

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE TÉCNICAS DE REFORÇO ESTRUTURAL:
UMA ANÁLISE NORMATIVA REFERENTE A PILARES DE CONCRETO
ENCAMISADOS COM CFRP**

VINÍCIUS MOURA SILVA

São Luís – MA

2019

VINÍCIUS MOURA SILVA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE TÉCNICAS DE REFORÇO ESTRUTURAL:
UMA ANÁLISE NORMATIVA REFERENTE A PILARES DE CONCRETO
ENCAMISADOS COM CFRP**

Trabalho de Graduação de Conclusão de Curso apresentado à Fundação Universidade Federal do Maranhão, como requisito avaliativo da atividade acadêmica Trabalho de Conclusão de Curso, sob a orientação do Prof. Msc. Mikhail Luczynski.

São Luís – MA

2019

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Silva, Vinicius Moura.

Contribuição ao estudo de técnicas de reforço estrutural: uma análise normativa referente a pilares de concreto encamisados com CFRP / Vinicius Moura Silva. - 2019.

49 f.

Orientador(a): Mikhail Luczynski.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, Cidade Universitária Dom Delgado - São Luis/MA, 2019.

1. ACI 440.2R17. 2. Concreto. 3. Fibra de Carbono. 4. Pilar. 5. Reforço Estrutural. I. Luczynski, Mikhail. II. Título.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me permitido chegar até aqui, me guiando e me dando as forças necessárias para a conclusão de mais um objetivo na minha vida, melhor Mestre que alguém poderia ter.

À minha família e amigos, que tanto me apoiaram nessa trajetória, sem nunca medir esforços para que eu concluísse este curso.

À minha mãe, Vera Lúcia, que foi o meu pilar durante toda a minha vida. Sempre estando comigo, me dando forças e aconselhamentos.

Ao meu pai, Antônio Gomes, "*In Memoriam*", que de forma indireta (ou direta), me apresentou à engenharia civil.

Às minhas tias, Conceição de Maria e Josélia Maria que me receberam em sua casa para que essa caminhada começasse a ser trilhada.

Ao Prof. Mikhail Luczynski pela sua orientação e contribuições que me proporcionou, sem as quais não poderia ter chegado ao fim.

“E conhecereis a verdade, e a verdade vos libertará!”

(João 8:32)

RESUMO

Tecnologias mais avançadas permitiram o uso de novos materiais na engenharia, como é o caso das fibras de carbono. Estruturas de concreto que, eventualmente, necessitem de reforços ou tiverem sua funcionalidade original modificada, podem utilizar de sistemas poliméricos reforçados com fibra de carbono para alcançar tais objetivos. Neste trabalho, fez-se uma abordagem geral sobre os principais tipos de reforço de estruturas, dando uma maior ênfase no reforço com CFRP, visto que sua utilização ainda é pontual devido, muitas vezes, à falta de conhecimento e de estudos sobre o mesmo. Aqui, avaliou-se as estimativas para a carga de ruptura do concreto confinado para pilares de seções retangulares e circulares, mediante a norma americana ACI 440.2R-17 e realizando, posteriormente, uma comparação com a versão de 2001, da dita norma, e com o método de Guimarães et al (2007)¹ para essas estimativas. Realizou-se, também um contraste dos dados obtidos por esses autores, por meio do ensaio de compressão axial de corpos de prova, a fim de medir a confiabilidade das estimativas normativas. Por fim, foi constatado o ganho de resistência devido ao reforço com fibras de carbono e que o método da norma americana vigente, para estimar este ganho, apresenta boa confiabilidade.

Palavras-chave: Reforço Estrutural. Fibra de Carbono. Pilar. Concreto. ACI 440.2R-17.

¹ - GUIMARÃES, A. M. P.; AGUIAR, A. J. O.; OLIVEIRA, D. R. C. **Análise experimental de Pilares Reforçados com CFRP**. Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon. 2007.

ABSTRACT

Advanced Technologies allowed the use of new materials in engineering, such as carbon fiber. Concrete structures that may eventually require reinforcements or have their original functionality modified may utilize carbon fiber reinforced polymer systems to achieve such objectives. In this work, a general approach was made on the main types of reinforcement structures, with a greater emphasis on the reinforcement using CFRP, since its use is still punctual, often due to the lack of knowledge and studies about it. Here, the estimates for the load of rupture of the confined concrete for pillars with rectangular and circular sections were evaluated, through the American standard ACI 440.2R-17 and later, making a comparison with the 2001 version, of said norm, and with the Guimarães et al (2007) ²method for these estimates. A comparison of the data obtained by these authors was also carried out through the axial compression test of test specimens in order to measure the reliability of the normative estimates. Finally, it was verified the resistance gain due to the reinforcement with carbon fibers and that the current American standard method, to estimate this gain, presents good reliability.

Key-words: Structural reinforcement. Carbon fiber. Column. Concrete. ACI 440.2R-17.

² - GUIMARÃES, A. M. P.; AGUIAR, A. J. O.; OLIVEIRA, D. R. C. **Análise experimental de Pilares Reforçados com CFRP**. Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon. 2007.

LISTAS DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 01 – Propriedades do primer e do epóxi estruturante.....	39
Tabela 02 – Propriedades da fibra de carbono	39
Tabela 03 – Características genéricas das fibras de carbono	41
Tabela 04 – Cargas de ruptura e rendimento do reforço para seções retangulares .	42
Tabela 05 – Cargas de ruptura e rendimento do reforço para seções circular	42
Tabela 06 – Estimativa da resistência do concreto confinado	43
Gráfico 01: Carga de Ruptura (Seção Transversal Retangular).....	44
Gráfico 02: Carga de Ruptura (Seção Transversal Circular)	44

LISTAS DE FIGURAS

Figura 01: Viaduto sobre o Eixão Sul (BSB) que desabou em 02/2018.	14
Figura 02: Viaduto sobre a Marginal Pinheiros (SP) que cedeu em 11/2018	15
Figura 03: Degradação do pilar da ponte IP3, Portugal.	16
Figura 04: Vigas de concreto simples (a) e de concreto armado (b) submetidas a esforços solicitantes.	19
Figura 05: Flambagem de pilar.....	20
Figura 06: Comprimento de flambagem.	21
Figura 07: Falha de um pilar devido ao esforço cortante.	23
Figura 08: Reforço com concreto armado.	25
Figura 09: Reforço por adição de chapas.	27
Figura 10: Reforço à flexão por adição de chapas.	28
Figura 11: Reforço ao cisalhamento por adição de chapas.....	28
Figura 12: Reforço de Pilares – exemplo de fixação, a) Cantoneiras chumbadas, b) com <i>parabolt</i> , c) Chapas metálicas ligadas por cantoneiras.	29
Figura 13: Comparação de certas propriedades entre aço, alumínio e material compósito.	30
Figura 14: Influência da seção no desempenho dos pilares confinados com FRP. ...	31
Figura 15: Diagrama comparativo Tensão vs. Deformação.	32
Figura 16: Diagrama tensão – deformação de concreto confinado com CRFP, com aço e não confinado.....	33
Figura 17: Sistemas compostos com fibras de carbono.....	34
Figura 18: Área efetiva de concreto confinado.	37
Figura 19: Seção transversal, traspasse e vista lateral dos pilaretes.....	38
Figura 20: Pilaretes posicionados para ensaio de compressão axial.	40

LISTAS DE SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
CFRP	Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (do original <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>)
FRP	Polímero reforçado com Fibras (do original <i>Fiber Reinforced Polymer</i>)
F_{CR}	Carga crítica de Euler
E	Módulo de elasticidade
I	Momento de inércia da seção transversal
l_e	Comprimento de flambagem
λ	Índice de esbeltez
i	Raio de giração mínimo da seção bruta de concreto
A	Área da seção transversal
ρ_{sw}	Armadura mínima
A_{sw}	Área da seção transversal dos estribos
b_w	Largura média da alma
s	Espaçamento entre os estribos
α	Inclinação dos estribos, em relação ao eixo longitudinal
$f_{ct,m}$	Resistência à tração média do concreto
f_{ywk}	Resistência característica ao escoamento do aço
A_s	Área de aço
ω	Taxa mecânica mínima de armadura longitudinal de flexão
A_c	Área de concreto referente à seção transversal da peça
f_{cd}	Resistência de cálculo à compressão do concreto
f_{yd}	Tensão de escoamento do aço de cálculo
f_{cc}'	Resistência à compressão do concreto confinado
f_c'	Resistência característica do concreto

Ψ_f	Fator de redução, normalmente igual a 0,95
k_a	Fator de forma
f_l	Pressão máxima de confinamento
A_e	Área efetiva do concreto confinado
A_c	Área transversal de concreto comprimido
b e h	Dimensões da seção transversal
D	Diâmetro da seção transversal
E_f	Módulo de elasticidade do FRP
n	Número de camadas de CFRP aplicadas
t_f	Espessura nominal da camada de reforço
ε_{fe}	Deformação efetiva de ruptura do FRP
κ_ε	Fator de tensão efetiva
ε_{fu}	Deformação de ruptura última
r_c	Raio dos cantos do pilar
ρ_g	Taxa de armadura longitudinal
A_g	Área bruta da seção de concreto
f_l'	Tensão lateral de confinamento
f_f	Resistência à tração do material confinante
ξ_{fe}	Tensão de deformação da fibra de carbono
P_u	Carga de ruptura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 CONCRETO.....	18
2.2 CONCRETO ARMADO.....	19
2.2.1 Pilares.....	20
2.2.2 Flambagem.....	20
2.2.3 Cisalhamento.....	22
2.2.4 Flexo-Compressão.....	23
2.3 REFORÇO ESTRUTURAL.....	24
2.3.1 Reforço com Concreto Armado.....	25
2.3.2 Reforço com Chapas Metálicas.....	26
2.3.3 Reforço com Materiais Compósitos.....	29
2.3.4 Reforço com Fibras Poliméricas.....	31
2.3.4.1 ACI 440.2R-17.....	35
3. METODOLOGIA	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5. CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

É notório que, nos últimos anos, o potencial tecnológico expande-se em ritmo acelerado e essa evolução é perceptível, não somente na indústria da computação, mas, também, na indústria da construção civil, pois observam-se grandes desenvolvimentos, graças à tecnologia, que outrora não poderiam ser concebidos, tais como, por exemplo, a criação de programas computacionais que auxiliam na elaboração e concepção de projetos de engenharia, métodos conceptivos mais modernos que utilizam tecnologia de impressão 3D para a confecção de casas e pontes, aumento de possibilidades e variedades de materiais que podem ser utilizados na construção civil, dentre outros. Em virtude disso, engenheiros e arquitetos podem conceber estruturas mais arrojadas, maiores e mais leves, com tempo de projeto e execução cada vez menor.

Todavia, mesmo com tantas inovações, o homem continua passível de erros e as construções sujeitas a patologias, sendo estas comumente oriundas de erros construtivos, como forças além das previstas inicialmente, idade avançada e mau uso das construções, uso de materiais de baixa qualidade, dentre outros. Por consequência, as edificações com problemas patógenos podem apresentar condições insatisfatórias de utilização (ao alcançar o Estado Limite de Serviço - ELS) e de segurança (referente ao Estado Limite Último - ELU) da estrutura.

A técnica de construção em concreto armado, bastante empregada no Brasil, possui grande importância estrutural, e erros podem ser fatais, além de gerar enormes prejuízos às construtoras. Uma das características das estruturas em concreto armado é o fato de apresentarem dificuldades de reajuste da capacidade de carga, uma vez que a estrutura esteja consolidada (ZUCCHI, 2015).

Falhas estruturais podem surgir ao passo que as patologias ocorrem nas estruturas necessitando, muitas vezes, que seja realizada uma intervenção na edificação para reparos, ou seja, que um reforço estrutural seja aplicado na estrutura a fim de que não ocorra um colapso. Um exemplo de reforço que pode ser aplicado nesses casos é o reforço com fibra de carbono (*CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer*), deveras utilizado para recuperação ou aumento da capacidade de carga de estruturas, como vigas e pilares.

1.1 JUSTIFICATIVA

A construção civil brasileira utiliza o concreto armado desde o início do século XX, a partir de então, inúmeras edificações foram erguidas por meio dessa técnica. Este fato sugere que várias dessas construções são passíveis de apresentar falhas estruturais, principalmente por atingir sua vida útil de projeto, sem que tenham ocorrido manutenções periódicas nas mesmas (HELENE, 2011).

O desabamento parcial do viaduto do Eixão Sul, na parte central de Brasília (Figura 01), em fevereiro de 2018, e o viaduto que cedeu na Marginal Pinheiros (Figura 02), em novembro do mesmo ano, sendo tais obras de 1960 e 1970, respectivamente, são exemplos de estruturas que necessitavam de manutenções preventivas e consequente reforço em sua estrutura, a fim de que não houvesse o colapso das mesmas, como apontam os laudos técnicos iniciais.

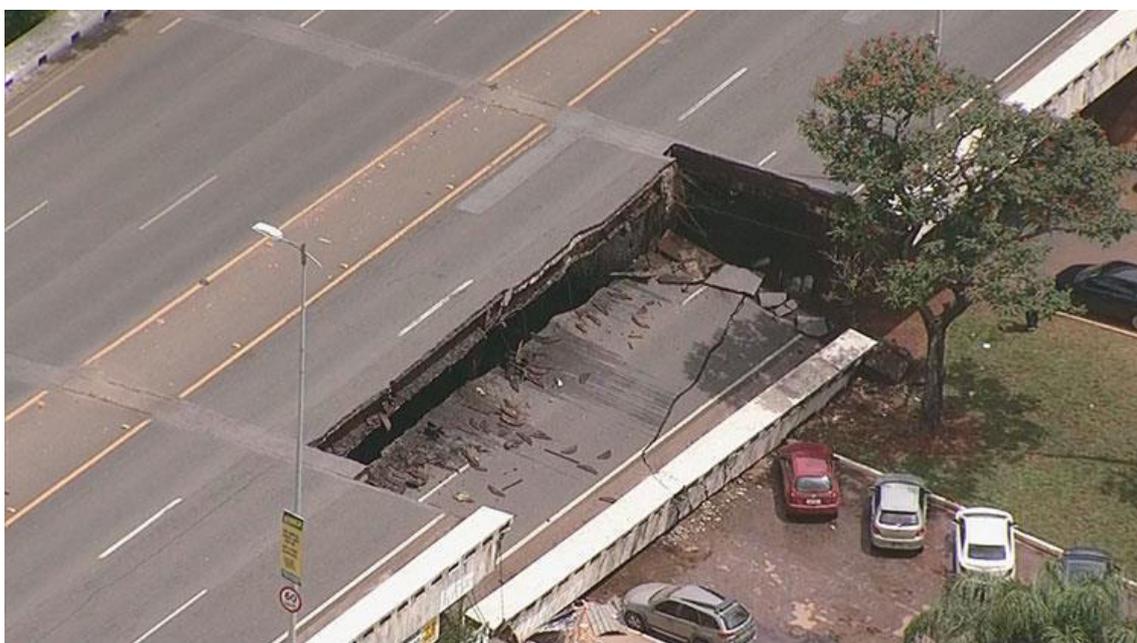


Figura 01: Viaduto sobre o Eixão Sul (BSB) que desabou em 02/2018.
(Fonte: <https://goo.gl/images/GCSA38>. Acesso em 05/12/2018)



Figura 02: Viaduto sobre a Marginal Pinheiros (SP) que cedeu em 11/2018
(Fonte: <https://goo.gl/images/iZ1FzJ>. Acesso em 05/12/2018)

Além disso, existem os casos de estruturas que deverão suportar uma solicitação maior do que aquela para a qual foram projetadas inicialmente como, por exemplo, um prédio comercial que será transformado em uma academia de ginástica. Em outras situações, um projeto de reforço é necessário para estruturas que, a priori, foram projetadas erroneamente ou construídas em divergência com o projeto.

Em Portugal, em 2011, um dos pilares da ponte IP3 (Figura 03), que liga as cidades de Mortágua e Santa Comba Dão, entrou em processo de ruína devido ao excesso de carga a que lhe foi submetido.

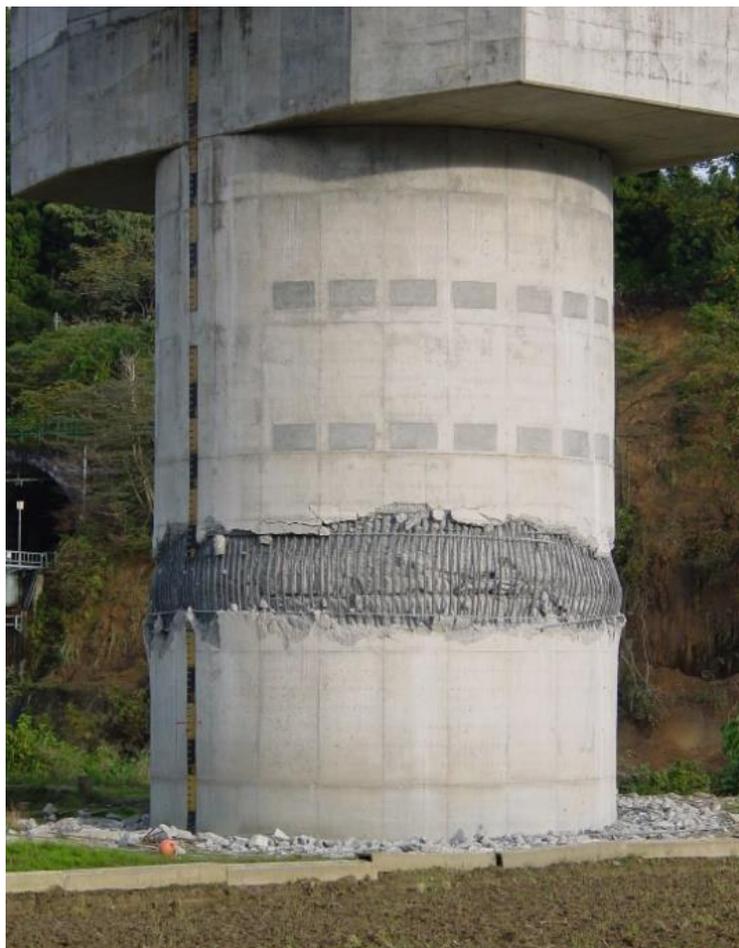


Figura 03: Degradação do pilar da ponte IP3, Portugal.
(Fonte: <https://www.engenhariaportugal.com/degradacao-de-pilares-ponte-de-chamadouro-no-ip3>.
Acesso em 16/12/2018)

Contudo, este tema ainda é pouco abordado no âmbito da graduação e, como visto, é um mercado em ascensão, necessitando de maiores trabalhos e de engenheiros especialistas na área. Diante deste cenário, justifica-se a importância do estudo de reforço de estruturas.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise normativa referente ao reforço estrutural de pilares de concreto encamisados com fibra de carbono, verificando o ganho de resistência à compressão e ductibilidade dos corpos de prova submetidos à compressão axial.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma abordagem geral sobre o tema de reforço em estruturas de concreto armado, em especial, com o uso de materiais compósitos reforçados com fibras de carbono;
- Medir a eficiência do reforço por encamisamento com fibra de carbono de pilaretes submetidos à compressão axial, quando contrastados a um corpo de prova padrão;
- Realizar uma avaliação junto da norma americana ACI 440.2R - 17, no tocante a reforço estrutural de pilares com CFRP.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo do tema de reforço de estruturas, em especial de concreto armado, remete a noções de conceitos, propriedades e comportamento dos materiais que o compõem. A análise da patologia e a escolha da medida de intervenção baseiam-se nestes conhecimentos.

2.1 CONCRETO

Segundo Couto et al (2013):

O concreto é o principal componente utilizado para as construções, sendo um elemento heterogêneo composto por cimento, água e agregados como pedra, areia etc., podendo ser acrescentado outros aditivos. Quando misturados, esses elementos recebem o nome de dosagem e formam uma liga que poderá ser moldada, assumindo em diferentes formas e possuindo diversas aplicações.

Em 2006, estima-se que o consumo médio de concreto girava em torno de 11 bilhões de toneladas/ano (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Este número aumentou para 19 bilhões de toneladas/ano, em 2014 (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Isso se deu devido a diversos fatores como, o crescimento urbano acelerado, o baixo custo e a disponibilidade dos materiais que compõem o concreto e graças, também, a sua resistência à água que, diferentemente do aço e da madeira, acarreta em uma menor deterioração quando exposto (PEDROSO, 2009).

A principal característica do concreto é sua resistência à compressão e é definida como a máxima tensão que uma amostra de concreto pode suportar (NEVILLE e BROOKS, 2010, p. 49, traduzido). Essa resistência do concreto é obtida vias de ensaios em laboratório em que corpos de prova padrão são submetidos a cargas de pequena duração.

É por meio do ensaio de compressão axial, normalizado pela NBR 5739 (ABNT, 2007), que se é possível mensurar o valor da resistência à compressão do concreto. O ensaio é caracterizado por um esforço axial que tende a provocar um encurtamento ou até mesmo o rompimento do corpo de prova submetido a este esforço (BOLZAN, 2015).

2.2 CONCRETO ARMADO

Neville e Brooks (2010, p. 6, tradução nossa) definem concreto armado como o concreto que contém barras de aço e é projetado na hipótese que os dois materiais agem juntos para resistir às forças de tração. Segundo Bastos (2010):

O Concreto Armado alia as qualidades do concreto (baixo custo, durabilidade, boa resistência à compressão, ao fogo e à água) com as do aço (ductilidade e excelente resistência à tração e à compressão), o que permite construir elementos com as mais variadas formas e volumes, com relativa rapidez e facilidade, para os mais variados tipos de obra.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece os requisitos básicos para o projeto de estruturas em concreto armado, definindo-o como elementos que apresentam um comportamento estrutural dependente da aderência entre concreto e a armadura passiva. A Figura 04 ilustra o trabalho conjunto do aço e do concreto em uma viga (b) submetida a esforços solicitantes quando comparada a uma viga sem armadura (a).

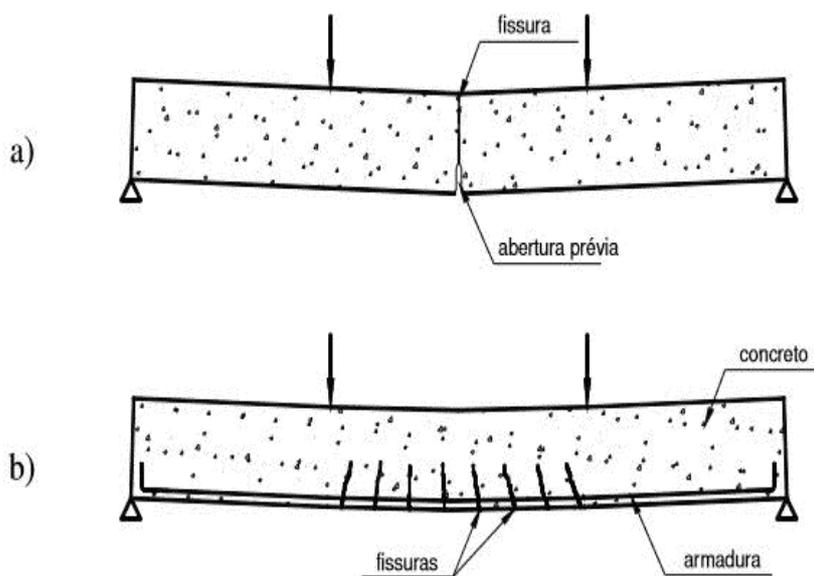


Figura 04: Vigas de concreto simples (a) e de concreto armado (b) submetidas a esforços solicitantes. (Fonte: BASTOS, 2010)

Dentre as estruturas construídas em concreto armado, dar-se-á maior ênfase aos pilares, sendo estes, dimensionados a resistir aos esforços de compressão e à flambagem. No Brasil, a norma que regulamenta o dimensionamento de estruturas de concreto e concreto armado, bem como de pilares, é a NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento (ABNT, 2014).

2.2.1 Pilares

No item 14.4.1.2 da NBR 6118:2014, pilares são definidos como “elementos lineares de eixo reto, usualmente na vertical, em que forças normais de compressão são preponderantes”. Os elementos lineares são aqueles em que o comprimento longitudinal é pelo menos três vezes maior que a dimensão da seção transversal (ABNT, 2014).

Os pilares são responsáveis por receber as cargas provenientes das vigas e lajes e transmiti-las aos elementos de fundação. Para o seu correto dimensionamento, deve-se levar em consideração os esforços externos solicitantes que podem agir sobre estes, que compreendem, principalmente, os esforços normais e os momentos fletores, além das forças cortantes, oriunda das ações horizontais, como o vento.

2.2.2 Flambagem

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), flambagem é definida como a perda de estabilidade por bifurcação do equilíbrio, ou seja, é um estado limite último que ocorre nas peças submetidas a flexo-compressão. Trata-se de um fenômeno grave, pois pode acarretar na ruptura do pilar antes mesmo que a estrutura atinja a ruína por esmagamento do concreto ou por deformação plástica excessiva da armadura (BORGES, 1999). A Figura 05 faz um retrato do fenômeno de flambagem em um pilar.

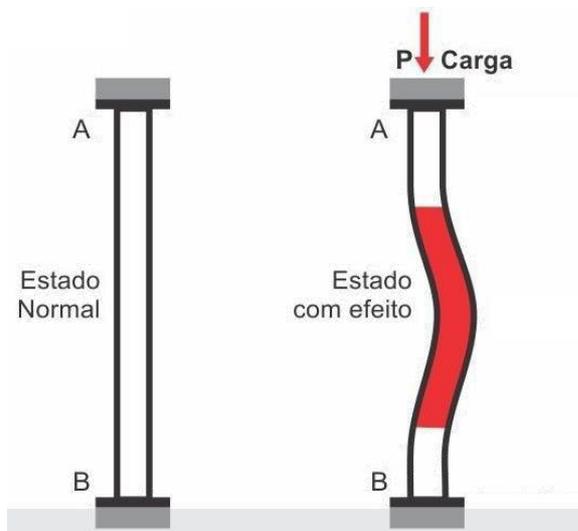


Figura 05: Flambagem de pilar

Fonte: <http://celsoipaula.com/2018/11/pilares-de-concreto-armado/> (Adaptado)
Acesso em: 18/12/2018

A carga crítica de Euler (F_{cr}) é o valor a partir do qual ocorre a flambagem no pilar, e a mesma é dada pela expressão abaixo:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_e^2} \quad (1)$$

Sendo que E é o módulo de elasticidade do material e I o momento de inércia da seção transversal. O comprimento de flambagem (l_e) que depende dos tipos de apoios, está exemplificado na Figura 06.

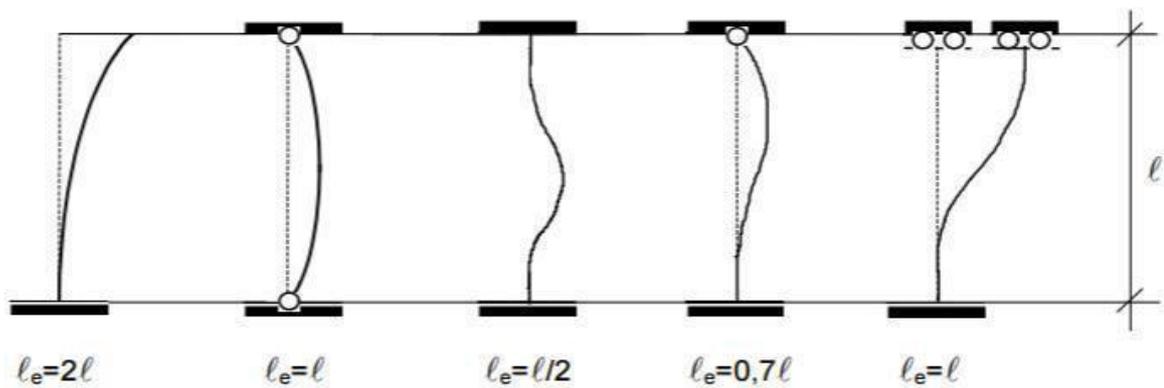


Figura 06: Comprimento de flambagem.
(Fonte: BORGES, 1999)

De acordo com o item 15.8.1 da NBR 6118/2014, os pilares devem ter índice de esbeltez (λ) menor ou igual a 200, este índice é calculado conforme o item 15.8.2 da dita norma por, em que A é a área da seção transversal :

$$\lambda = \frac{l_e}{i} \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Os pilares são classificados, quanto a sua esbeltez, como:

- Pilares curtos ($\lambda \leq 35$);
- Pilares medianamente esbeltos ($35 < \lambda \leq 90$);
- Pilares esbeltos ($\lambda > 90$).

2.2.3 Cisalhamento

O cisalhamento, segundo Hibbeler (2003), ocorre quando forças externas tendem a provocar um deslizamento entre duas partes de um corpo, uma sobre a outra. Nos pilares, e nos elementos submetidos à esforços cortantes, deverá haver uma armadura mínima constituídas por estribos, a fim de suportar os esforços cisalhantes, conforme rege a NBR 6118 (ABNT, 2014) no seu item 17.4.1.1.1 e calculada pela fórmula 2:

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s \cdot \sin \alpha} \geq 0,2 \cdot \frac{f_{ct,m}}{f_{ywk}}$$

(2)

em que:

ρ_{sw} : É a armadura mínima;

A_{sw} : a área da seção transversal dos estribos;

b_w : a largura média da alma;

s : o espaçamento entre os estribos;

α : inclinação dos estribos, em relação ao eixo longitudinal;

$f_{ct,m}$: é a resistência à tração média do concreto;

f_{ywk} : é a resistência característica ao escoamento do aço.

A Figura 07 mostra um pilar que falhou devido ao excesso de esforço cortante.



Figura 07: Falha de um pilar devido ao esforço cortante.
Fonte: <https://goo.gl/images/7Lfpggu>. Acesso em 12/12/2018

2.2.4 Flexo-Compressão

Quando a flexão estiver acompanhada de um esforço normal dar-se-á o nome de flexo-compressão. Se a flexão ocorrer no plano transversal do elemento estrutural, a solicitação é denominada flexo-compressão normal, caso contrário, flexo-compressão oblíqua. Em ambos os casos, o procedimento de cálculo para a obtenção das armaduras, necessárias para resistir a esses esforços, é dado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), cuja área de aço é expressa por:

$$A_s = \frac{\omega \cdot A_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \quad (3)$$

sendo:

ω : Taxa mecânica mínima de armadura longitudinal de flexão;

A_c : Área de concreto referente à seção transversal da peça;

f_{cd} : Resistência de cálculo à compressão do concreto;

f_{yd} : Tensão de escoamento do aço de cálculo.

2.3 REFORÇO ESTRUTURAL

Reis (2001) define reforço estrutural como a promoção de adequações da capacidade resistente (de carga) na superestrutura (lajes, vigas e pilares) e, segundo Ferrari et al (2002):

A execução de um reforço estrutural consiste no aumento da capacidade resistente do elemento a ser reforçado. Esse elemento poderá ser uma viga, uma laje, um pilar, um muro de arrimo, um poço de elevador ou qualquer outro elemento resistente de uma construção que necessite ter sua capacidade de suporte aumentada.

A triagem dos materiais que serão aplicados a uma dada técnica de reforço deve se basear nos conhecimentos de suas propriedades e características, nos aspectos mecânicos, como resistência à compressão e tração, por exemplo, além de levar em consideração sua aplicabilidade e durabilidade (CARNEIRO, 2004). A escolha pelo método de reforço mais adequado, segundo Battisti (2017) é diretamente influenciada pela mão de obra, disponibilidade dos materiais no mercado e pelo conhecimento do projetista estrutural envolvido, principalmente.

Dependendo da escolha do reforço estrutural, este pode ser realizado pela associação de materiais à estrutura original, como concreto, chapas metálicas ou compósitos de fibras e resinas (SIMÕES, 2007). No âmbito do reforço de pilares, este se dá por meio do confinamento ou encamisamento do pilar, mediante a utilização de diversos materiais, outrora mencionados neste trabalho.

2.3.1 Reforço com Concreto Armado

Este tipo de reforço consiste em envolver a seção pré-existente com uma nova capa de concreto e uma nova armadura. Para tal, deve-se, primeiramente, aliviar as cargas a que o elemento estrutural está submetido para que não haja uma pré-tensão das armaduras que serão adicionadas (ZUCCHI, 2015). A Figura 08 exemplifica como é elaborado este tipo de reforço.

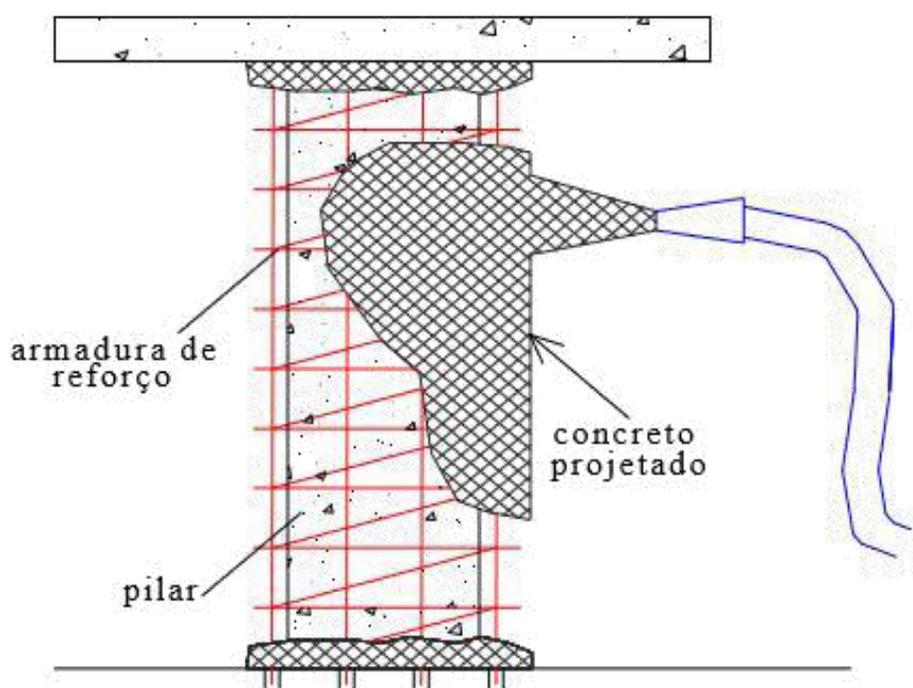


Figura 08: Reforço com concreto armado.
(Fonte: TAKEUTI, 1999)

Sua utilização é bastante empregada no mercado, em vista de seu preço mais acessível quando comparada às demais técnicas de reforço. Em contrapartida, tem como principal desvantagem a interferência no projeto arquitetônico, pois ocorre um aumento na seção no elemento estrutural. Para minimizar este impacto na arquitetura, Battisti (2017) sugere o uso de concreto de alto desempenho, pois resulta em espessuras menores sem alterar, significativamente, as dimensões dos elementos reforçados. Takeuti (1999) apresenta outra desvantagem em relação esta técnica, referindo-se ao elevado tempo de espera que o reforço necessita para atingir resistência suficiente para a liberação de ações no elemento estrutural.

A eficiência deste método, de acordo com Souza (2008), depende principalmente de uma boa aderência entre o novo concreto e o original, a fim de que ocorra a transferência total dos esforços entre eles. Para tal, a limpeza da superfície e das armaduras antes da projeção do concreto é de suma importância. Souza (2008) sugere ainda, a aplicação de uma pintura com resina epóxi na superfície do concreto existente antes da colocação do novo material com o propósito da melhoria desta aderência.

Deve haver um correto dimensionamento dos estribos para que estes suportem os esforços cortantes e tangenciais e não ocorra qualquer deslizamento entre o substrato de origem e material do reforço (REIS, 2001). A armadura de reforço deverá ser ancorada de modo que estas fiquem o mais próximo das barras existentes possível. Posteriormente, fixam-se as fôrmas para concretagem e finalização do reforço.

2.3.2 Reforço com Chapas Metálicas

Quando esgotada as possibilidades do reforço com concreto armado e não houver a possibilidade de interferência arquitetônica nas peças a serem reforçadas, o uso de chapas metálicas é uma solução adequada. Segundo Simões (2007), o baixo peso próprio introduzido na estrutura, a facilidade de execução e limpeza na aplicação, além da possibilidade da rápida reutilização da estrutura, fazem dessa técnica a mais adotada frequentemente.

Ainda segundo Simões (2007), esse método apresenta certas desvantagens como a possibilidade da corrosão do aço, o impedimento em visualizar possíveis fissuras na região sob a chapa, propensão em ocorrer destacamento das chapas nos locais de concentrações de tensões, custo do adesivo elevado, dentre outros. Santos (2008) caracteriza o reforço por adição de chapas metálicas:

[...] pela união da superfície de concreto a chapas de aço através de uma resina com alta capacidade de adesão e resistência mecânica. [...]. No final do processo tem-se um elemento estrutural composto por concreto-resina-aço, o que possibilita à estrutura uma resistência maior ao esforço cortante e ao momento fletor. Como consequência tem-se um elemento mais rígido que deforma pouco antes de iniciar o colapso.

A união entre as chapas metálicas e o concreto se dá por meio do uso de adesivo epóxi e/ou chumbadores do tipo *parabolt* e o processo parte da realização do alívio das cargas na estrutura, a fim de possibilitar que o novo elemento (concreto-resina-aço) trabalhe de forma integrada após o recarregamento (REIS, 2001).

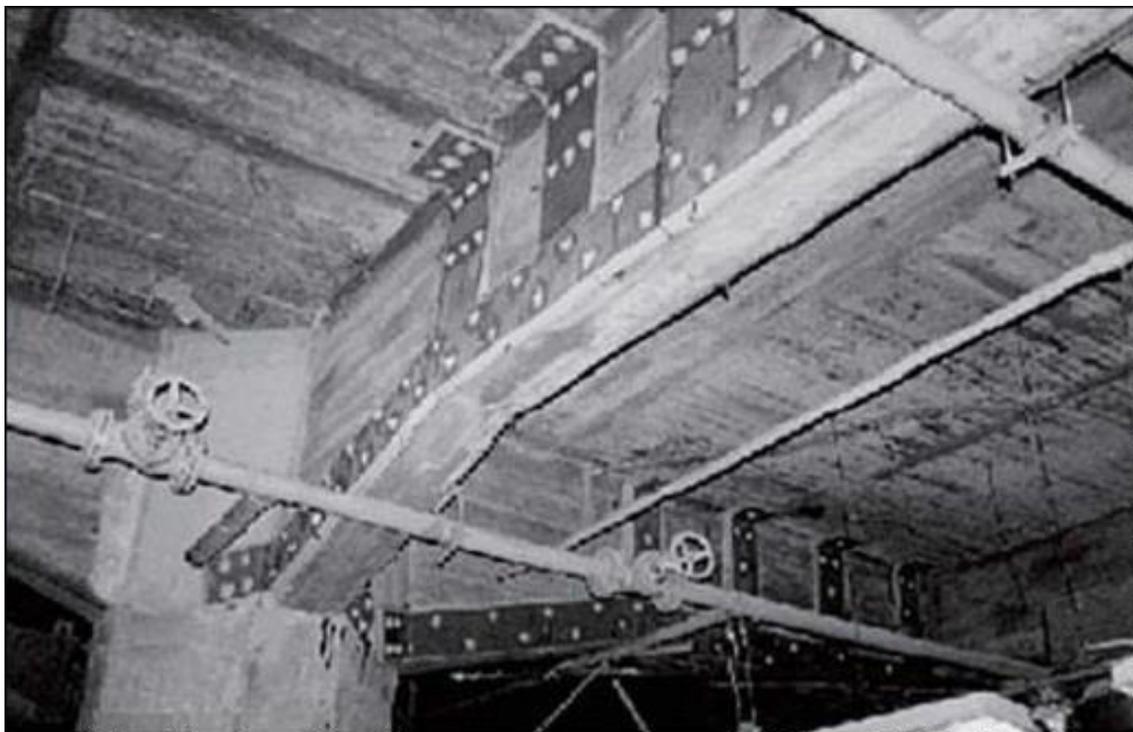


Figura 09: Reforço por adição de chapas.
Fonte: (SOUZA e RIPPER, 1998)

Souza e Ripper (1998) fazem algumas considerações sobre o reforço com chapas coladas como, por exemplo, a espessura máxima da resina de 1,5mm, a espessura das chapas de no máximo 3 mm, a menos do uso de fixadores como parafusos *parabolt*, e o incremento das forças nos reforços não superior a 50%. Já Appleton e Gomes (1997) indicam outras dimensões para o reforço à flexão (Figura 10) e o reforço ao cisalhamento (Figura 11).

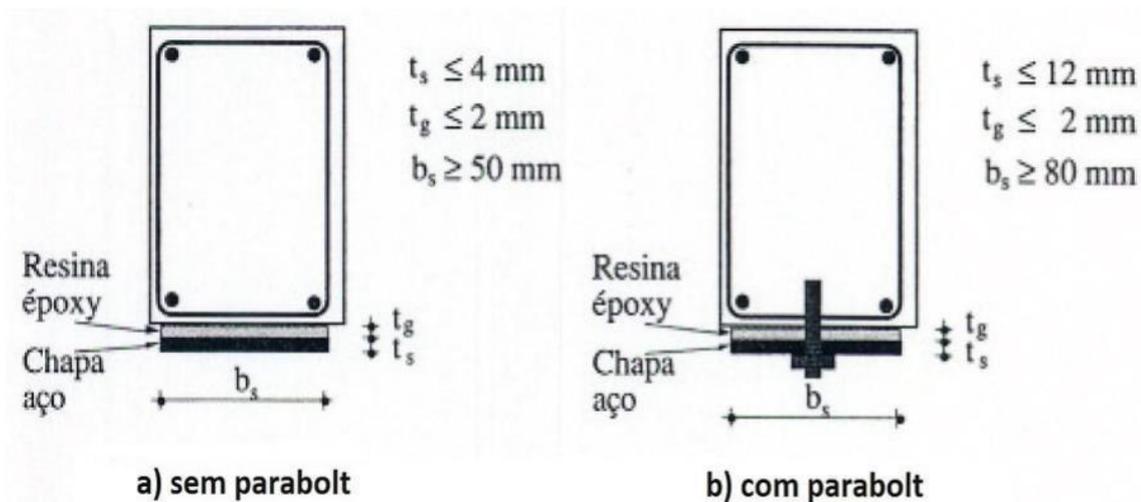


Figura 10: Reforço à flexão por adição de chapas.
Fonte: (APPLETON e GOMES, 1997)

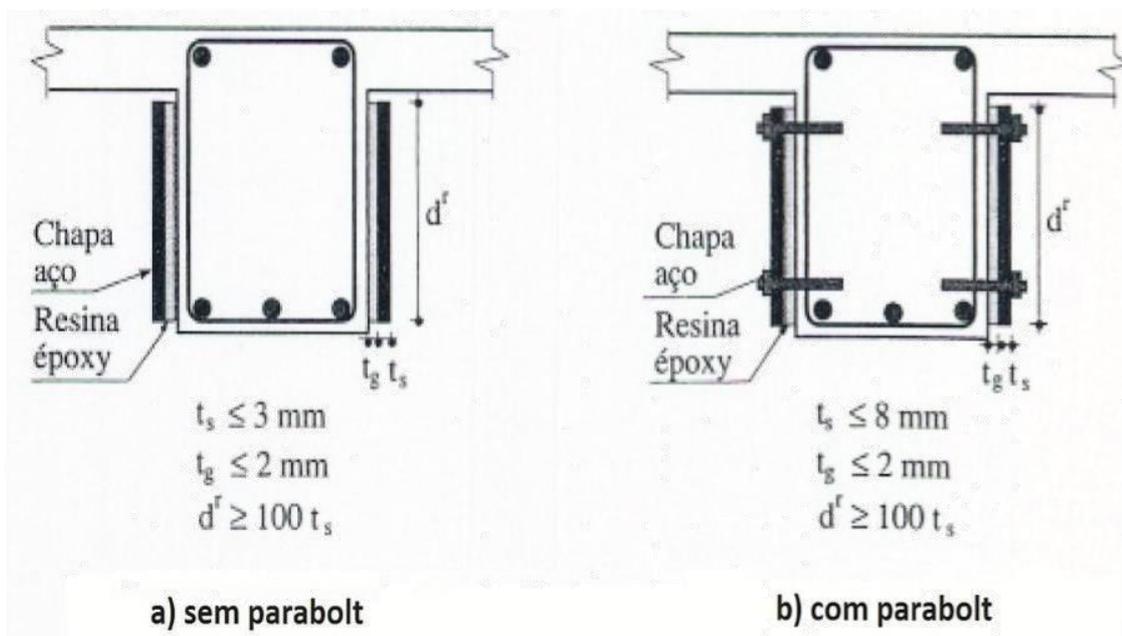


Figura 11: Reforço ao cisalhamento por adição de chapas.
Fonte: (APPLETON e GOMES, 1997)

Quando necessário, pode-se fazer uso de cantoneiras como reforço metálico para pilares de concreto. Sua fixação se dá através do uso de adesivo epóxi entre o substrato e o aço, complementada com solda entre as armaduras finais e iniciais, mas se esta não for possível, adota-se o uso de parafusos *parabolt* (APPLETON e GOMES, 1997).

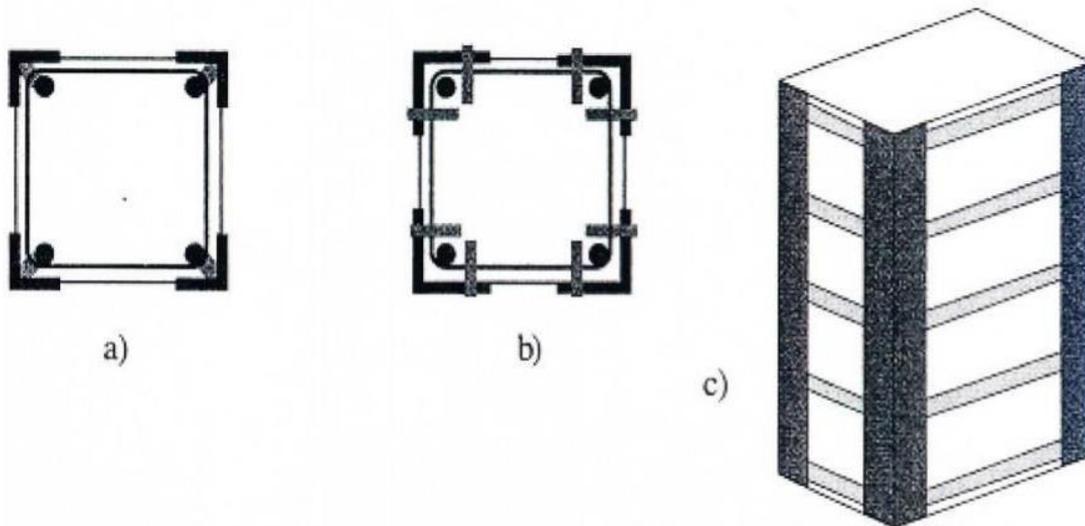


Figura 12: Reforço de Pilares – exemplo de fixação, a) Cantoneiras chumbadas, b) com *parabolt*, c) Chapas metálicas ligadas por cantoneiras.
 Fonte: (APPLETON e GOMES, 1997)

2.3.3 Reforço com Materiais Compósitos

O uso de materiais compósitos, para o reforço de elementos estruturais, iniciou quando Rubinski e Rubinski (1954, *apud* SOUZA e RIPPER, 1998) utilizaram compósitos reforçados com fibras em peças de concreto por substituição ao aço. Todavia, apenas em meados dos anos 80, no Japão, é que esta tecnologia passou a ser usada com mais ímpeto, devido aos intensos abalos sísmicos que o país sofreu naquela década (TAKEUTI, 1999). De acordo com Reis (2001), materiais compósitos são:

[...] aqueles formados por dois ou mais materiais com características mecânicas distintas dos componentes individuais. São constituídos pelas fibras e pela matriz, na qual as fibras estão inseridas. A função principal das fibras é servir de reforço mecânico para a matriz. As matrizes usuais são os poliésteres (usados para as fibras de vidro), vinilester, epóxi (usado para fibras de carbono). A matriz não contribui de forma significativa na capacidade das barras, sendo normalmente desprezada no cálculo da resistência, mas mantém a estabilidade das fibras tensionadas. Além disto, a matriz tem funções indispensáveis tais como a proteção contra a abrasão e ataques químicos.

A elevada resistência, a boa durabilidade, o peso próprio reduzido, a boa resistência à corrosão, a ataques químicos e a cargas dinâmicas, fácil manuseio e instalação fazem dos materiais compósitos de resinas e fibras uma promissora opção para o reforço de elementos estruturais (CARNEIRO, 2004). A principal vantagem

desse método é que, por ser de rápida execução, não necessita de interrupção, completa, do uso da edificação e nem de escoramento da mesma.

A Figura 13 mostra um gráfico em que as características mecânicas e físicas de um material compósito genérico são comparadas com as do aço e do alumínio. Nesta figura, tornam-se evidentes as vantagens dos materiais compósitos face aos materiais convencionais utilizados para reforço de estruturas.

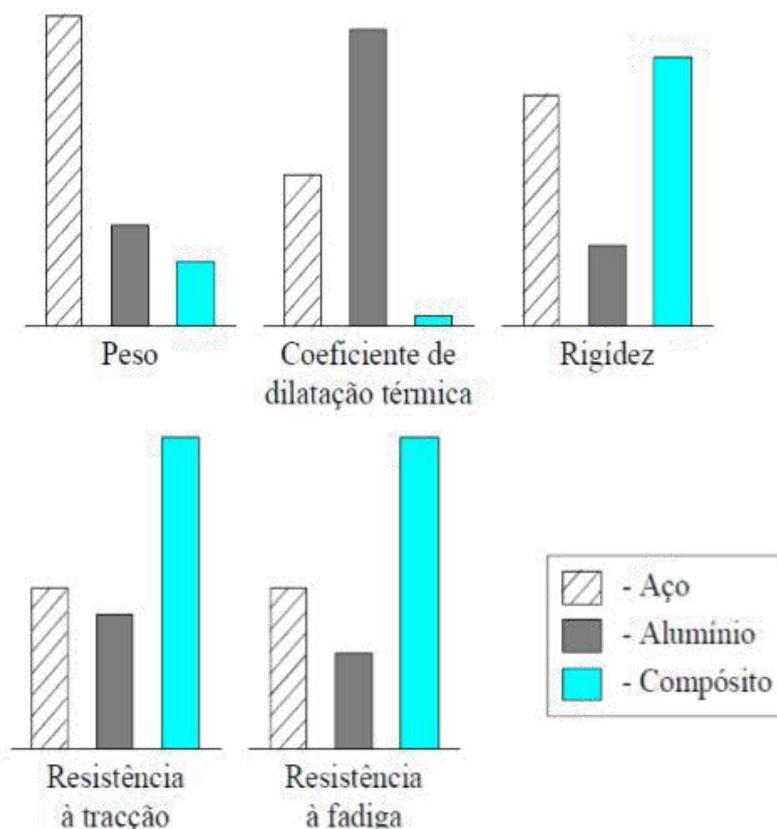


Figura 13: Comparação de certas propriedades entre aço, alumínio e material compósito. (Adaptado) Fonte: (JUVANDES, 2002 apud ZUCCHI, 2015)

Algumas desvantagens em relação ao uso de materiais compósitos são apresentadas por Romero (2007), como a dificuldade de visualização de possíveis fissuras, custo elevado do material, coeficiente de dilatação diferente do concreto e a possibilidade de destacamento prematuro nas bordas devido às tensões.

No que tange ao reforço de pilares com o uso de materiais compósitos, em especial os que usam fibras em sua composição, o aumento da resistência à compressão, da capacidade de deformação e da resistência ao cisalhamento do pilar, deve-se ao confinamento gerado por esses materiais, pois proporcionam um aumento da resistência do concreto à compressão e à ductibilidade (FIGUEIRA, 2016).

Ainda segundo Figueira (2016), a eficiência do reforço com fibras poliméricas é tanto maior quanto mais a seção do pilar tender a uma seção circular, conforme representado pela Figura 14, em razão da distribuição da pressão de confinamento é uniforme para tais seções, diferentemente do que acontece nos pilares de seção retangular, onde, devido ao efeito de arqueamento de tensões, essa distribuição é não uniforme. Esse efeito causa uma concentração nos cantos da seção e pode levar à ruptura do sistema de forma prematura.

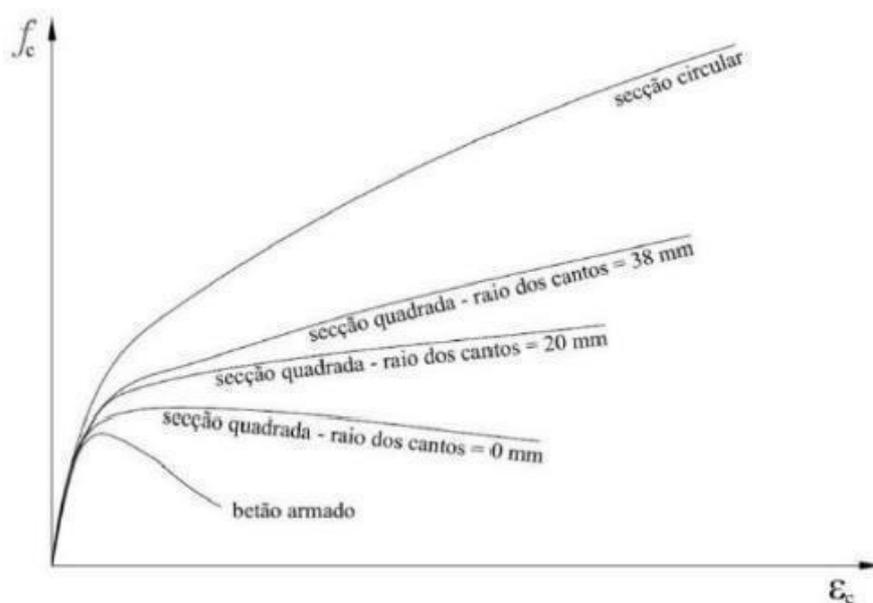


Figura 14: Influência da seção no desempenho dos pilares confinados com FRP. (Fonte: RODRIGUES, 2005 apud FIGUEIRA, 2016)

2.3.4 Reforço com Fibras Poliméricas

Com o advento de novas tecnologias, tornou-se possível substituir as clássicas chapas de aço e as camisas de concreto, para reforço de estruturas, por materiais de alta qualidade. Com isso, passou-se a utilizar mantas, tecidos ou laminados de fibras unidirecionais e contínuas em matrizes de resina epóxi, gerando os polímeros reforçados com fibras. Segundo Beber (2003), os compósitos de CFRP destacam-se como os mais apropriados para o reforço estrutural de elementos de concreto armado por causa do alto desempenho mecânico das fibras de carbono.

As fibras de carbono são confeccionadas a partir do processo de oxidação de fibras orgânicas, como a poliácridonitril, visto que este é formado, basicamente, de carbono. Posteriormente, em ambiente inerte, eleva-se a temperatura do material a

cerca de 1500 °C, tornando-o um polímero muito fino. O produto final apresenta elevadíssima resistência mecânica e módulo de elasticidade variando de 100GPa a 300GPa, tudo isso devido ao alinhamento dos átomos de carbono ao longo da fibra precursora que ocorre durante o processo térmico (BORGES, 2016).

Algumas características das fibras de carbono são apresentadas por Beber (2003), a saber:

- As fibras de carbono apresentam as maiores relações entre resistência e rigidez com seu peso próprio;
- As fibras de carbono mantêm a alta resistência e rigidez sob temperaturas elevadas;
- À temperatura ambiente as fibras de carbono não são afetadas pela umidade e ação de vários solventes, ácidos e bases;
- As fibras de carbono apresentam uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos apresentem grande versatilidade para diversas aplicações em engenharia;
- Os processos de fabricação de fibras e compósitos encontram-se altamente desenvolvidos, são relativamente baratos e apresentam uma excelente relação custo-benefício.

A Figura 15 faz um comparativo entre os diagramas de tensão-deformação de diversas fibras utilizadas em reforços.

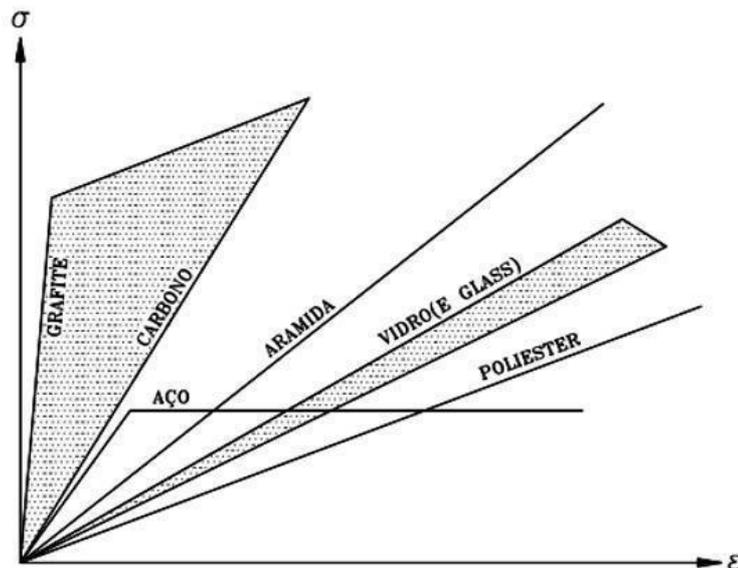


Figura 15: Diagrama comparativo Tensão vs. Deformação.
(Fonte: BORGES, 2016)

Quando comparada com os outros tipos de reforços, verifica-se que a tensão de ruptura do concreto confinado com CRFP é superior às tensões de ruptura do concreto não confinado e do concreto confinado com aço (SARAIVA et al, 2013). A Figura 16 retrata a diferença entre estes materiais.

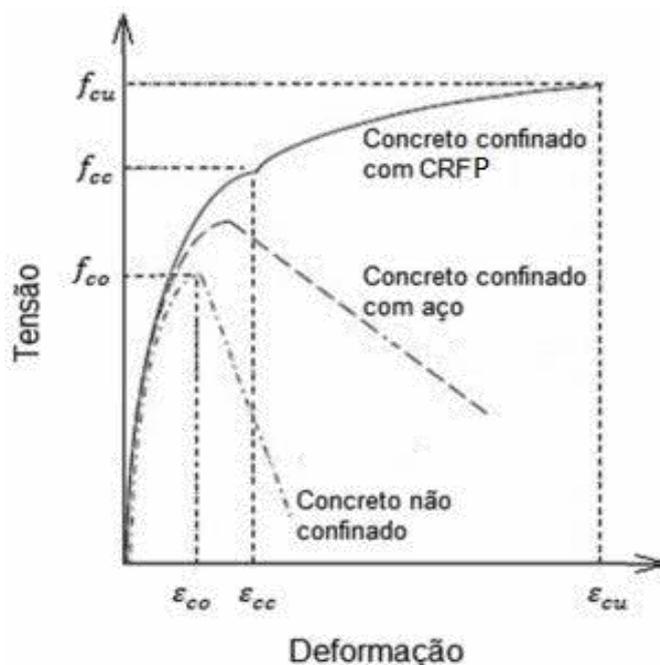


Figura 16: Diagrama tensão – deformação de concreto confinado com CRFP, com aço e não confinado.

(Adaptado). (Fonte: HARAJI, 2006 apud SARAIVA et al, 2013)

Santos (2008) apresenta cinco elementos que compõem o CFRP, a saber:

- 1 - *Primer Epóxico*: sistema epóxico com 100% de sólidos, baixa viscosidade, necessário para uma ancoragem físico/química com os poros da superfície do concreto, estabelecendo uma base estável à aplicação da argamassa e do epóxi estruturante [...];
- 2 - *Massa Epóxica de Correção*: argamassa especialmente formulada para correção de superfícies antes da aplicação do epóxi estruturante [...];
- 3 - *Adesivo Epóxico Estruturante*: sistema epóxi em forma de potente adesivo usado para servir de matriz à fibra de carbono [...];
- 4 - *Fibra de Carbono*: o sistema de reforço com fibra de carbono é composto por dois tipos de fibra de carbono: o MFC 130 e o MFC 530 [...];
- 5 - *Camada de Proteção ou Estética*: terminada a aplicação da fibra de carbono pode ser aplicada uma camada de proteção ou estética disponível em diversas cores e texturas.

Para um bom funcionamento deste tipo de reforço, o substrato deve possuir resistência mecânica suficiente para que a transferência dos esforços da estrutura para o reforço ocorra normalmente. Além disso, este deve possuir tal aderência, na superfície, que iniba a ocorrência de ruptura entre o reforço e o substrato (BORGES, 2016). Portanto, deve-se preparar a superfície para o recebimento do reforço e para tal, medidas como a limpeza e o nivelamento da superfície devem ser adotadas. Em geral, a utilização de abrasivos, jatos de areia ou limalhas metálicas são ferramentas

utilizadas para a limpeza da superfície pois deve abranger desde a remoção de poeira e pó até substâncias oleosas e graxas, partículas sólidas, não totalmente aderidas, e recobrimentos diversos como pinturas e argamassas (SANTOS, 2008).

Após a devida preparação do substrato, aplica-se uma demão de *primer* para selar a superfície do concreto, estabilizando as partículas soltas e impedindo que concreto absorva a água, que pode conter as resinas, pelos seus poros, garantindo assim, condições satisfatórias para a colagem das folhas, tecidos ou lâminas (BORGES, 2016).

Ainda segundo Borges (2016), aplica-se uma argamassa de regularização sobre a superfície do concreto, a fim de eliminar possíveis vazios deixados durante a colagem. Posteriormente, lixa-se a regularização para promover a aderência entre a superfície regularizada e os demais materiais. Em seguida, aplica-se a primeira demão de resina na superfície de concreto e a fibra de carbono é colada, logo após. Por fim, a segunda demão de resina é aplicada por cima das fibras sucedido pela pintura de proteção. A figura 17 resume as partes que compõe um elemento de concreto reforçado com fibras de carbono.

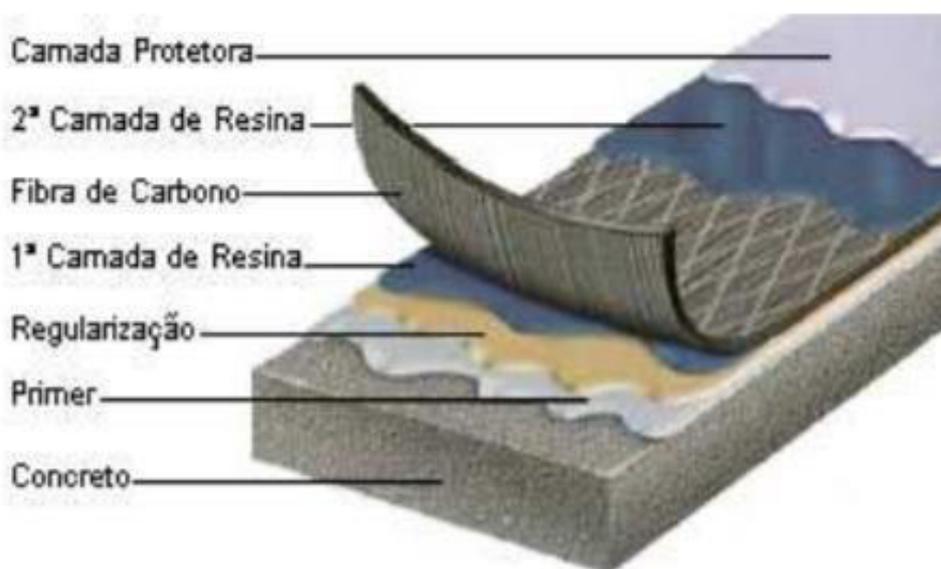


Figura 17: Sistemas compostos com fibras de carbono
(Fonte: RODRIGUES, 2002 apud BORGES, 2016)

Os sistemas CFRP não são eficazes para absorver esforços de compressão axial, predominante em pilares. Seu funcionamento é graças ao impedindo, por meio do confinamento da seção, da deformação transversal do concreto, oriunda da atuação da carga axial. Quando o concreto é comprimido axialmente o efeito de Poisson induz

a ocorrência de deformações radiais que tem como resultante a expansão lateral do concreto (MACHADO, 2011).

Ainda segundo Machado (2011), diversas são as aplicações do sistema de compósito com fibras de carbono na construção civil, como o:

- Reforço de vigas e lajes à flexão e de vigas ao corte;
- Reforço de pilares e colunas, aumentando a resistência à flexão e à compressão por confinamento da seção;
- Reforços de tanques, silos e reservatórios, muros de arrimo, vigas-parede, alvenarias e melhoria da resistência a impactos e explosões;
- Aumento da ductibilidade de pilares e colunas para a prevenção contra sismos.

Entretanto, atualmente, o Brasil não dispõe de uma norma própria que regulamenta o reforço de estruturas de concreto por meio do uso de fibras de carbono, cabendo, aos projetistas, buscar normas estrangeiras para tal. A ACI 440.2R - 17: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures* é a norma norte-americana que regulamenta o uso de reforço com fibras poliméricas em estruturas de concreto, em especial o uso de fibras de carbono, e a abordaremos neste trabalho.

2.3.4.1 ACI 440.2R-17

A norma norte americana ACI 440.2R - 17 fornece orientações para a escolha, projeto e instalação de sistemas de polímeros reforçados com fibras para o reforço de estruturas de concreto e concreto armado. No tocante ao reforço em pilares, a referida norma, no seu item 12.1, aponta que deve ser realizado o cálculo da resistência à compressão do concreto confinado, vide a seguinte expressão:

$$f_{cc}' = f_c' + 3,3 \cdot \Psi_f \cdot k_a \cdot f_l \quad (4)$$

onde:

f_{cc}' : Resistência à compressão do concreto confinado;

f_c' : Resistência característica do concreto;

Ψ_f : Fator de redução, normalmente igual a 0,95.

O fator de forma (k_a) depende da geometria da peça, conforme segue:

a) Circular:

$$k_a = 1,0 \quad (5.1)$$

b) Não circular:

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (5.2)$$

A pressão máxima de confinamento (f_l) é expressa por:

$$f_l = \frac{2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe}}{D} \quad (6)$$

Para seções retangulares:

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} \quad (7)$$

Tal que:

E_f : Módulo de elasticidade do FRP;

n : Número de camadas de CFRP aplicadas;

t_f : Espessura nominal da camada de reforço.

A deformação efetiva de ruptura do CFRP é dada por $\varepsilon_{fe} = \kappa_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fu}$, onde κ_ε é normalmente escolhido igual a $\kappa_\varepsilon = 0,58$.

A definição da área efetiva de concreto confinado consiste em quatro parábolas, dentro das quais o concreto está totalmente confinado e fora ocorre um confinamento desprezível (COMMITTEE, ACI 440.2R, 2017, p. 36, traduzido). Esta área é definida pela fórmula 8:

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\left(\frac{b}{h} \right) \cdot (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) \cdot (b - 2r_c)^2 \right] \cdot \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (8)$$

Sendo que:

r_c : Raio dos cantos do pilar;

ρ_g : Taxa de armadura longitudinal;

A_g : Área bruta da seção de concreto.

A Figura 18 esquematiza a área efetiva de concreto confinado $\left(\frac{A_e}{A_c} \right)$, segundo a norma americana.

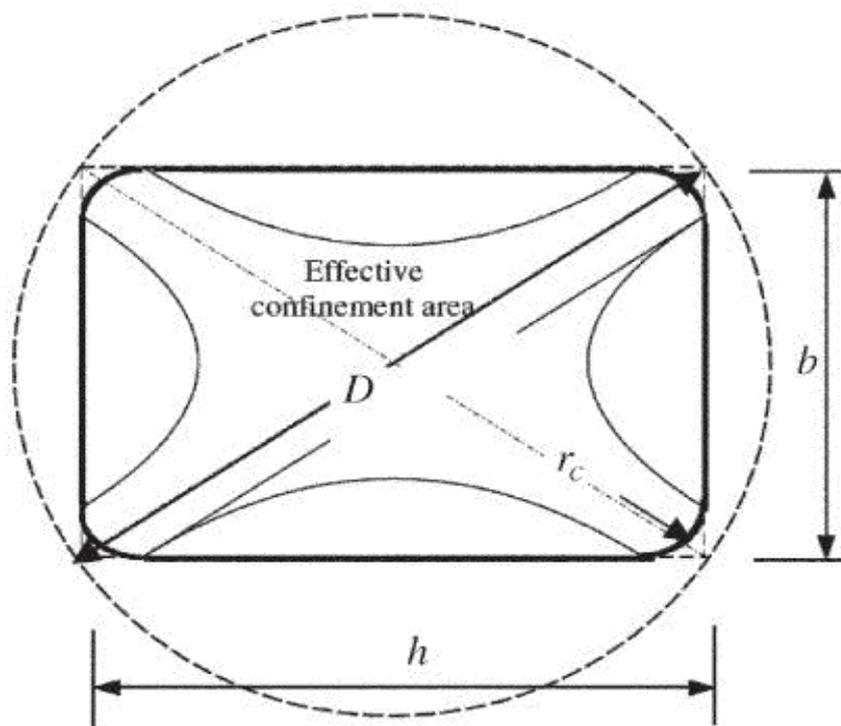


Figura 18: Área efetiva de concreto confinado.
(Fonte: COMMITTEE, ACI 440.2R, 2017)

3. METODOLOGIA

Guimarães et al (2007) apresentam dados sobre o uso do método de reforço com fibras de carbono em pilaretes de concreto, usaremos tais dados como base para a confecção desta monografia. O objetivo principal deste artigo foi a avaliação da influência do grau de confinamento dos pilares reforçados com fibras de carbono MFC-130. Os autores reforçaram 5 (cinco) pilaretes de seção transversal quadrada e 02 (dois) de seção transversal circular e os submetteram a ensaios de compressão axial. Nos pilaretes de seção quadrada (85 x 85 mm), um foi escolhido como o de referência, ou seja, sem reforço, e os demais foram reforçados com faixas de tecido de fibras de carbono, dispostas de diferentes formas. No primeiro, usou-se apenas uma faixa de tecido nas extremidades do corpo de prova. No segundo, uma faixa de reforço nas extremidades e uma no centro do vão. No terceiro, quatro faixas de reforços, sendo todas equidistantes entre si, sendo que duas estão nas extremidades. No quarto pilar, este foi completamente envolvido pelo reforço. Já para os pilares de seção circular (com 100 mm de diâmetro), um deles foi o de referência e o outro completamente envolvido pelo reforço. As faixas de reforço possuíam 71 mm de largura. Na Figura 19, faz-se um resumo do esquema de reforço, seção transversal e traspasse; este último foi definido como metade do perímetro.

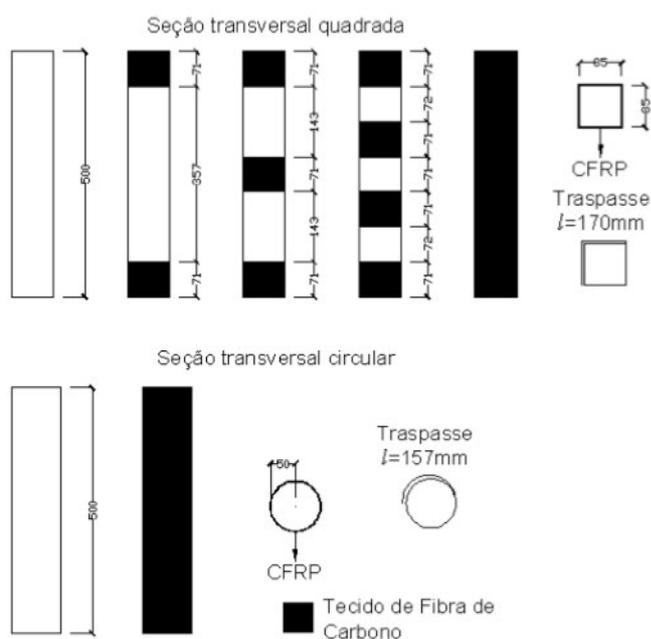


Figura 19: Seção transversal, traspasse e vista lateral dos pilaretes.
(Fonte: GUIMARÃES et al, 2007)

Como supracitado, utilizou-se o sistema de reforço por fibra de carbono MC-130, distribuído no Brasil pela empresa ROGERTEC, cujos componentes principais são: o primer epóxico, o adesivo epóxico estruturante e a manta de fibra de carbono. As tabelas 01 e 02 apresentam as principais propriedades desses componentes.

Tabela 01 – Propriedades do primer e do epóxi estruturante

Propriedades	Primer	Epóxi estruturante
Resistência à tração	320 MPa	57 MPa
Deformação na tração	1 a 3 %	2,4 ‰
Módulo à tração	687 MPa	2.998 MPa
Resistência à flexão	26 MPa	131 MPa
Módulo à flexão	57 MPa	3.684 MPa
Resistência à compressão	20 MPa	81 MPa
Módulo à compressão	619 MPa	2.560 MPa

(Fonte: GUIMARÃES et al, 2007)

Tabela 02 – Propriedades da fibra de carbono

Propriedades	Fibra
Densidade da fibra	1,82 g/cm ³
Resistência à tração	3.550 MPa
Módulo à tração	2,35E6 kg/cm ²
Espessura	0,165 mm
Relação densidade/peso/área	300 g/m ²
Alongamento último	1,5 ‰
Largura	500 mm

(Fonte: GUIMARÃES et al, 2007)

Posteriormente, submeteram-se os pilaretes ao ensaio de compressão axial em uma máquina hidráulica servo-controlada com capacidade de 2.000kN, da marca AMSLER, como mostra a Figura 20.



Figura 20: Pilaretes posicionados para ensaio de compressão axial.
(Fonte: GUIMARÃES et al, 2007)

Guimarães et al (2007) se basearam na norma americana ACI 440.2R de 2001, atualmente fora de vigência, para a confecção de seu trabalho, para tal, utilizaram as seguintes fórmulas para estimarem a resistência do concreto confinado com FRP.

$$f_{cc}' = f_c' \cdot \left(2,25 \cdot \sqrt{1 + 7,9 \cdot \frac{f_l'}{f_c'}} - 2 \cdot \frac{f_l'}{f_c'} - 1,25 \right) \quad (2)$$

A tensão lateral de confinamento é dada por: $f_l' = k_a \cdot f_l$. Guimarães et al (2007), apresenta as seguintes fórmulas para o cálculo da pressão máxima de confinamento:

$$f_l = \frac{t_f \cdot f_f \cdot (b + h)}{b \cdot h}$$

O coeficiente k_a , dependente da geometria da seção transversal, de forma similar à ACI 440.2R-17. Já a ACI 440.2R-01 dispõe das seguintes equações para o cálculo de f_l' :

$$f_l' = \frac{\rho_f \cdot f_f' \cdot k_a}{D}$$

onde:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot (b+h)}{A_g} \quad \text{e} \quad f_f' = \xi_{fe} \cdot E_f$$

ξ_{fe} é a tensão de deformação da fibra de carbono, limitado em 0,004 conforme recomendações da ACI.

Para a estimativa da resistência à compressão do concreto confinado, conforme a norma americana ACI 440.2R-17, utilizou-se a equação 04, outrora apresentada, munida com os dados das tabelas 02 e 03, esta última apresentada a seguir.

Tabela 03 – Características genéricas das fibras de carbono

Tipo de Fibra de carbono	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência Máxima de Tração (Mpa)	Deformação de Ruptura (%)
De uso Geral	220-235	<3.790	>1,2
Alta resistência	220-235	3.790-4.825	>1,4
Ultra alta resistência	220-235	4.825-6.200	>1,5
Alto módulo	345-515	>3100	>0,5
Ultra alto módulo	515-690	>2410	>0,2

Fonte: MACHADO, 2002

O módulo de resistência utilizado foi 230,5 GPa, obtido multiplicando o módulo a tração da fibra pela gravidade. Para a resistência à tração da fibra igual a 3550 MPa, pela tabela 03 obtém-se a deformação de ruptura igual a 1,2%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o ensaio de compressão axial, no qual os pilaretes foram submetidos, realizado por Guimarães et al (2007), os autores apresentam duas tabelas com os resultados, a tabela 04 para os dados referentes aos pilaretes de seção transversal retangular e a tabela 05 com os pilaretes de seção circular.

Tabela 04 – Cargas de ruptura e rendimento do reforço para seções retangulares

Pilares	Pu (kN)	Rendimento do reforço (%)
PR-Ref	120	0
PR-01	150	25
PR-02	125	4
PR-03	125	4
PR-04	157	31

Fonte: GUIMARÃES et al, 2007

Tabela 05 – Cargas de ruptura e rendimento do reforço para seções circular

Pilares	Pu (kN)	Rendimento do reforço (%)
PR-Ref	165	0
PR-01	280	70

Fonte: GUIMARÃES et al, 2007

Guimarães et al (2007) estimaram qual seria a resistência à compressão do concreto confinado, do pilar totalmente encamisado, pelas fórmulas outrora mencionadas. Para tais, os resultados estimados por eles foi de 159 kN para o pilar de seção retangular e de 340 kN para o de seção circular. Ao se estimar tal resistência conforme a ACI 440.2R-01, os resultados foram de 170 kN para o pilar com seção transversal retangular e de 248 kN para seções circulares.

Percebe-se que as fórmulas utilizadas pelos autores são mais conservadoras do que a norma americana de 2001 quando se trata de pilares com a seção transversal retangular. Já para pilares de seção circular, observa-se que a norma americana de 2001 é mais conservadora do que a fórmula de Guimarães et al (2007).

A estimativa de resistência do concreto confinado conforme a ACI 440.2R-17 para pilares de seção retangular, completamente encamisados, foi de 153 kN e para o caso dos pilares com seção circular, encamisados por completo com CFRP foi de 295 kN. A tabela 06 resume tais estimativas.

Tabela 06 – Estimativa da resistência do concreto confinado

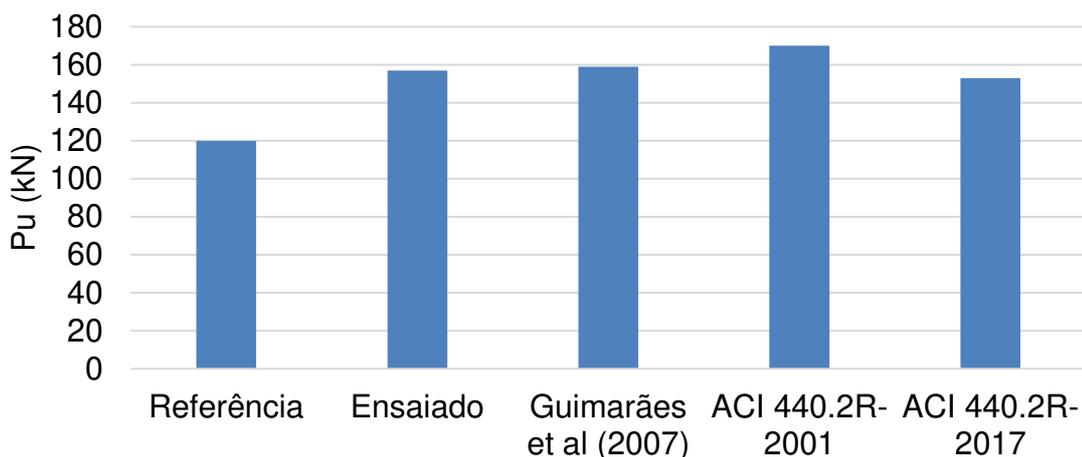
Seção transversal	Guimarães et al (2007)	ACI 440.2R-01	ACI 440.2R-17
Retangular	159 kN	170 kN	153 kN
Circular	340 kN	248 kN	295 kN

Fonte: AUTOR, 2019.

Observa-se que, em comparação com a norma norte americana de 2001 e com os métodos de Guimarães et al (2007), a norma vigente daquele país estima valores mais conservadores para seções retangulares de pilares de concreto encamisado com CFRP. A razão entre a carga estimada, pela norma atual, e a carga ensaiada é de 0,9745, ou seja, a estimativa de carga é 2,55% menor do que a medida no ensaio.

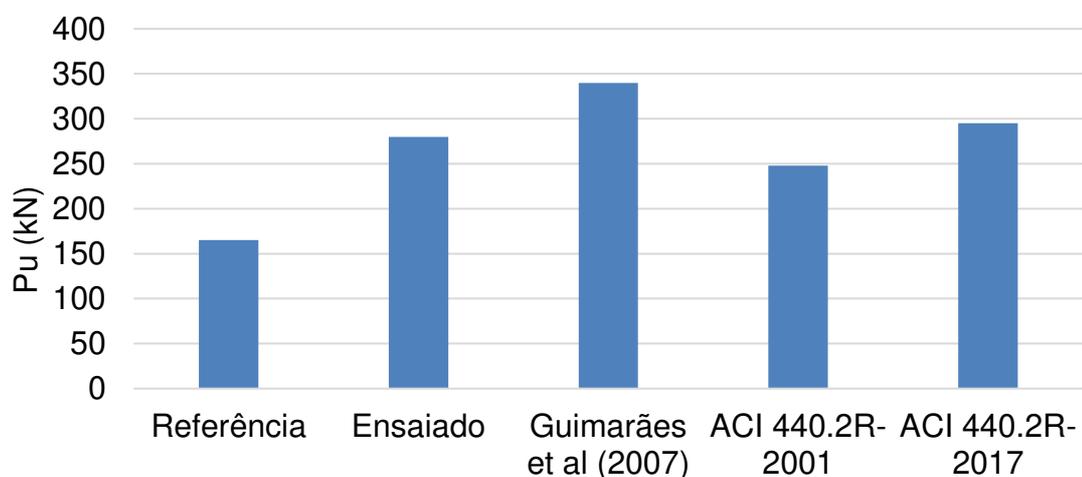
Com relação a seções circulares de pilares reforçados, observa-se que a norma atual se tornou menos conservadora, a ponto de estimar valores maiores que os obtidos em ensaios de laboratórios. No estudo em questão, a estimativa foi de, aproximadamente, 5% maior do que o valor encontrado no ensaio, entretanto o método utilizado por Guimarães et al (2007) superestimou em 21,43% a resistência do pilar circular. Os gráficos 01 e 02, ilustram a diferença entre as estimativas da resistência do concreto confinado, por meio dos métodos mencionados, e o valor da resistência real medido pelo ensaio de compressão axial.

Gráfico 01: Carga de Ruptura (Seção Transversal Retangular)



Fonte: Autor, 2019

Gráfico 02: Carga de Ruptura (Seção Transversal Circular)



Fonte: Autor, 2019

Nos gráficos, a coluna “Referência” representa o pilarete de concreto ensaiado sem o reforço de CFRP, a coluna “Ensaiado”, refere-se ao pilar submetido ao ensaio de compressão axial, totalmente encamisado com o CFRP. As demais colunas referem-se aos valores estimados por cada método.

Por meio dos gráficos, é possível perceber o ganho de resistência à compressão axial gerada pelas fibras de carbono. Tal ganho está representado pelo rendimento das fibras, sendo de 31% e 70% para as seções retangulares e circulares, respectivamente, vide tabelas 04 e 05. Percebe-se, também, que este aumento é maior para seções circulares, corroborando o que diz a literatura.

5. CONCLUSÃO

O avanço crescente da tecnologia, tem possibilitado o desenvolvimento de novos materiais a serem utilizados na construção civil em geral. Um exemplo que podemos citar são as fibras de carbono que, outrora eram utilizadas apenas na indústria aeroespacial, hoje ganham espaço na construção civil, principalmente no âmbito do reforço de elementos estruturais. Isto se dá devido a diversos fatores, como por exemplo: alta resistência, execução fácil, rápida e limpa, durabilidade elevada, dentre outros.

A degradação de inúmeras construções brasileiras, associada ao seu longo tempo de vida, faz com que essas obras requeiram a execução de reforço em suas estruturas, a fim de evitar que ocorra um colapso geral. Com o advento do CFRP, reparos imediatos tornam-se cada vez mais possíveis. Soluções que exigem dias para a sua completa execução, devido ao grau de complexidade, podem ser substituídas pelo uso da fibra de carbono, que, em geral, requerem poucas horas para sua completa execução.

Devido à inexistência de uma norma que regulamente o uso das fibras de carbono no Brasil, deve-se buscar normas estrangeiras, como o caso da norma norte americana ACI 440.2R - 17, para estimar o valor da resistência do concreto confinado pelo CFRP. Neste trabalho, comparou-se essa norma com a sua versão de 2001 e com o trabalho realizado por Guimarães et al (2007).

Constatou-se que, para seções transversais retangulares, a norma vigente estima valores mais conservadores, e em prol da segurança, do que os demais métodos mencionados. Em confrontação com o ensaio realizado por Guimarães et al (2007), a norma estimou uma resistência, para seções retangulares, 2,54% menor do que a medida. No caso de seções circulares, a estimativa da norma foi 5% maior do que o valor medido em ensaio, ou seja, a norma estimou um valor maior do que o constatado no ensaio, indo contra a segurança.

Evidencia-se, a necessidade de trabalhos acadêmicos na área de reforço de estruturas, em especial no âmbito da graduação, a fim de corroborar as informações deste trabalho e da literatura em geral. Para trabalhos futuros, propõe-se uma avaliação normativa da resolução sobre fibras de carbono das normas europeias, bem como uma comparação de confiabilidade, custo e estimativas entre a norma americana e a europeia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ***Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP for System Strengthening Concrete Structures***. ACI Committee 440.2R. Detroit, 2001.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ***Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP for System Strengthening Concrete Structures***. ACI Committee 440.2R. Detroit, 2017.

APPLETON, J.; GOMES, A. **Reforço de Estruturas de Betão Armado por Adição de Armaduras Exteriores**. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE), Série I, nº 41, p. 15-20, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do Concreto Armado**. Disciplina: 2117 – Estruturas de Concreto I. Universidade Estadual Paulista. Campus de Bauru/SP, 2010. Disponível em:
<<http://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2018.

BATTISTI, F. **Recuperação de vigas em concreto armado utilizando polímero reforçado com fibras de carbono**. 2017. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.

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

BOGES, A. C. L. **Análise de pilares esbeltos de concreto armado solicitados a flexo-compressão oblíqua.** 1999. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

BOLZAN, M. V. **Estudo da utilização de resíduos da mineração de calcário na produção de blocos de concreto para construção civil.** 2015. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2015.

BORGES, I O. **Estudo de Reforço de vigas e lajes com Compósitos de Fibra de Carbono colados.** [Distrito Federal] 2016. viii, 36p. 297mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016) Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília.

CARNEIRO, L. A. V. **Reforço de Vigas e Pilares de Concreto com Materiais Compósitos de Resina e Fibras.** [Rio de Janeiro] 2004 XXXII, 405 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2004) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

COUTO, A. S. C.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A. **O concreto como material de construção.** Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas. Sergipe. v. 1, n.17, p. 49-58, out. 2013.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem.** Maringá, v. 24, n. 6, p. 1783-1791, 2002.

FIGUEIRA, S. P. S. **Reforço de pilares por confinamento com mantas de fibras de carbono – Avaliação de modelos de comportamento.** 2016. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Universidade da Madeira, Funchal - Portugal, 2016.

GUIMARÃES, A. M. P.; AGUIAR, A. J. O.; OLIVEIRA, D. R. C. **Análise experimental de Pilares Reforçados com CFRP.** Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon. 2007.

HELENE, P.; MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. cap. 22. Concreto: Ciência e Tecnologia, Ibracon, 2011.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2003. 420 p.

MACHADO, A. de P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibra de carbono**. 120 p. 2011 Disponível em: <<http://viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acesso em 13 de dezembro de 2018.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. **Concrete Microstructure, Properties, and Materials**. *Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley*. 3. ed. USA: McGraw-Hill, 2006.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. **Concreto – microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2. ed. 442 p. England: British Library Cataloguing, 2010.

PEDROSO, F. L. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Concreto e Construções, 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revistaconcreto_53.pdf>. Acesso em: 04 de dezembro de 2018.

REIS, L. S. N. **Sobre a Recuperação e Reforço das Estruturas de Concreto Armado**. 2001. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

ROMERO, D. V. S. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado por meio de protensão externa**. 106 p. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, P. M. **Comparação de reforço com chapas de aço e fibras de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples**. 2008. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

SARAIVA, R. M. C. D.; TEIXEIRA, A. M. A. B.; CARNEIRO, L. A. V. **Estudos sobre reforço de pilares de concreto armado com materiais compósitos de resina e fibras**. IME, Rio de Janeiro. 2013. Disponível em: <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_4_tri_2013/RMCT_072_E2A_11.pdf>. Acesso em: 20 de dezembro de 2018.

SIMÕES, M. L. F. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado por encamisamento parcial**. [Rio de Janeiro] 2007 XX, 162p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2007) Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

SOUSA, A. F. V. S. **Reparação, Reabilitação e Reforço de Estruturas de Betão Armado**. Universidade do Porto. Portugal, 2008. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58292/1/000129827.pdf>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2018.

SOUZA, V.C. M.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TAKEUTI, A. R. **Reforço de Pilares de Concreto Armado por meio de Encamisamento com Concreto de Alto Desempenho**. 1999. 205f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

ZUCCHI, F. L. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais**. 2015. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2015.