

ESTUDO DE MÉTODOS DE REFORÇO DE PILARES: ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO E CONFINAMENTO COM MANTAS DE FIBRAS DE CARBONO

Vinicius Vieira da Silva¹; André Felipe Aparecido de Mello²

Acadêmico do Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)¹; Professor do Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)²;
viniciusvieira26@hotmail.com¹; andremello@ufgd.edu.br²

RESUMO – Na construção civil, existe a necessidade de reforços ou reparos nas obras por diversos motivos desde falhas na execução do projeto, manutenção ou de mudança de utilização. Porém, a principal dificuldade encontrada pelo profissional é a escolha adequada do método de reforço em razão de cada uma ter as suas especificidades. Nesse sentido, justifica-se a importância dessa pesquisa ao realizar um estudo de reforço de pilares por encamisamento com concreto (PREC) e confinados por mantas flexíveis de fibras de carbono (PRFC). Essa pesquisa consiste em uma análise bibliográfica descritiva dos métodos abordados, apresentando os resultados para o dimensionamento de um pilar de seção quadrada reforçado por ambos os métodos. Conclui-se que o (PREC) apesar de ser um método tradicional e apresentar alguns modelos de cálculo na literatura apresenta a dificuldade de estabelecer um parâmetro devido as variáveis de projeto, tendo um desenvolvimento inferior quando comparado ao (PRFC).

Palavras-chave: concreto armado, reforço estrutural, PRFC.

ABSTRACT – In civil construction, there are various reasons for the necessity of reinforcements or repairs at construction sites, from faults in the execution of the project, maintenance or change of use. However, the main difficulty found by a the professional is the adequate choice of the reinforcement method, as each method has its own specificities. In this sense, the importance of this research is justified when carrying out a study about the reinforcement of reinforced concrete columns (RCC) and columns confined by carbon fiber reinforced polymers (CFRP). This research will consist of a descriptive bibliographic analysis of the methods, presenting the results for the design of a reinforced of a square section concrete column using both methods. Despite being a traditional method and having some calculation models presented in the literature, it has been concluded that RCC presents a difficulty in establishing a parameter due to the design variables having inferior development when compared to CFRP.

Keywords: reinforced concrete, structural reinforcement, PRFC.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história da construção civil foram desenvolvidas diversas técnicas construtivas, aperfeiçoamento e criação de novos materiais e softwares com o objetivo de alcançar cada vez estruturas mais esbeltas. No entanto, uma das principais dificuldades encontradas durante esse processo de desenvolvimento da construção civil são os problemas patológicos decorrentes na maioria das vezes da escolha de material inadequado, erros de dimensionamento ou a falta de manutenção da obra.

Conforme Adorno et al. (2015) pode ser necessário um projeto de reforço estrutural em construções que possam ter sido projetadas erroneamente ou construídas em desacordo com o projeto, necessitando uma reanálise dos reforços da estrutura para fins de utilização. Dessa forma, é fundamental que o profissional faça um estudo patológico estrutural, e escolha o método mais adequado para a reabilitação da obra.

Dentre os principais métodos de reforço estrutural empregados estão a adição de armadura com aumento da seção transversal de concreto, adição de perfis metálicos, e por confinamento com mantas de fibra de carbono, esta última menos difundida no Brasil, em razão de ser um método novo quando comparado com os demais.

Dessa forma, ressalta-se a importância da escolha das técnicas de reforço estrutural a ser utilizadas na obra, pois esse é um dos principais critérios para que possam diminuir a possibilidade de ocorrência de falhas.

Nesse sentido, justifica-se essa pesquisa em razão da carência de estudos de métodos de reforços estruturais de pilares, sendo importante apresentar um estudo da aplicabilidade de reforço de pilares por encamisamento com concreto (PREC) e confinados com mantas de fibras de carbono (PRFC).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Apresentar um estudo de caso hipotético de reforço estrutural em pilares curtos de seção quadrada submetidos a esforços de compressão axial centrada por encamisamento com concreto armado (PREC) e por confinamento com mantas de fibra de carbono (PRFC).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mostrar a aplicabilidade de dois modelos de cálculo aplicados ao dimensionamento do reforço estrutural de um pilar submetido a esforços de compressão axial centrada.
- Avaliar o reforço por encamisamento com concreto armado.

- Avaliar a influência do número de camadas de reforço com mantas de fibra de carbono.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONCEITO DE PILAR

A NBR 6118 (2014), define os pilares como “elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes.”

Os pilares têm a função de transportar as cargas verticais dos pavimentos até as fundações, e de fornecer estabilidade a edificação quando solicitados por esforços horizontais decorrentes por exemplo da ação de ventos e/ou terremotos. De modo que os pilares são projetados para conceder estabilidade às estruturas isoladas ou em conjunto com as vigas (BITTENCOURT E FRANÇA, 2001).

Conforme Ferreira et al. (2006), os pilares em concreto armado são constituídos de três elementos: concreto simples, armaduras longitudinais e estribos. De modo que o uso das armaduras longitudinais na construção dos pilares tem como objetivo melhorar a capacidade de resistência do pilar e dos estribos. Já as armaduras transversais, têm como finalidade sustentar a armadura longitudinal no local definitivamente estabelecido no projeto estrutural.

Em razão do concreto simples ter uma baixa capacidade à tração, foi necessário a incorporação do aço para melhorar a capacidade de resistência, pois somente com a aderência desses dois materiais foi possível com que o pilar resiste aos esforços que posteriormente possa ocorrer (SOUZA JÚNIOR, 2016).

Na análise da estabilidade de um pilar no estado limite último (ELU), quando submetidos ao esforço de compressão axial centrada, ou seja, não apresentam excentricidades iniciais o pilar é denominado de pilar interno, admitindo-se que as lajes e vigas apoiadas sobre ele possuem continuidade nas duas direções.

Os efeitos de 1ª ordem são os deslocamentos e esforços internos obtidos com a análise do equilíbrio da estrutura com a configuração geométrica inicial. A NBR 6118 (2014), estabelece que as imperfeições na construção podem ser consideradas por um momento mínimo de 1ª ordem. Os efeitos de segunda ordem são decorrentes de dois tipos de não linearidades: física e geométrica.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS PILARES

Os pilares de concreto armado podem ser classificados:

- **Referente à Esbeltez**

Conforme a NBR 6118 (2014), o índice de esbeltez (λ) é razão entre o comprimento

de flambagem e o raio de giração, nas direções a serem consideradas, sendo:

$$\lambda = \frac{l_e}{i} \quad (1)$$

Onde:

l_e = comprimento de flambagem;

i = raio de giração da seção geométrica;

Os pilares podem ser classificados de acordo com o índice de esbeltez em:

$\lambda \leq 35$ – Pilares Curtos.

$35 < \lambda \leq 90$ – Pilares Medianamente Elbeltos.

$90 < \lambda \leq 140$ – Pilares Elbeltos.

$140 < \lambda \leq 200$ – Pilares Muito Elbeltos.

Para pilares curtos cujo índice de esbeltez seja menor que a esbeltez limite ($\lambda \leq 35$), a norma permite desconsiderar os efeitos de 2ª Ordem.

- **Referente à Posição no Pavimento**

Conforme Scadelai e Pinheiro (2005), os pilares podem ser classificados em três tipos devido as solicitações (figura 1):

- I. Pilar de canto: são submetidos a flexão oblíqua e as excentricidades iniciais ocorrem nas direções das bordas.
- II. Pilar interno: podem admitir compressão simples, ou seja, em que as excentricidades iniciais podem ser desprezadas.
- III. Pilar de borda: as solicitações iniciais correspondem a flexão composta normal, ou seja, admite-se excentricidade inicial em uma direção. Para seção quadrada ou

retangular, a excentricidade inicial é perpendicular à borda.

Figura 1. Classificação dos pilares referente a posição no pavimento.



Fonte: (Scadelai e Pinheiro, 2005).

3.3. REFORÇO ESTRUTURAL

Atualmente na construção civil existe uma preocupação para que as edificações tenham uma maior durabilidade, em razão do alto custo para elaboração de um projeto de reforço estrutural quando existem falhas. Porém pode ser necessário reparos, em casos de ampliação, mudança de uso do local ou quando é impossível a demolição da edificação. Esse cenário, tem incentivado cada vez mais estudos voltados para a criação e o aperfeiçoamento de técnicas de reforço e de novos materiais com a finalidade de diminuir os custos e aumentar o desempenho do reparo das edificações (ZUCCHI, 2015).

Dentro desse contexto de reforço estrutural, conforme Piancastelli (1997) os pilares precisam ser reforçados por vários motivos entre eles estão “os erros de cálculo, erros de detalhamento, deficiência dos materiais, mau adensamento do concreto, corrosão das armaduras, impactos acidentais,

erros de locação”. Dessa forma, mostra-se a importância de fazer uma escolha adequada dos materiais a serem empregados na obra e um dimensionamento correto das estruturas.

Para Couto et al. (2016), devido à importância do desempenho do reforço de um pilar recuperado, é fundamental ter um comportamento adequado aos elementos estruturais, respeitando os limites de deformação da estrutura e os critérios colocados nos códigos e normas de projeto na qual está submetido.

3.4. RESISTÊNCIA RESIDUAL EM ELEMENTOS COMPRIMIDOS

O principal elemento em estruturas submetido a força de compressão é o pilar. Segundo Souza e Ripper (1998) as pesquisas para avaliação da capacidade resistente em estruturas danificadas não possuem um desenvolvimento avançado, no entanto existe algumas análises não descartadas que apresentam resultado para capacidade última P_u , para esforços axiais atuantes, sendo:

$$P_u = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot A_c + f'_{s2d} \cdot A'_s \quad (2)$$

Onde:

f_{cd} = resistência de cálculo do concreto;

A_c = área total do concreto;

f'_{s2d} = tensão de cálculo no aço para um encurtamento de 0,2%;

A'_s = área total de aço.

Assumindo as seguintes hipóteses:

- I. a resistência total do pilar é igual à soma das resistências do concreto e do aço que o constituem;
- II. toda a seção de concreto contribui uniformemente para a formação da capacidade última da coluna;
- III. o cobrimento de concreto e os estribos são suficientes para evitar a flambagem das barras da armadura longitudinal;
- IV. não há deformação lenta.

Ainda de acordo com Souza e Ripper (1998), ensaios efetuados por Richart (1934), por Hognestad (1951) e por McLeish (1978), demonstram que quando as fissuras do cobrimento atingirem 0,2 mm deve-se desprezar a contribuição do mesmo assumido que o concreto e o aço atinjam suas capacidades máximas com a mesma deformação, outro fator importante a ser analisado é referente ao carregamento de longa duração, fazendo com que a capacidade última da coluna seja composta pelas contribuições individuais dos materiais:

Segundo Piancastelli (1997), o mercado atual possui diversas técnicas de reforço algumas consagradas e outras em desenvolvimento na atualidade. As principais técnicas de reforço podem ser definidas como:

- ✓ Reforço com concreto armado;
- ✓ Reforço com perfis metálicos;
- ✓ Reforço com chapas de aço coladas;

- ✓ Reforço com lâminas ou folhas de carbono coladas;
- ✓ Reforço por protensão.

Para este trabalho serão analisados os reforços por encamisamento com concreto armado e por confinamento com mantas de fibra de carbono, apresentado a seguir.

3.5. REFORÇO POR ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO (PREC)

A técnica de reforço por encamisamento em concreto armado (figura 2) é uma das mais simples e de baixo custo, pois utiliza somente dois materiais: aço e o concreto. Por esse motivo, é um dos reforços estruturais mais utilizados no Brasil (PÁDUA et al., 2012).

Figura 2. Reforço de pilar por encamisamento com concreto armado.



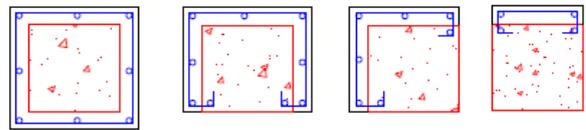
Fonte: (Construção civil teoria e prática, 2017).

Entretanto, uma das desvantagens da aplicabilidade do encamisamento é a modificação no modelo arquitetônico, aumentando o tamanho dos elementos

estruturais que serão reforçados, tendo uma maior demora para a liberação do uso da estrutura quando comparado com outras técnicas de reforços estruturais (ZUCCHI, 2015).

De acordo com Takeuti (1999), o reforço de pilares pode ser feito com utilização de concreto com resistência adequada e utilização de armaduras longitudinais e transversais complementares, aumentando as dimensões laterais do pilar, considerando a posição do pilar, condições de acesso e carga suportada o reforço pode ser feito apenas em algumas faces conforme segue abaixo (figura 3).

Figura 3. Configurações de reforço.



Fonte: (Takeuti, 1999).

Segundo Takeuti (2003), este tipo de reforço é muito empregado devido a economia e rapidez na execução, mas possui desvantagens tais como produzir elementos finais com dimensões maiores que as originais e o tempo de espera necessário para liberação das ações na peça reforçada. Ainda de acordo com Canovas (1988) apud Takeuti (2003), na maioria dos casos de reforço com concreto armado desconsidera-se a resistência original do pilar, devido aos métodos e análises ainda serem sujeitos a incertezas.

Para Souza e Ripper (1998), desprezar a capacidade resistente já existente é um desperdício que pode ser evitado, consistindo o projeto de reforço em calcular um novo pilar cinto, capaz de absorver a carga introduzida no elemento somada ao carregamento existente, considerando as armaduras longitudinais contribuindo para a resistência total do pilar.

3.5.1. CAPACIDADE RESISTENTE DE PILARES REFORÇADOS COM (PREC)

Conforme Takeuti (1999), a problemática envolvendo a determinação da capacidade resistente de pilares reforçados, está na consideração da distribuição dos esforços para os pilares, visto que são elementos estruturais que absorvem ações advindas de diversos pavimentos sendo na maioria das vezes não ser possível aliviar o pilar dessas ações.

Souza e Ripper (1998) apresentam as seguintes considerações sobre carregamentos de pilares:

- I. Pilares como o de pontes e estruturas onde o tráfego pode ser interditado, considera se o pilar parcialmente descarregado;
- II. Em edifícios residenciais, comerciais e industriais que tem sua estrutura dimensionada para cargas acidentais em geral superior as que são solicitadas, pode-se estimar uma

“sobra” de resistência do pilar, com isso considerando uma carga de solicitação reduzida;

- III. Sendo um pilar com a capacidade resistente ajustada a solicitação, reforçado por encamisamento e com perfeita aderência entre os concretos velho e novo, observando as condições para que com o tempo se torne uma seção homogênea, na teoria após a execução do reforço, supondo a mês na estrutura a seção adicional do reforço não entraria em serviço.

Ainda de acordo com Souza e Ripper (1998), supondo um pilar com determinada carga original e reforçado absorvendo uma capacidade de carga maior que a inicial e que ao ser carregado parte do esforço será absorvido pelo pilar original e a outra pelo reforço. Caso a carga adicional seja retirada resultaria em duas possibilidades:

- I. A seção do reforço fica descarregada e a carga será resistida pelo pilar original;
- II. Quando solicitado pelo acréscimo de carga haverá um rearranjo interno das tensões na seção do pilar, de modo que mesmo após a retirada o reforço continua contribuindo ficando a peça homogênea.

De acordo com Takeuti (1999), a capacidade resistente em pilares reforçados ainda possui varias duvidas, sendo a principal

o pilar estar descarregado ou não, provocando mudanças quando ao comportamento da peça. Este trabalho buscou considerar o dimensionamento do reforço levando em conta um acréscimo de carga preestabelecido e que se possa fazer o descarregamento da estrutura por meio de escoramentos, apresentando o modelo de cálculo utilizado no item a seguir.

3.6. REFORÇO DE PILARES COM MANTAS DE FIBRA DE CARBONO (PRFC)

O reforço por confinamento com mantas de fibras de carbono é recente e pouco utilizado no Brasil em relação ao perfil metálico e ao concreto armado. As fibras de carbono são provenientes do processo de carbonização que ocorre nas fibras de polímeros orgânicos, de modo que suas propriedades mecânicas são determinadas pela estrutura molecular estabelecida, podendo em alguns casos a fibra ter a sua capacidade de resistência maior até mesmo que o aço (BRONZE, 2016).

Conforme Carneiro (2004) o uso de resina e fibras como reforço estrutural (figura 4), pode ser realizado de: “modo contínuo (confinamento total) ou parcial (confinamento parcial), e as fibras podem ser dispostas perpendicularmente ou de forma inclinada (helicoidal) em relação ao eixo longitudinal do pilar”.

Figura 4. Reforço de pilar por confinamento de fibras de carbono.



Fonte: (Empresa Reforço Engenharia e Recuperação, 2015).

Ainda de acordo com Carneiro (2004), as fibras e os compósitos de resinas utilizados nos reforços de pilares possuem as vantagens de resistência à tração, corrosão, baixo peso quando comparado ao aço, boa capacidade de deformação, e disponibilidade em várias formas, tipos e dimensões, tais vantagens garantem agilidade durante o reforço estrutural da obra do que os demais métodos.

No entanto, conforme o autor, as principais desvantagens estão no comportamento linear-elástico até o momento de ruptura podendo causar ductilidade estrutural, maior custo de aplicabilidade do que o aço e possuir coeficiente de dilatação térmica menor do que o concreto, pois não podem ser submetidos a altas temperaturas devido as resinas empregadas na sua colagem ao elemento estrutural começarem a perder a sua capacidade de resistência sendo essa uma das suas principais desvantagens.

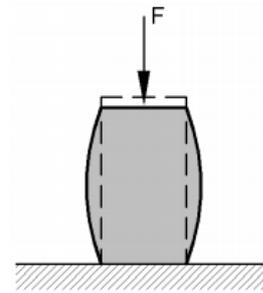
As resinas têm a função de garantir a aderência entre o concreto e o material utilizado no reforço. Podem ser divididas em duas classes conforme sua propriedade: termoplásticas e termorrígidas, como por exemplo da primeira classificação temos o polietileno, poliestireno e da segunda o epóxi, fenol, poliéster, poliuretano. No entanto, atualmente as resinas mais utilizadas são à base de epóxi e tem a finalidade de envolver as fibras, com o propósito de que haja a transferência de tensões entre elas de modo mais eficaz (SARAIVA, et al. 2013).

Conforme Rigazzo (2003), os polímeros associados com as fibras possuem a propriedade de aumentar a resistência ao corte e à flexão de lajes e vigas, além ser empregado em pilares, especialmente os de pontes e viadutos, com a finalidade de melhoria da sua performance estrutural.

3.6.1. CONFINAMENTO DE PILARES COM (PRFC)

Aplicando uma força uniaxial sobre uma peça de concreto, se obtém uma deformação longitudinal na direção da carga e, simultaneamente, uma deformação transversal com sinal contrário. A relação entre a deformação transversal e a longitudinal (figura 5) é denominada coeficiente de Poisson.

Figura 5. Deformações transversais e longitudinais.



Fonte: (Figueira, 2016).

De acordo com Figueira (2016), este tipo de reforço consiste em aumentar consideravelmente o desempenho estrutural a compressão, a flexão e ao esforço transversal, aumentando a resistência do concreto a compressão e a ductilidade, resultando num aumento da capacidade de carga e absorção dos elementos reforçados.

4. METODOLOGIA

4.1. MODELO DE DIMENSIONAMENTO PARA REFORÇO POR ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO (PREC)

Considerando a resistência residual do pilar original, calculada pela equação (2), associada à normal N_d de cálculo, determina-se um coeficiente γ^* com objetivo de manter as mesmas características iniciais de projeto constantes, considerando os momentos e excentricidades iniciais:

$$\gamma^* = \frac{P_u}{N_d} \quad (3)$$

Onde:

P_u = Resistência residual pilar original;
 N_d = Normal de projeto pilar original.

Utilizando-se da força de equilíbrio para forças verticais, pode-se determinar a capacidade resistente do pilar reforçado, tendo como hipótese a solidariedade entre concreto e armadura, através da seguinte equação:

$$P_n = A_{ccad} \cdot f_{co,ref} + A_c \cdot f_{co,orig} + A_s \cdot f_y \quad (4)$$

Onde:

- P_n = capacidade resistente pilar reforçado;
- A_{ccad} = Área de concreto da camisa de reforço;
- $f_{co,ref}$ = Máxima tensão de resistência do concreto do reforço;
- A_c = Área de concreto do pilar original;
- $f_{co,orig}$ = Máxima tensão de resistência do concreto original;
- A_s = Área das armaduras longitudinais do pilar original e camisa de reforço;
- f_y = Resistência do aço em condição de compressão centrada com encurtamento de 0,2%.

Tendo os dados do pilar original e as características do material utilizado no reforço, define-se o aumento da seção de concreto de modo a atender um cobrimento mínimo estabelecido por norma e acrescentar um núcleo do reforço definindo a área do concreto do reforço. Readequando a equação (4), torna-se possível obter a armadura necessária na seção do reforço do projeto pela seguinte equação:

$$A_{s,ref} = \frac{P_n - A_{c,ref} \cdot f_{co,ref} - A_c \cdot f_{co,orig} - A_{s,orig} \cdot f_y}{f_y} \quad (5)$$

4.2. MODELO DE DIMENSIONAMENTO PARA CONCRETO CONFINADO POR (PRFC)

O procedimento adotado é sugerido pela norma técnica norte-americana ACI 440.2R (2008), que utiliza como base o modelo de Mander, Priestley e Park (1988), para o cálculo de pilares confinados com sistemas PRFC.

Nesse modelo, o valor de (f'_{cc}), resistência à compressão majorada pelo confinamento do concreto, é fornecido pela seguinte expressão:

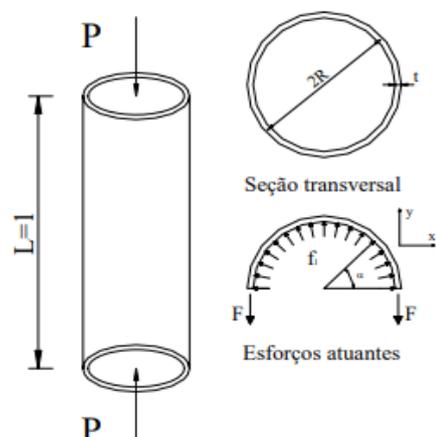
$$f'_{cc} = f'_c \left[2,25 \sqrt{1 + \frac{7,9 \cdot f_l}{f'_c}} - \frac{2 \cdot f_l}{f'_c} - 1,25 \right] \quad (6)$$

Onde:

- f'_{cc} = resistência de cálculo do concreto confinado;
- f'_c = resistência à compressão do concreto;
- f_l = pressão lateral de confinamento devida ao sistema PRFC.

A pressão lateral é obtida de acordo com Carrazedo e Hanai (2006), supondo um pilar circular envolvido por um tubo de parede fina (figura 6) e submetido a um esforço de compressão axial. Desenvolvendo-se no interior do tudo uma pressão lateral (f_l).

Figura 6. Pilar circular envolvido por parede fina.



Fonte: (Figueira, 2016).

Considerando-se o equilíbrio dos esforços da seção transversal atuantes, consegue-se obter a formula para cálculo da pressão lateral de confinamento. Segundo o ACI 440.2R (2008), tem -se para seções não circulares:

$$f_l = \frac{2 \cdot \rho_f \cdot k_a}{2} \quad (7)$$

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot (b+h)}{(b \cdot h)} \quad (8)$$

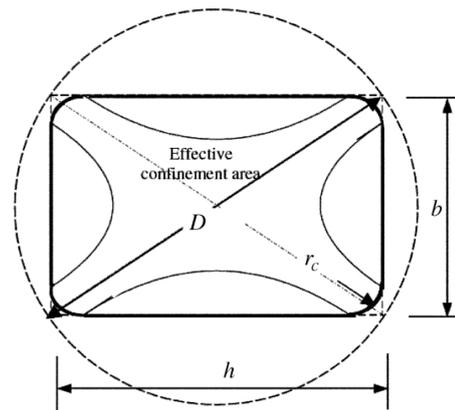
$$k_a = 1 - \frac{(b-2 \cdot r)^2 + (h-2 \cdot r)^2}{3 \cdot b \cdot h \cdot (1 - \rho_g)} \quad (9)$$

Onde:

n = número de camadas de fibra de carbono;
 t_f = espessura nominal fibra de carbono;
 b e h = dimensões do pilar;
 ρ_g = taxa de armadura de aço do pilar;
 r = raio de curvatura entre os lados adjacentes (b) e (h), adotado 1,5.

Em pilares não-circular a tensão de confinamento lateral não atinge toda a área da seção (figura 7). De acordo com Machado e Machado (2015), a área da seção transversal efetivamente confinada do concreto, admitisse que internamente a seção transversal não circular esta delimitada por quatro parábolas estando a parte interna totalmente confinada e fora desta área o confinamento sendo desprezível (figura 7). Definindo um valor que relaciona a área efetiva de atuação com a área total da seção, resultando esse valor como um coeficiente denominado k_a , que para pilares circulares é 1.

Figura 7. Seção circular transversal equivalente.



Fonte: (ACI 440.2R-2008).

O nível de tensão efetiva na fibra de carbono é dado por:

$$\varepsilon_{fe} = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fu} \quad (10)$$

Onde:

k_ε = fator responsável pela falha prematura do sistema composto pela manta de fibra de carbono, adotado 0,55 valor obtido por estudos experimentais;
 ε_{fu} = Deformação máxima fibra de carbono;

Conforme o ACI 440.2R (2008) define a verificação de um raio mínimo de confinamento do pilar definido por:

$$\frac{f_l}{f'_c} > 0,08 \quad (11)$$

A deformação máxima no concreto confinado pode ser obtida por:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon'_c \left(1,50 + 12 \cdot k_b \cdot \frac{f_l}{f'_c} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0,45} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon_{cc} < 0,01 \quad (13)$$

Onde:

k_b = fator eficiência da seção;
 ε'_c = Deformação original do pilar.

Limitado a esse valor para evitar fissuração excessiva e perda resultante da integridade do concreto.

A carga de compressão admissível em um pilar forçada com manta de CFC deve ser calculada através das seguintes expressões, derivadas da ACI 318.R (2014), que para estruturas convencionais definido por:

$$P_n = 0.80 \cdot \phi [0.85 \cdot \psi \cdot f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}] \quad (14)$$

Onde:

A_g = área da seção transversal da coluna;

A_{st} = área da seção transversal da armadura longitudinal da coluna;

ϕ = coeficiente de redução recomendado pelo ACI 318.R (2014), igual a 0,75 nos casos de compressão axial;

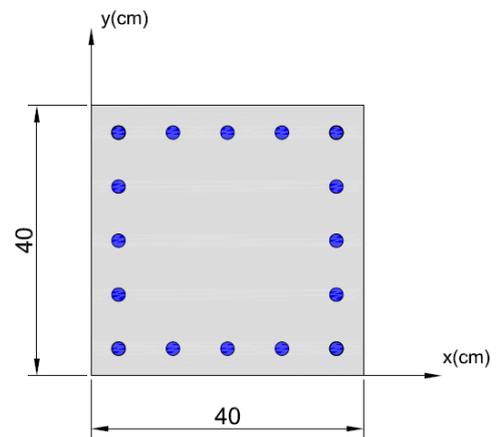
ψ = coeficiente adicional de redução da resistência que leva em consideração a forma da coluna, normalmente considerado nos reforços com sistemas CFC com valor (0,95).

Considerando os métodos de reforço de pilar de concreto apresentados nesse estudo, apresenta-se o dimensionamento para atender as verificações de segurança de um pilar submetido a uma carga de compressão axial centrada sujeito a acréscimo de esforços.

Apresenta-se a seguir um pilar hipotético, com seção transversal de 40cm x 40cm (figura 8), dimensionado para um esforço característico de $N_k = 3200$ kN, com $f_{ck} = 35$ MPa. Considerando a necessidade de aumento da capacidade de carga, o presente trabalho buscou apresentar o resultado do dimensionamento desse reforço considerando um acréscimo de carga de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% utilizando dois métodos de reforços: por encamisamento

com concreto armado e o reforço com fibra de carbono.

Figura 8. Pilar estudo de caso.



Fonte: (Autor, 2018).

Quadro 1. Propriedades pilar original.

f_{ck}	f_{yk}	Barras	A_g
35MPa	50kN/cm ²	16 Ø 20 mm	1600cm ²
A_{st}	ρ_g	N_k	N_d
50,27 cm ²	3,14 %	3200 kN	4480 kN

Fonte: (Autor, 2018).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO (PREC)

Para o concreto do reforço utiliza um com características de resistência a compressão superior ao concreto do pilar original, neste estudo será adotado um concreto com $f_{ck,ref} = 40$ MPa, e armaduras com aço CA-50.

Determinando a resistência residual em elementos comprimidos pela equação (2), encontramos o valor de $P_u = 5511,34$ kN.

Considerando a equação (3) os momentos e excentricidades iniciais, mantendo essas características do pilar original, temos $\gamma^* = 1,23$, multiplicando esse coeficiente pela capacidade requerida no pilar com reforço, chegando aos seguintes resultados:

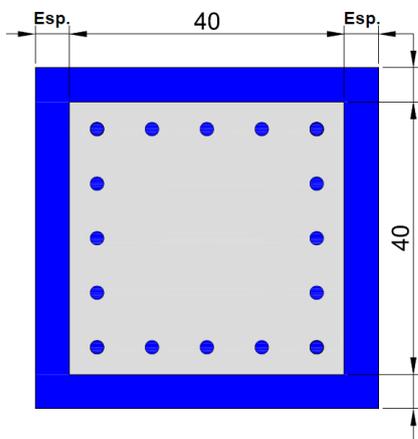
Quadro 2. Valores de carga para dimensionamento reforço (PREC)

$N_d(kN)$	Acrés(%)	$N_{d,req}(kN)$	$N_{d,re. \gamma^*}(kN)$
4480	5	4704	5785,92
4480	10	4928	6061,44
4480	15	5152	6336,96
4480	20	5376	6612,48
4480	25	5600	6888
4480	30	5824	7163,52

Fonte: (Autor, 2018).

Para o reforço do pilar aqui apresentado, adotaremos uma seção de reforço de modo a encontrarmos a armadura necessária para resistir aos esforços acima. O valor adotado para aumento da seção será de 5, 4, 3 cm de espessura.

Figura 9. Representação espessura reforço adotado.



Os resultados da armadura necessária calculados pela equação (5) são apresentados a seguir:

Quadro 3. Resultados obtidos.

$N_{d,req}(kN)$	$A_{s,ref}(3cm)$	$A_{s,ref}(4cm)$	$A_{s,ref}(5cm)$
5785,92	0	0	0
6061,44	0	0	0
6336,96	0	0	0
6612,48	0	0	0
6888	0	0	5,67
7163,52	0	1,36	12,23

Fonte: (Autor, 2018).

Verifica-se que, para o reforço por encamisamento do pilar, para as espessuras de 3 cm, não é necessário acréscimo de aço na área de reforço. Para o reforço com 4 cm a exceção se dá ao pilar com acréscimo de carga de 30%, e para o reforço com 5 cm para os casos com 25 e 30% respectivamente.

5.2. MANTAS DE FIBRA DE CARBONO (PRFC)

As propriedades da fibra de carbono (quadro 4) utilizada no dimensionamento são apresentadas a seguir:

Quadro 4. Propriedades físicas da fibra de carbono CF-160 adotada no estudo.

Espessura Nominal	0,330mm/lâmina
Resistência Máxima à Tração	3800 MPa
Deformação Máxima	1,67%
Modulo de Elasticidade	227 GPa

Fonte: (MBrace, 2006)

Os esforços obtidos para os acréscimos propostos são apresentados no (quadro 5),

onde $N_d = \gamma_f \cdot \gamma_n \cdot N_k$, sendo $\gamma_f = 1,4$ e $\gamma_n = 1$, para pilares cuja menor dimensão da seção seja maior que 19 cm:

Quadro 5. Valores de carga para acréscimos adotados.

N_d (kN)	Acréscimo(%)	$N_{d,req.}$ (kN)
4480	5	4704
4480	10	4928
4480	15	5152
4480	20	5376
4480	25	5600
4480	30	5824

Fonte: (Autor, 2018).

Utilizando as equações de (6) a (14), obtém-se o número de camadas necessárias para o esforço solicitante com o acréscimo de carga e as devidas verificações nos (quadros 6 e 7), respectivamente.

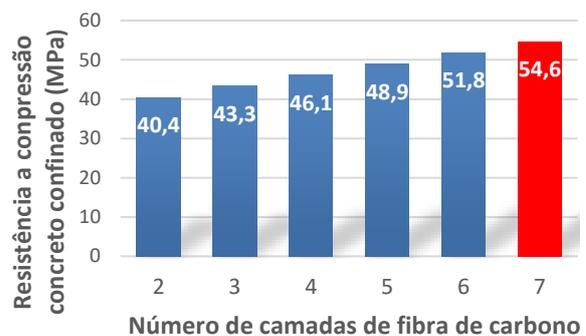
Quadro 6. Determinação número de camadas de fibra de carbono CF-160.

$N_{d,req.}$ (kN)	f'_{cc} (MPa)	k_a Admin.	f_t (MPa)	n Camad.	n Adot.
4704	40,4	0,411	4	1,82	2
4928	43,3	0,411	6,1	2,77	3
5152	46,1	0,411	8,2	3,72	4
5376	48,9	0,411	10,3	4,67	5
5600	51,8	0,411	12,4	5,62	6
5824	54,6	0,411	14,5	6,57	7

Fonte: (Autor, 2018).

Verifica-se, conforme o aumento da resistência requerido, o valor da pressão lateral aumenta conforme o número de camadas também aumenta, promovendo um aumento da resistência a compressão do concreto decorrente do confinamento. Pode ser observado a relação de acréscimo de resistência ao concreto confinado devido ao número de camadas na figura (10).

Figura 10. Influência do número de camadas na resistência a compressão concreto confinado



Fonte: (Autor, 2018).

Obtido o número de camadas necessário faz-se a verificação da deformação para a nova resistência a compressão do concreto confinado, pelas formulas apresentadas anteriormente.

Quadro 7. Verificações pilar reforçado com (PRFC) CF-160.

ϵ_{cc} mm/mm	$\epsilon_{cc} < 0,01$	$\frac{f_t}{f'_c}$	$\frac{f_t}{f'_c} > 0,08$
0,0052	Ok!	0,1145	OK!
0,0063	Ok!	0,1742	OK!
0,0075	Ok!	0,2339	OK!

0,0086	Ok!	0,2936	OK!
0,0098	Ok!	0,3533	OK!
0,0109	Não Ok!	0,4129	OK!

Fonte: (Autor, 2018).

Verificando o quadro (7), conclui-se que, quanto maior a carga imposta sobre o pilar, maior será a deformação do concreto no estado de confinamento. Para um acréscimo de 30% da carga original do pilar, o reforço dimensionado com utilização de mantas de fibra de carbono, não atende as verificações de segurança, estando o concreto solicitado a um estado de deformação excessiva.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com esse estudo chegou-se as seguintes considerações:

Apesar de ser um método tradicional o reforço com encamisamento com concreto armado, utilizar-se de materiais convencionais e possuir fácil execução, em elemento comprimidos ainda não possui o mesmo desenvolvimento que em outras estruturas como lajes e vigas em razão de sua maior complexibilidade no que diz respeito a determinação da capacidade resistente dos pilares reforçados, dificultado pelo tipo de consideração da distribuição dos esforços na estrutura, tornando-se difícil a consideração de um modelo em que se possa determinar.

O avanço de novas técnicas e descobertas de materiais, permitiu que a fibra de carbono fosse utilizada para reforço

estrutural. Entretanto, atualmente somente o Estados Unidos e alguns países da Europa possuem regulamentação sobre esse método de reforço, uma das necessidades apresentadas nesse estudo seria a elaboração de uma norma nacional, compatibilizando com os processos e as normas existentes no país.

Sugere-se para pesquisas futuras o desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos de cálculo para ambos os métodos de reforço de pilares estudados.

7. REFERÊNCIAS

ACI – AMERICAN CONCRETE INTITUTE. **Building Code Requirements for Structural Concrete**, ACI 318-14, Famington Hills, 2014.

ACI – AMERICAN CONCRETE INTITUTE. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. ACI Committee 440. Famington Hills, 2008.

ADORNO, F. V. et al. **Recuperação e Reforço de vigas de concreto armado**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, 2014.

BITTENCOURT, T. N.; FRANÇA, R. **Exemplo de um projeto completo de edifício de concreto armado**. Programa de Especialização em Estruturas, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2001.

BRONZE, R. A. **Estudo comparativo: uso do sistema de fibras de carbono e sistema convencional para o reforço de estruturas de**

Concreto. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

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

CARRAZEDO, R.; HANAI, J. B. de. Efeitos do confinamento em pilares de concreto armado encamisados com compósito de fibras de carbono. **Revista Cadernos de Engenharia de Estruturas.** v. 8 n. 30, p.55-77, 2006.

CONSTRUÇÃO CIVIL TEORIA E PRÁTICA. **Figura de Reforço de pilar por encamisamento com concreto armado.** (2017). Disponível em: https://www.construcaocivil.info/reforco-estrutural-com-encamisamento-de-pilares-foto-enviada-no-plantao_engenharia-structural-reinforcement-increasing-column-stiffness-photo-sent-at-plantao_engenharia/. Acesso: 25 de outubro de 2018.

COUTO, D. et al. **Como Reforçar Pilares em Concreto Armado, Sem Mudar a Sua Concepção Arquitetônica?** Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto: Belo Horizonte, MG 2016.

EMPRESA REFORÇO ENGENHARIA E RECUPERAÇÃO. **Figura de Reforço de pilar por confinamento de fibras de carbono.** (2015). Disponível em: <http://www.recuperacaoestrutural.com/2015/09/15/obra-de-reforco-estrutural-com-fibra-de-carbono-rfp/>. Acesso em 25 de outubro de 2018.

FERREIRA, E. D. M. et al. Concepção de pilares em concreto armado e de pilares em aço. X **Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação** – Universidade do Vale do Paraíba. 2006.

FIGUEIRA. S. P. S., **Reforço de Pilares por confinamento com mantas de fibra de carbono Avaliação de modelos de Comportamento.** 2016. Dissertação (Mestrado)- Universidade da Madeira, Funchal.

MACHADO, A. D. P; MACHADO, B. A. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: teoria e prática.** São Paulo: Pini, 2015.

MasterBrace - **Sistema composto para reforço estrutural.** Master Builders Solutions, 2006.

PÁDUA, R. C. D. et al. Pilares de concreto armado reforçados por meio de encamisamento. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 5, n. 1, 2012. ISSN 2179-0612.

PIANCASTELLI, É. M. **Patologia e terapia das estruturas reforço com concreto.** Belo Horizonte: Apostila para Curso de Extensão, Ed. Depto. Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

RIGAZZO, A. de. O. **Reforço em pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono.** 2003. Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SARAIVA et al. Estudos sobre Reforço de pilares de concreto armado com matérias compósitos de resina e fibras. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. xxx, s/n, 2013. ISSN 2316-4522.

SCADELAI, M. A.; PINHEIRO, L. M. **Estrutura de Concreto** - Capítulo 16. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas, 2005.

SOUZA JÚNIOR, T. F. D. **Estruturas de concreto armado.** NOTAS DE AULAS - Departamento de

Engenharia Universidade Federal de Lavras,
2016.

SOUZA, V. C. M. D.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. Pini, 1998. ISBN 8572660968.

TAKEUTI, A. R. **Comportamento resistente imediato e ao longo do tempo de pilares reforçados por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. 2003. Tese (Doutorado)- Universidade de São Paulo, São Carlos.

TAKEUTI, A. R. **Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. 1999. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo, São Carlos.

ZUCCHI, F. L. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.