura de tração (ρ_s), 0,15; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,65; 0,75; 0,9; 1,0 e 1,1%, sendo que todas elas conduzem a uma seção dúctil antes da aplicação do reforço.

A Tabela 3.2 apresenta um resumo das propriedades da viga e seus materiais.

Tabela 3.2. Características da viga.

Parâmetro	Valor
f'_c	20, 25, 30, 35 e 40 MPa
f_y	500 MPa
E_s	200.000 MPa
ρ_s	0,15; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,65, 0,75; 0,9; 1,0 e 1,1%
ε_{bi}	0,08 %

3.2 APLICAÇÃO NUMÉRICA

Para a determinação do momento resistente, os três métodos estudados exigem que se conheça a profundidade da linha neutra na situação de equilíbrio. Esta por sua vez só pode ser calculada se for conhecido o momento resistente através do equilíbrio das forças.

Além disso, a formulação dos três métodos é desenvolvida para a verificação da seção, isto é, deve-se de antemão informar a área de fibra a ser utilizada.

Portanto, é necessário um processo iterativo para a solução do problema. Foi desenvolvido um programa de computador para resolução das equações de equilíbrio, onde, dadas as propriedades da seção, materiais e área de fibra, calcula-se o momento resistente de cálculo da seção reforçada.

Consequentemente, o caso deve ser tratado como um problema de otimização, visto que se deseja saber qual a área mínima de fibra para cada combinação que atende à Eq. (3.3):

$$M_{Rd} \geq j M_{R0} \quad (3.3)$$

Ou escrevendo o problema de otimização, através da Eq. (3.4), que representa a função objetivo não-linear:

$$\text{Minimizar } A_f(f'_c, A_s, f_y, E_s, \varepsilon_{bi}, f_{fu*}, \varepsilon_{fu*}, E_f, b, d, d_f, M_{Rd}) \quad (3.4)$$

Sujeito à seguinte restrição:

$$\begin{aligned} M_{Rd}(A_f, f'_c, A_s, f_y, E_s, \varepsilon_{bi}, f_{fu*}, \varepsilon_{fu*}, E_f, b, d, d_f, M_{Rd}) \\ \geq j M_{R0}(f'_c, A_s, f_y, E_s, b, d) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Softwares para soluções deste tipo foram desenvolvidos e utilizados em problemas de otimização conforme descrito por Roncetti (2001, 2011).

Uma vez calculada a área de fibra mínima para cada combinação e para cada método, compara-se qual deles exigiu o menor consumo, que é o dado de interesse para a resposta do problema de pesquisa.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados oriundos da aplicação numérica dos métodos em estudo, exemplificando os resultados obtidos através de gráficos e tabelas. Faz-se também a apresentação dos resultados finais de qual dos métodos estudados conduziu ao menor consumo de fibra de carbono.

4.1 CÁLCULO DA ÁREA DE FIBRA

Apresenta-se neste item, o resultado do cálculo da área de fibra para uma das combinações analisadas no capítulo 3, com o objetivo de exemplificar o processo do dimensionamento do reforço.

A Fig. 4.1 expõe um gráfico do momento fletor resistente de cálculo em função da área de fibra adotada no reforço, indicando-se o valor do momento onde atinge-se o limite de ductilidade imposto pelo método do FIB e também os valores dos momentos máximos permitidos de reforço para os três métodos.

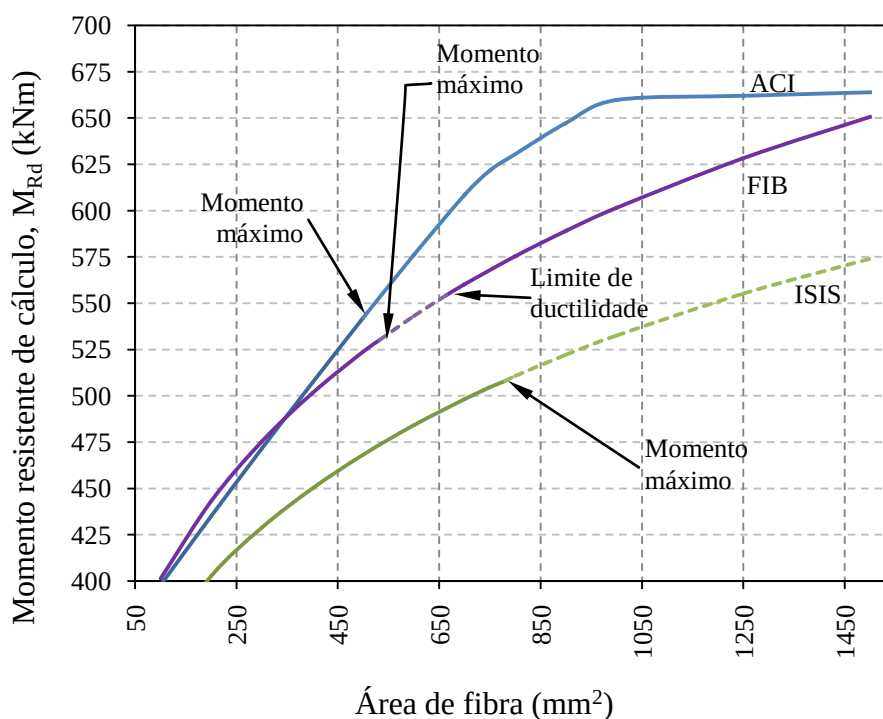


Figura 4.1. Momento fletor resistente em função da área de fibra.

Nota-se que para momentos de até 490 kN, o método do FIB conduz a consumos menores de fibra que o método do ACI, que a partir daí, resulta em consumos menores. Para todas as magnitudes de momentos, o método do ISIS conduziu a um consumo maior de fibra.

Verificou-se que o ponto de interseção entre as curvas do ACI e FIB ocorre geralmente no valor correspondente à mudança do modo de ruptura do método do FIB, passando de falha na fibra para falha no concreto.

Nota-se também que o método do ACI é assintótico com o aumento da área de fibra, o que é mais realista, diferente do método do FIB e do ISIS.

Para um determinado momento M_{Rd} , o software desenvolvido determina qual o menor valor da área de fibra de cada método, armazenando os resultados para futuro processamento e consulta.

Em próxima etapa, o software determina, para cada situação a área mínima entre os três métodos. Um exemplo do resultado desta etapa é apresentado na Tab. 4.1, onde são expostos os valores da área mínima para uma determinada combinação. As células em branco indicam que não é possível dimensionar um reforço para o nível de tensões resultantes.

Os resultados obtidos para todas as análises feitas encontram-se tabelados no Anexo.

Tabela 4.1. Exemplo de resultado do cálculo da área mínima de fibra, A_f , em mm^2 , entre os três métodos, para uma determinada combinação.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur S									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
25 MPa	1,1	33	44	65	83	100	114	107	86	72	71
	1,2	61	81	120	157	192	287	404	457	516	
	1,3	88	117	175	230	283	501	708	863		
	1,4	115	154	230	304	376	779	1028			

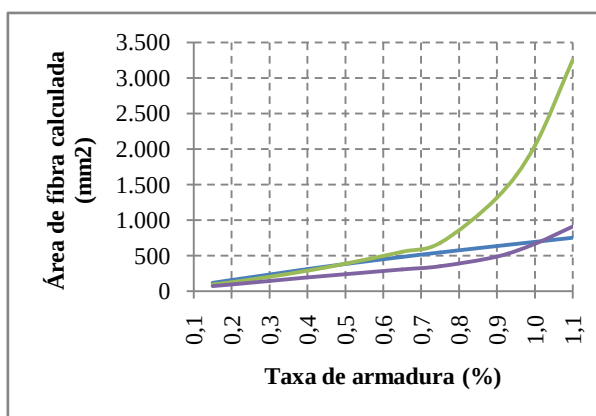
Estes resultados podem ser expressos graficamente, criando-se curvas de área mínima de fibra em função da taxa de armadura, fixando-se o tipo de fibra e a resistência do concreto.

A Fig. 4.2 traz um exemplo típico dessas curvas, para os tipos de fibra utilizados, fixando o valor da taxa de aumento da resistência da seção, que neste caso é 1,3 ($j = 1,3$).

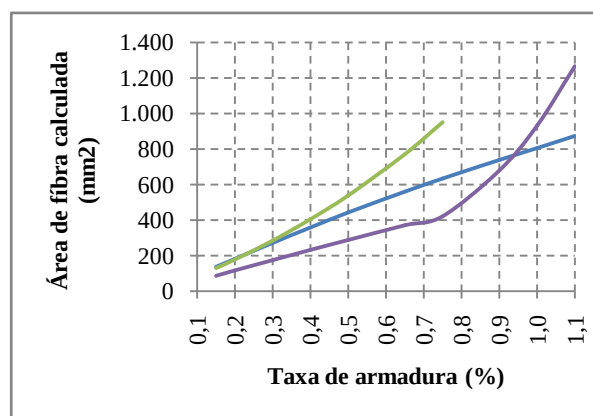
Nota-se que para os três tipos de fibras de maior deformação específica, o método do FIB consome sempre menos fibra até a faixa de taxa de armadura que vai de 0,94 a 1,05%,

sendo que a partir daí o ACI passa a consumir menos fibra, sempre na região onde o concreto falha, segundo o FIB.

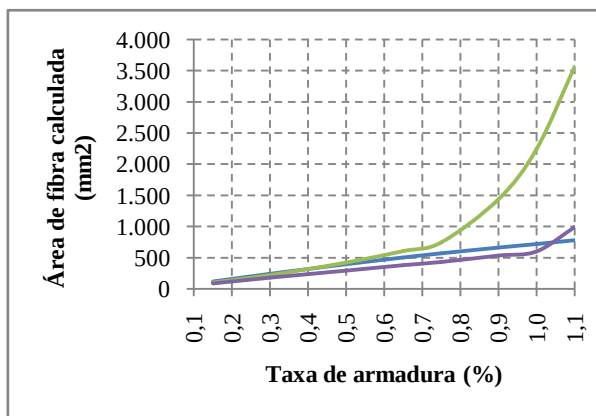
Vê-se também que a demanda de fibra pelo método do ISIS é praticamente linear enquanto a falha ocorre no PRF, mudando para exponencial quando se muda a falha para o concreto. Contribui para o aumento da demanda, o coeficiente de minoração da resistência do concreto, que é o maior entre os métodos, conforme apresentado na Tab. 2.4.



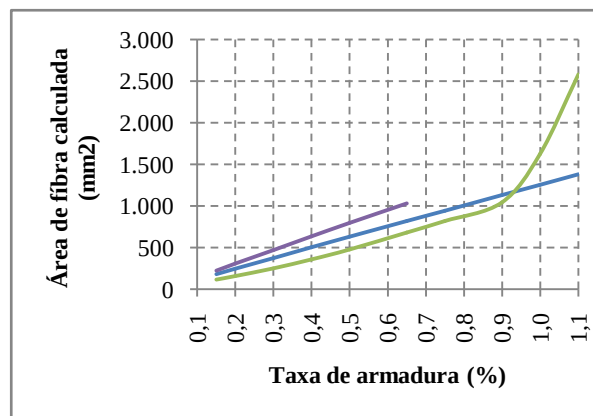
a) Fibra SikaWrap-300 C/60



b) Fibra Sika CarboDur M



c) Fibra Sika CarboDur S



d) Fibra Sika CarboDur H

Figura 4.2. Exemplo de curvas de área mínima calculada em função da taxa de armadura da seção, para os tipos de fibra utilizados.

Verifica-se que para a fibra com a menor deformação específica na ruptura, o método do ISIS leva ao menor consumo de fibra até que modo de falha passa da fibra para o concreto, a partir de onde o método do ACI conduz ao menor consumo.

O método do FIB fica muito limitado quanto ao momento resistente, devido ao critério da ductilidade e ao critério adotado de deformação específica máxima, segundo Rostasy (ROSTASY et al, 1998 apud AZEVEDO, 2008), conforme indicado no capítulo 2.

Tabela 4.4. Métodos com o menor consumo de fibra para cada combinação de parâmetros. Sika CarboDur M.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur M									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB			
	1,2	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI			
	1,3	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI				
	1,4	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI				
25 MPa	1,1	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI
	1,2	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI	
	1,3	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI		
	1,4	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI			
30 MPa	1,1	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI
	1,2	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI
	1,3	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI
	1,4	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI	
35 MPa	1,1	FIB	FIB	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI
	1,2	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI
	1,3	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI
	1,4	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI
40 MPa	1,1	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI
	1,2	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI
	1,3	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI
	1,4	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	FIB	ACI	ACI	ACI

Tabela 4.5. Métodos com o menor consumo de fibra para cada combinação de parâmetros. Sika CarboDur H.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur H									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	FIB	ACI	ACI	ISIS		
	1,2	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ACI	ACI			
	1,3	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS			
	1,4	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ACI				
25 MPa	1,1	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ACI	ACI	ACI
	1,2	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ACI	ACI	
	1,3	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ACI	ACI		
	1,4	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ACI			
30 MPa	1,1	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ACI	ACI	ACI
	1,2	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ACI	ACI	ACI
	1,3	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ACI	ACI	ACI
	1,4	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ACI	
35 MPa	1,1	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI
	1,2	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ACI	ACI
	1,3	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ACI	ACI
	1,4	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ACI	ACI	ACI	ACI
40 MPa	1,1	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ACI	ISIS
	1,2	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ACI
	1,3	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ISIS	ISIS	ACI
	1,4	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ISIS	ACI	ACI	ACI	ACI

Nota-se pelas tabelas 4.2 a 4.5, a correspondência da escolha do método com menor consumo de fibra com os gráficos da Fig. 4.2.

Também nota-se a prevalência do método do FIB ao exigir menos fibra, para os tipos de fibra SikaWrap-300 C/60, Sika CarboDur S e Sika CarboDur M. Contribuem para isso, segundo o método FIB, o menor valor de minoração da resistência para a fibra, concreto e aço, maior valor permitido para deformação específica da fibra, sendo este constante e independente das propriedades dos materiais.

É claro também que quanto maior a resistência da seção original, representada por uma maior taxa de armadura e maior resistência à compressão do concreto, na maioria absoluta das combinações, o método do ACI conduz a consumos menores de fibra, o que pode ser visto nos gráficos da Fig. 4.2. Colabora para isso o fato do ACI considerar a deformação específica da máxima da fibra de forma mais realista, prevendo melhor o comportamento da seção com valores maiores de momento. Além disso, o coeficiente de minoração da resistência é função da ductilidade da seção, permitindo resistências maiores e, conseqüentemente área de fibra menor, para momentos maiores.

Com base nas tabelas apresentadas é possível determinar a proporção de cada método que conduziu ao menor consumo de fibra, em relação ao total de combinações analisadas, que neste caso foram oitocentas. O resumo deste resultado é apresentado na Tab. 4.6.

Tabela 4.6. Participação dos métodos quanto à conduzir ao menor consumo de fibras para as combinações analisadas.

Método	Contagem	%
ACI	183	23
ISIS	125	16
FIB	410	51
Não foi possível dimensionar o reforço	82	10
Total	800	100

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são feitas as considerações finais sobre os métodos analisados e sobre os resultados oriundos da aplicação numérica dos mesmos. São feitas também sugestões para trabalhos futuros, que podem estender o conhecimento sobre os métodos em outras geometrias de estruturas e variações mais amplas de propriedades dos materiais.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS MÉTODOS ESTUDADOS

Foram estudadas as principais características do método do ACI, ISIS e FIB, bem como as respectivas formulações e também o comportamento dos mesmos em relação à variação das propriedades dos materiais. Diante disso, é possível fazer as seguintes considerações:

- a) o método do ACI permite garantir a ductilidade de uma forma mais realista, principalmente quando as áreas de fibra são maiores, levando a um valor assintótico do momento resistente de cálculo máximo possível, acarretando segurança;
- b) o método do FIB utiliza um critério simplificado para atestar a ductilidade da seção, o que pode levar a valores conservadores de momento resistente de cálculo máximo, como mostrado na Fig. 4.2(d);
- c) o método do ISIS estabelece um valor constante para a deformação específica máxima de cálculo para a fibra, podendo levar a resultados subestimados de momento resistente, principalmente para concretos com resistência mais baixa, espessuras maiores de reforços ou número maior de camadas;
- d) enquanto o método do FIB não aponta a deformação específica máxima de cálculo na fibra, o método do ACI leva em consideração a resistência do concreto, número de camadas e espessura do reforço, conforme a Eq. (2.6), levando a resultados mais realistas. Essa falta de especificação por parte do FIB leva a divergências quanto ao modo de ruptura dominante em relação ao ACI para uma mesma profundidade de linha neutra;

- e) para os três métodos, notou-se a importância de se definir com acurácia a resistência do concreto da estrutura a ser reforçada, pois se consegue maior eficiência da fibra quanto maior for esta resistência;
- f) ao longo do trabalho, verificou-se que os manuais do ACI e ISIS são muito didáticos, com uma estrutura bem organizada, clareza na formulação e aplicação dos métodos e exemplos completos de aplicação, facilitando o aprendizado;
- g) o manual do FIB apresenta estrutura mais complexa e formulação truncada, exigindo desenvolvimento de novas equações para contemplar outros modos de falha. Não possui exemplos de aplicação, não sendo identificado na literatura consultada, qualquer exemplo ou aplicação completa.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A ANÁLISE NUMÉRICA

Considerando a viga estudada, os parâmetros que influenciam no cálculo da fibra e a metodologia utilizada, considera-se que foram alcançados os objetivos propostos de avaliar qual método leva a um menor consumo de fibra para determinadas situações. Também é possível fazer as seguintes considerações:

- a) para taxas de armadura até 0,5% e para fibras SikaWrap-300 C/60, Sika CarboDur S e Sika CarboDur M até f_{ck} 30 MPa o método FIB conduziu ao menor consumo em todas as situações;
- b) em 51% das combinações analisadas, o método do FIB conduziu ao menor consumo de fibras;
- c) em 23% das combinações analisadas, o método do ACI conduziu ao menor consumo de fibras;
- d) em 16% das combinações analisadas, o método do ISIS conduziu ao menor consumo de fibras;
- e) em 10% das combinações analisadas, não foi possível dimensionar um reforço viável, sendo que esta situação ocorreu sempre com taxa de armadura igual ou superior a 0,75%.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante da complexidade do tema, da quantidade de parâmetros envolvidos no dimensionamento de reforços com PRF, na diversidade de geometrias encontradas nas estruturas de concreto, recomenda-se que sejam abordados em trabalhos futuros:

- a) variação da geometria da seção, verificando a demanda de fibra pelos métodos em vigas menores, usuais em edifícios, bem como lajes;
- b) consideração de seções “T”, visto que vigas retangulares geralmente tem sua parte superior em comum com lajes;
- c) estudo da influência da armadura de compressão na demanda de fibra;
- d) consideração dos estados limites de serviço, visto que no presente trabalho abordou-se apenas o estado limite último;
- e) extensão da formulação dos métodos para análise de peças protendidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-08**: Guide for the design and construction of externally bonded FRP Systems for Strengthening concrete structures. Farmington Hills, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7482**: Fios de aço para estruturas de concreto protendido. Rio de Janeiro, 2008.

ATADERO, R., KARBHARI, V. M. Development of resistance factors for LRFD design for FRP strengthening of reinforced concrete bridges. 2006. 406 f. Projeto de pesquisa. University of California.

AZEVEDO, D.M.M. **Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP. Recomendações para dimensionamento**. Porto, 2008. 328 f. Dissertação (Mestrado), Universidade do Porto.

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

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **S806-02**: Design and Construction of building components with fibre-reinforcement polymers. [S.l.], 2009.

CARNEIRO, L.A.V. **Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resina e fibras**. Rio de Janeiro, 2004. 405 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DAWOOD, M., RIZKALLA, S. Development of a Carbon Fiber Reinforced Polymer System for Strengthening and Repair of Steel Bridges and Structures. In: 2nd CANADIAN CONFERENCE ON EFFECTIVE DESIGN OF STRUCTURES, 2., 2008, Hamilton.

DE LUCA, L.C.S. **Cisalhamento em viga de concreto armado reformadas com composto de fibra de carbono: avaliação de critérios de projeto**. Florianópolis, 2006. 265 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures - Bulletin 14**. Lausanne, FIB 2001.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído**

por compósito cimentício de alto desempenho. São Carlos, 2007. 328 f. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FICO, Raffaello. **Limit states design of concrete structures reinforced with FRP bars.** Naples, 2007. 167 f. Tese (Doutorado), University of Naples Federico II.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira.** São Carlos, 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo.

FUKUYAMA, H., TUMIALAN, G., NANNI, A. Japanese design and construction guidelines for seismic retrofit of building structures with composites. In: SEVENTH MANAGEMENT PANEL ON COLLABORATION RESEARCH ACTIVITIES BETWEEN JRC-IPSC J-NILIM AND J-BRI, 7., 2002, Tsukuba.

GARCEZ, M. R. **Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras.** Porto Alegre, 2007. 267 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HOLLAWAY, L. C., CADEI, J. Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. **Progress in structural engineering and materials**, v. 4, n. 2, 131-148, jun. 2002.

ISIS. **FRP Rehabilitation of reinforced concrete structures - Design manual 4, version 2.** Winnipeg, 2008.

ITALIAN NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **CNR-DT 200/2004:** Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Roma, 2004.

JSCE STANDARD SPECIFICATION. **Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials.** [S.I: s.n., 2001].

KARANTZIKIS, M.J., ANTONOPOULOS, C.P., SKAMAGIS, D.V. Strengthening of large diameter PCCP pipe with external application of FRP. In: 8th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIBER REINFORCED POLYMER REINFORCEMENT FOR THE CONCRETE STRUCTURES, 8., 2007, Patras.

MACHADO, A.P. **Fibras de carbono Manual prático de dimensionamento.** Belo Horizonte: Basf, 2006.

MENDES, P. T. C. **Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras.** São Carlos, 2009. 236 f. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MOTAVALLI, M, CZADERSKI, C. FRP Composites for Retrofitting of Existing Civil Structures in Europe: State-of-the-Art Review. In: COMPOSITES E POLYCON 2007, 2007, Tampa.

MULLINS, G., RAJAN, S., SUH, K., WINTERS, D. Underwater Fiber-Reinforced Polymers Repair of Prestressed Piles in the Allen Creek Bridge. **Journal of composites for construction**, v. 9. n. 2, p. 136-146, abr. 2005.

NEZAMIAN, A., SETUNGE, S. Comparison between ACI 440 and FIB 14 design guidelines in using CFRP for strengthening of a concrete bridge headstock. In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPOSITE MATERIALS IN BRIDGES AND STRUCTURES, 4., 2004, Calgary.

SEN, R., MULLINS, G. Application of FRP composites for underwater piles repair. **Composites Part B: Engineering**, Tampa, v. 38, issue 5-6, p. 751-758, jul./set. 2007.

GARDEN, H.N., SHAHIDI, E.G. The use of advanced composite laminates as structural reinforcement in a historic building. In: SHENOI, R.A., MOY, S.S.J., HOLLAWAY, L.C. **Advanced polymer composites for structural application in construction**. 1. ed. Londres: Thomas Telford Publishing, 2002.p. 457-465.

RONCETTI, L. Otimização de vigas considerando estados limites últimos, de utilização e disposições construtivas. In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza.

_____. Structural and economical optimization of welded steel storage tanks. In: 21st BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 21., 2011, Natal.

SIKA. Catálogo Construção SIKAWrap-300 C/60. Tecido de fibra de carbono para reforço estrutural. Osasco: SIKA, 2008.

_____. **Catálogo Construção CarboDur. Lamina de fibra de carbono para reforço estrutural**. Osasco: SIKA, 2009.

SOUZA, V.C., RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1^a edição. Editora PINI: São Paulo, 1998.

THE CONCRETE SOCIETY. TR55: Design Guidance for Strengthening Concrete Structures using Fibre Composite Materials 2nd edition. [S.I], 2004.

TRANTAFILLOU, T. C. Strengthening of masonry structures using. **Journal of composites for construction**, [S. I.], v. 2, n. 3, p. 96-104, mai. 1998.

VASCONCELOS, A.C. **O concreto no Brasil. Recorde - Realizações - História**. Volume I. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1992.

WU, Z., WANG, X., IWASHITA, K. State-of-the-Art of Advanced FRP Applications in Civil Infrastructure. In: COMPOSITES E POLYCON 2007, 2007, Tampa.

APÊNDICE

Neste apêndice são apresentados de forma tabular, os valores das áreas mínimas de fibra calculadas para cada combinação de parâmetros, segundo cada método estudado. Estes valores foram utilizados para comparação entre os métodos e geração das tabelas 4.1 a 4.4.

Tabela A.1. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do ACI. Fibra SikaWrap-300 C/60.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	SikaWrap-300 C/60									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	115	153	226	293	355	441	501			
	1,2	177	237	353	465	573	739	880			
	1,3	240	321	481	638	796	1.057				
	1,4	302	405	610	814	1.025	1.439				
25 MPa	1,1	74	99	148	192	232	284	314	354	383	425
	1,2	127	170	255	336	414	524	596	709	809	
	1,3	180	241	362	481	598	770	887	1.098		
	1,4	233	312	471	628	784	1.021	1.192			
30 MPa	1,1	46	62	93	121	146	178	194	212	220	226
	1,2	92	124	186	246	304	384	434	505	551	598
	1,3	138	186	280	372	462	593	678	806	895	997
	1,4	184	248	374	499	623	806	928	1.118	1.262	
35 MPa	1,1	34	46	67	86	101	118	124	127	124	117
	1,2	76	101	150	197	241	300	335	381	407	429
	1,3	117	157	234	309	382	484	548	638	694	751
	1,4	159	212	318	422	523	669	763	899	990	1.091
40 MPa	1,1	32	43	63	82	98	118	127	135	137	135
	1,2	71	94	141	186	229	288	324	372	400	425
	1,3	109	146	220	291	361	460	522	611	667	720
	1,4	148	198	298	397	493	632	722	853	938	1.021

Tabela A.2. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do ACI. Fibra SikaCarboDur S.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur S									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	77	102	147	184	215	250	274	411		
	1,2	145	193	284	370	450	569	674			
	1,3	213	284	423	557	690	908				
	1,4	281	376	563	748	936	1.301				
25 MPa	1,1	46	60	84	101	112	114	107	86	72	71
	1,2	104	137	200	257	307	369	404	457	516	
	1,3	162	215	317	414	504	629	708	863		
	1,4	220	293	435	571	703	893	1.028			
30 MPa	1,1	42	56	80	99	114	126	127	118	107	92
	1,2	95	126	186	241	292	358	395	443	472	502
	1,3	148	197	293	384	471	592	667	776	851	940
	1,4	201	268	400	528	651	829	944	1.120	1.255	
35 MPa	1,1	39	52	76	96	113	130	136	137	133	124
	1,2	88	117	174	227	277	344	384	436	466	493
	1,3	137	183	272	359	443	560	634	739	806	873
	1,4	186	248	371	492	609	778	887	1.047	1.155	1.269
40 MPa	1,1	37	49	72	93	110	131	140	147	148	145
	1,2	82	110	164	215	264	331	371	426	458	487
	1,3	128	171	256	338	418	532	605	707	772	835
	1,4	174	232	348	462	574	735	840	992	1.092	1.192

Tabela A.3. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do ACI. Fibra SikaCarboDur M.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur M									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	77	102	147	184	215	250	274	411		
	1,2	145	193	284	370	450	569	674			
	1,3	213	284	423	557	690	908				
	1,4	281	376	563	748	936	1.301				
25 MPa	1,1	46	60	84	101	112	114	107	86	72	71
	1,2	104	137	200	257	307	369	404	457	516	
	1,3	162	215	317	414	504	629	708	863		
	1,4	220	293	435	571	703	893	1.028			
30 MPa	1,1	42	56	80	99	114	126	127	118	107	92
	1,2	95	126	186	241	292	358	395	443	472	502
	1,3	148	197	293	384	471	592	667	776	851	940
	1,4	201	268	400	528	651	829	944	1.120	1.255	
35 MPa	1,1	39	52	76	96	113	130	136	137	133	124
	1,2	88	117	174	227	277	344	384	436	466	493
	1,3	137	183	272	359	443	560	634	739	806	873
	1,4	186	248	371	492	609	778	887	1.047	1.155	1.269
40 MPa	1,1	37	49	72	93	110	131	140	147	148	145
	1,2	82	110	164	215	264	331	371	426	458	487
	1,3	128	171	256	338	418	532	605	707	772	835
	1,4	174	232	348	462	574	735	840	992	1.092	1.192

Tabela A.4. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do ACI. Fibra SikaCarboDur H.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur H									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	133	178	264	346	424	535	614			
	1,2	191	256	383	508	629	818	977			
	1,3	250	335	504	671	840	1.122				
	1,4	309	414	625	838	1.057	1.498				
25 MPa	1,1	94	126	188	247	303	380	427	495	545	610
	1,2	143	192	289	383	475	608	695	835	957	
	1,3	193	259	391	521	649	841	973	1.211		
	1,4	243	326	493	659	825	1.080	1.265			
30 MPa	1,1	88	118	178	236	292	369	417	483	524	565
	1,2	136	182	276	368	457	587	671	795	878	965
	1,3	184	247	374	500	625	809	931	1.116	1.248	1.400
	1,4	232	312	473	634	794	1.034	1.196	1.452	1.648	
35 MPa	1,1	88	119	180	241	299	383	435	509	554	598
	1,2	136	183	278	372	465	600	688	816	899	982
	1,3	184	248	376	504	632	820	944	1.129	1.253	1.380
	1,4	232	313	475	638	800	1.043	1.205	1.450	1.618	1.796
40 MPa	1,1	88	119	182	244	305	393	449	529	579	627
	1,2	136	183	279	375	470	610	701	834	921	1.006
	1,3	184	248	377	507	637	829	956	1.144	1.269	1.393
	1,4	232	313	476	640	805	1.051	1.214	1.460	1.624	1.791

Tabela A.5. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do ISIS. Fibra SikaWrap-300 C/60.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	SikaWrap-300 C/60									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	38	56	99	156	228		1.114			
	1,2	69	98	166	250	362	1.036	2.196			
	1,3	100	140	233	346	576	1.762				
	1,4	131	182	301	446	860	2.914				
25 MPa	1,1	36	52	90	138	196	309	528	1.212	2.190	
	1,2	66	93	154	227	314	548	966	2.352		
	1,3	97	134	219	318	435	879	1.601			
	1,4	127	176	285	411	560	1.327	2.543			
30 MPa	1,1	35	50	84	127	177	271	349	671	1.070	1.727
	1,2	65	90	147	213	290	429	599	1.232	2.019	3.563
	1,3	95	131	211	302	406	591	958	2.055	3.555	
	1,4	125	172	275	391	523		1.439	3.294		
35 MPa	1,1	34	48	81	119	164	247	313	451	679	1.018
	1,2	64	88	142	204	274	398	495	817	1.241	1.896
	1,3	94	129	205	290	386	553	682	1.315	2.048	3.254
	1,4	123	169	268	378	500	712	997	1.998	3.230	
40 MPa	1,1	34	47	78	114	155	230	289	393	488	704
	1,2	63	87	139	198	263	377	464	616	885	1.285
	1,3	93	127	201	282	373	527	644	963	1.424	2.109
	1,4	122	167	263	368	484	680	828	1.428	2.158	3.296

Tabela A.6. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do ISIS. Fibra SikaCarboDur S.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur S									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	53	78	138	217	318	781	1.552			
	1,2	96	136	231	348	505	1.444	3.061			
	1,3	139	195	325	483		2.455				
	1,4	182	254	420	621	1.198					
25 MPa	1,1	51	73	126	192	273	431	736	1.689	3.053	
	1,2	93	130	215	317	438	764	1.347	3.279		
	1,3	135	187	306	444	607	1.225	2.232			
	1,4	177	245	397	574	780	1.850	3.545			
30 MPa	1,1	49	69	118	176	247	378	486	936	1.491	2.408
	1,2	91	126	205	298	405	598	835	1.717	2.814	
	1,3	132	183	294	420	565	824	1.335	2.864		
	1,4	174	240	383	545	730		2.005			
35 MPa	1,1	48	67	112	166	229	344	437		946	1.419
	1,2	89	123	199	285	383	555	690		1.729	2.643
	1,3	130	179	286	405	539	771	951		2.855	
	1,4	172	236	373	526	697	992				
40 MPa	1,1	47	66	108	158	217	321	403	548	681	981
	1,2	88	121	194	275	367	526	647	858	1.234	1.791
	1,3	129	177	280	394	520	735	898		1.985	2.939
	1,4	171	233	366	513	674	948	1.155		3.007	

Tabela A.7. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do ISIS. Fibra SikaCarboDur M.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur M									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	42	61	109	171	250		1.220			
	1,2	75	107	181	274	397		2.405			
	1,3	109	153	255	379	631	1.929				
	1,4	143	200	330	488	942	3.191				
25 MPa	1,1	40	57	99	151	215	339	579	1.327	2.399	
	1,2	73	102	169	249	344	600	1.058	2.576		
	1,3	106	147	240	349	477	963	1.754			
	1,4	139	193	312	451	613	1.453	2.785			
30 MPa	1,1	38	55	93	139	194	297	382	735	1.172	1.892
	1,2	71	99	161	234	318	470	656	1.349	2.211	
	1,3	104	143	231	330	444	648	1.049	2.250	3.894	
	1,4	137	188	301	428	573	926	1.576	3.607		
35 MPa	1,1	37	53	88	130	180	271	343	494	743	1.115
	1,2	70	97	156	224	301	436	542	894	1.359	2.076
	1,3	103	141	224	318	423	606	747	1.441	2.243	3.563
	1,4	135	185	293	414	548	780	1.092		3.537	
40 MPa	1,1	37	51	85	124	170	252	316	430	535	771
	1,2	69	95	152	216	288	413	509	674	970	1.407
	1,3	101	139	220	309	408	577	705	1.055	1.560	2.310
	1,4	134	183	288	403	530	745	907	1.565	2.363	3.610

Tabela A.8. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do ISIS. Fibra SikaCarboDur H.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur H									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	47	69	122	192			883	3.652		
	1,2	85	120	204	308		822	1.741			
	1,3	123	172	287	427	457	1.397	3.765			
	1,4	161	225	372		682	2.311				
25 MPa	1,1	45	64	111	170	242		419	961	1.737	
	1,2	82	115	190	280	388	435	766	1.865		
	1,3	119	166	270	393		697	1.270	3.832		
	1,4	157	217	351	508		1.052	2.017			
30 MPa	1,1	43	61	104	156	219	335		532	848	1.370
	1,2	80	111	182	263	358		475		1.601	2.826
	1,3	117	162	260	372	500		760	1.630	2.819	
	1,4	154	212	339	483	646	671	1.141	2.612		
35 MPa	1,1	42	59	99	147	203	305	387	357	538	807
	1,2	79	109	176	252	339	491		648	984	1.504
	1,3	115	159	253	358	477	682	820	1.043	1.624	2.580
	1,4	152	209	330	466	617			1.585	2.561	
40 MPa	1,1	41	58	96	140	192	284	356			558
	1,2	78	107	171	244	325	465	573		702	1.019
	1,3	114	156	248	348	460	650		764	1.129	1.672
	1,4	151	206	324	454	597	839			1.711	2.614

Tabela A.9. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do FIB. SikaWrap-300 C/60.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	SikaWrap-300 C/60									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	28	37	53	67	80	132	206			
	1,2	50	67	98	128	155	319				
	1,3	73	97	143	188	257					
	1,4	95	127	189	248	397					
25 MPa	1,1	28	37	54	70	84	102	131	226		
	1,2	50	67	99	130	160	206	312			
	1,3	72	97	145	191	235	360	557			
	1,4	95	127	190	251	311	559				
30 MPa	1,1	28	37	55	72	87	108	119	157	214	288
	1,2	50	67	100	132	163	205	232	374	519	
	1,3	72	97	145	192	238	303	385	669		
	1,4	94	126	190	252	313	401	595			
35 MPa	1,1	28	37	56	73	89	111	125	142	160	210
	1,2	50	67	100	133	164	209	237	277	377	503
	1,3	72	97	145	193	240	307	350	487	669	908
	1,4	94	126	190	253	315	405	464	756	1.057	
40 MPa	1,1	27	37	56	74	90	114	128	148	159	169
	1,2	50	67	100	133	166	212	241	283	309	
	1,3	72	96	145	193	241	310	354	418	514	
	1,4	94	126	190	253	316	408	468	583		

Tabela A.10. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do FIB. Fibra SikaCarboDur S.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur S									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	33	44	63	80	94	184	287			
	1,2	61	80	118	153	206	445				
	1,3	88	117	173	227	358					
	1,4	115	153	228	300	553					
25 MPa	1,1	33	44	65	83	100	121	183	315		
	1,2	61	81	120	157	192	287	434			
	1,3	88	117	175	230	283	501	777			
	1,4	115	154	230	304	376	779				
30 MPa	1,1	33	44	66	85	103	127	141	219	298	401
	1,2	60	81	120	159	195	247	309	521	724	
	1,3	88	117	175	232	287	366	537	932		
	1,4	115	153	230	306	379	548	829			
35 MPa	1,1	33	44	66	87	106	132	147	168	223	292
	1,2	60	81	121	160	198	251	285	390	526	701
	1,3	87	117	176	233	289	371	423	679	932	1.266
	1,4	114	153	230	307	381	490	620	1.054	1.473	
40 MPa	1,1	33	44	66	88	107	135	152	175	188	229
	1,2	60	81	121	161	199	254	290	339	412	
	1,3	87	117	176	234	291	374	427	533	716	
	1,4	114	153	230	307	383	494	565	813		

Tabela A.11. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do FIB. Fibra SikaCarboDur M.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur M									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	35	46	67	85	100	145	226			
	1,2	62	83	122	159	192	350				
	1,3	90	119	178	233	285					
	1,4	117	156	233	307	434					
25 MPa	1,1	35	46	68	88	106	129	141	248		
	1,2	62	83	124	162	198	248	341			
	1,3	89	120	179	236	291	394	610			
	1,4	117	156	234	310	384	612				
30 MPa	1,1	35	46	69	90	110	136	150	169	234	315
	1,2	62	83	124	164	202	256	289	409	569	
	1,3	89	119	179	238	294	376	427	732		
	1,4	116	156	234	312	387	496	652			
35 MPa	1,1	34	46	69	91	112	140	157	179	192	230
	1,2	62	83	124	165	204	260	295	345		551
	1,3	89	119	179	239	296	380	434	534	600	995
	1,4	116	155	234	312	389	501	573	828		
40 MPa	1,1	34	46	70	92	114	143	161	186	201	214
	1,2	61	82	124	166	206	263	300	352	385	
	1,3	88	119	179	239	298	383	438	518	569	
	1,4	115	155	234	312	390	504	577	685		

Tabela A.12. Área mínima de fibra calculada (mm²). Método do FIB. Fibra SikaCarboDur H.

f_{ck}	$\frac{MR_d}{MR_0}$	Sika CarboDur H									
		Taxa de armadura									
		0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,75	0,9	1,0	1,1
20 MPa	1,1	104	141	213	278	334					
	1,2	169	229	346	455						
	1,3	234	316	478							
	1,4	299	404	609							
25 MPa	1,1	102	140	213	283	347	430				
	1,2	167	227	346	460	569					
	1,3	231	314	477	636	789					
	1,4	296	400	608	812						
30 MPa	1,1	100	137	212	285	353	446	501			
	1,2	165	224	344	461	574	734				
	1,3	229	310	475	637	795					
	1,4	293	397	605	812	1.015					
35 MPa	1,1	98	135	210	284	356	455	516	597		
	1,2	163	222	342	460	576	743				
	1,3	226	308	472	635	796	1.029				
	1,4	290	393	602	810	1.016					
40 MPa	1,1	97	133	208	283	356					
	1,2	161	220	339	458						
	1,3	224	305	469	633						
	1,4	287	390	598							