Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

REFORÇO DE ESTRUTURA DE CONCRETO COM COMPÓSITOS CFRP – ESTUDO DE CASO

B. F. R. CUNHA JÚNIOR
Engenheiro Civil
Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Goiás; Brasil
farneyjr@hotmail.com

L. F. BAHIA
Graduanda de engenharia civil
Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Goiás; Brasil
leticiafariab@hotmail.com

S. F. H. ANGRITHARAKIS
Graduanda de engenharia civil
Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Goiás; Brasil
stefanie_an@outlook.com

RESUMO

O reforço em estruturas de concreto armado é um assunto que está sendo tratado com muita relevância, porém, ainda há poucos estudos que abordem a temática de forma sistematizada. Entre os métodos existentes de reforço, o uso de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) está em crescente aceitação devido as suas propriedades mecânicas, leveza e fácil aplicabilidade. No presente trabalho foi simulada uma edificação de quatro pavimentos, projetada para fins residenciais com cargas compatíveis que foi utilizada de forma indevida como uma biblioteca, sem consulta prévia ao projetista. Além disso, também foi simulado um erro de controle tecnológico que acarretou em pilares com resistência característica à compressão inferior aos solicitados em projeto. Realizou-se o dimensionamento da estrutura para fins residenciais e, posteriormente, utilizou a mesma estrutura, porém com sobrecargas referentes à nova utilização da edificação. Foram analisados os esforços e deslocamentos do edifício devido à nova sobrecarga não prevista na concepção do projeto. Após as devidas análises da estrutura com o suporte do software Eberick® na versão 9, verificou-se a necessidade de reforço desta para que a mesma resista aos esforços da nova utilização. Posteriormente, os cálculos dos reforços que, para efeitos deste estudo, foram realizados apenas em um pilar (P8) e uma viga (V7) apontaram para o reforço com duas lâminas de CFRP na viga estudada e com cinco lâminas do mesmo material no pilar analisado. Conclui-se que para que a estrutura trabalhe com segurança e eficiência é necessário que consulte-se um profissional para a devida análise, escolha do melhor método de reforço e execução segundo as recomendações.
Palavras-chave: Concreto; reforço estrutural; fibra de carbono; polímero; CFRP.

ABSTRACT

Strengthening of reinforced concrete structures is a subject that is being treated with high importance; however, there are few studies that address the issue in a systematic way. Among existing methods of reinforcement the use of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is increasing acceptance due to their mechanical properties, lightweight and easy applicability. This paper presents a simulation of a four-story building designed initially for residential purposes with compatible loads that was incorrectly used as a library, without prior consultation with the project designer. In addition, it was also simulated a technological control error that resulted in columns with lower compressive strength than requested in the design. It was performed the dimensioning of the structure for residential purpose. In as second moment was imposed to the same structure the libreary higher surcharge. The efforts and building shifts were analyzed due to the overloads that were not expected in the structural design. After appropriate structure analysis with the support of the brazilian software Eberick® version 9, there was the need for this reinforcement for the structure to resist the efforts of new use. Subsequently, calculations of reinforcements for the purposes of this study were conducted only on one column (P8) and one beam (V7) pointed to the reinforcement with two CFRP sheets in the studied beam and with five blades of the same material in the analyzed column. In conclusion, in order for the structure to work safely and efficiently it is necessary to consult a professional for proper analysis, selection of the best reinforcement method and execution according to the recommendations.
Keywords: Concrete; reinforced structures; carbon fiber; polymer; CFRP.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é o material mais utilizado na construção civil e o mais empregado em estruturas no Brasil. Por muitos anos a preocupação com essas estruturas era apenas com a estabilidade, pois acreditava-se que o concreto era um material perene em virtude do longo tempo que os problemas levavam para se manifestar.
Porém, com o crescente uso da estrutura de concreto armado acompanhado de estruturas cada vez mais esbeltas e vencendo maiores vãos livres, notou-se a importância do reforço da edificação. Nos dias atuais este assunto tem ganhado tanto espaço quanto a estabilidade estrutural, mas ainda percebe-se a necessidade de estudos que abordem este tema principalmente nos cursos de graduação em engenharia civil. O presente trabalho foi definido devido a essa carência no preparo e formação de profissionais da área de engenharia civil.
Ocasionalmente as estruturas de concreto armado necessitam de reforço para reconstituir sua segurança e prorrogar sua durabilidade. Isso acontece no momento em que a edificação atinge sua vida útil; devido à deterioração resultante do envelhecimento natural; mudança do uso da estrutura; alteração na geometria; acidentes como choques ou incêndios; erros de projeto ou execução ou devido à ação de agentes agressivos.
Há diversas técnicas para o reforço de edificações em estruturas de concreto. Entre os métodos disponíveis o mais comum é a utilização de chapas metálicas ou do próprio concreto armado para o reforço. Outros métodos que têm tido considerado desenvolvimento e aumento na sua utilização é o reforço de concreto armado utilizando-se FRP (Fiber Reinforced Polymer), ou polímero reforçado com fibra. Entre os tipos de fibras existentes, as mais usuais são com compósito de fibra de aramida, compósitos de fibra de vidro e compósitos de fibra de carbono, sendo este último o foco deste trabalho.
O reforço utilizando CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), ou polímeros reforçados com fibra de carbono, e sua notável aceitação deve-se ao seu baixo peso próprio, sua alta resistência, alto módulo de elasticidade, ótima resistência à corrosão, baixo fator de relaxação e a facilidade de execução do reforço.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento deste trabalho foi baseado nas recomendações e orientações de Machado e Machado [1] que aborda a temática de forma abrangente, o que possibilitou um bom embasamento para o artigo.
Todas as recomendações utilizadas no projeto estrutural são baseadas no atendimento ao estado limite último. O tema abordado leva a níveis aceitáveis contra a ocorrência de estado limite de utilização tanto como controle de deformação excessiva e fissuração.
O sistema CFRP é um reforço externo, sendo assim, ele é aderido tanto nas faces superior, inferior e laterais das peças.
Para análise das tensões e deformações no aço, concreto e na fibra, admite-se válidas as seguintes hipóteses:

- Cálculos de acordo com a seção e quantidade de aço da estrutura pré-existente;
- Hipótese de Bernoulli;
- Despreza-se a resistência de tração do concreto;
- A deformação do concreto não pode ultrapassar 3,5‰ (segundos os critérios da NBR 6118:2014 [2], para concreto do grupo I - fck[50 MPa), e 3,0‰ (segundo as recomendações do ACI 440.2R-08 [3]);
- A aderência do composto CFRP e o substrato devem ser perfeita;
- A deformação será linear até a ruptura no sistema composto CFRP;
- Despreza-se o peso próprio da fibra

2.1 Principais propriedades mecânicas

Devem ser consideradas as seguintes recomendações da fibra de carbono:

$$f^*_{fu} = C_E . f^*_{fu} \quad (1)$$

$$^{TM}*_{fu} = C_E . {}^{TM}*_{fu} \quad (2)$$

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (3)$$

Em que:

- f_{fu} : Tensão de tração máxima de projeto de fibra de carbono;
- C_E: Coeficiente de exposição ambiental;
- f^*_{fu}: Tensão de tração máxima da fibra de carbono (fornecida pelo o fabricante);

- ™$_{fu:}$ Deformação máxima de projeto da fibra de carbono;
- ™*$_{fu:}$ Deformação máxima da fibra de carbono (fornecida pelo fabricante)

2.2 Resistência final da peça reforçada

É primordial que os esforços solicitantes não excedam a capacidade resistente, conforme representado pela fórmula abaixo:

$$\phi M_n/M_u \quad (4)$$

Em que:
ϕ: Fator de redução da resistência.
M_n: Resistência de cálculo a flexão.
M_u: Momento fletor de cálculo atuante na seção.

2.3 Modos de ruptura de um elemento de concreto reforçado com CFRP

Há algumas maneiras de ocorrer a ruptura de um elemento de concreto reforçado com compósito de fibra de carbono. Abaixo estão descritos alguns desses modos:

1) Ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do concreto.
2) Ruptura por escoamento do aço antes da ruptura do sistema CFRP.
3) Ruptura por esmagamento do concreto antes da ruptura por escoamento do aço.
4) Ruptura do sistema compósito CFRP antes da ruptura por escoamento do aço.

O bloco de tensões de ruptura de compressão pode ser calculado de forma aproximada através da razão parabólica entre tensão e a deformação do concreto por meio das expressões seguintes:

$$\beta_1 = \frac{(4\varepsilon'_c - \varepsilon_c)}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad (5)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left(3\varepsilon'_c.\varepsilon_c - \varepsilon_c{}^2\right)}{3\beta_1.\varepsilon'_c{}^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon'_c = 1{,}71\frac{f'_c}{E_c} \quad (7)$$

Em que:
™'c: máxima deformação do concreto não confinado, podendo ser considerado valores próximos a 0,002.
™$_c$: Nível de deformação do concreto.
E_c: módulo de elasticidade do concreto.

$$Ec = \sqrt{f'c} \quad (5)$$

$f'c$ = fck

A deformação máxima permitida no CFRP para impedir a ruptura por deslocamento devido ao fissuramento não poderá exceder ao indicado na seguinte equação:

$$\varepsilon_{fd} = 0{,}41.\sqrt{\frac{f'_c}{n.E_t.t_f}} \le 0{,}9.\varepsilon_{fu} \quad (9)$$

Sendo que:
n: número de camada;
E_t: modulo de elasticidade do CFRP;
T_f: Espessura da lâmina;
™$_{fd}$:Deformação de deslocamento de sistema FRP, aderido externamente (mm/mm);
Como o ™$_{fd}$ é menor que ™$_{fu}$, será adotado o valor de ™$_{fu}$. O valor de ™$_{fu}$ é igual a 0,017mm/mm enquanto ™$_{fd}$ é apenas 0,0052mm/mm.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

2.4 Dimensionamento do reforço com CFRP

A deformação máxima permissível na fibra de carbono será fornecida pela seguinte equação:

$$\varepsilon = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad (10)$$

Em que:
™$_b$: Deformação na fibra considerada no reforço para o carregamento máximo.
™$_{bi}$: Deformação pré-existente por ocasião da instalação do CFRP.
Em resumo, pode-se dizer que os seguintes passos compõem o procedimento de dimensionamento:

- Arbitrar a profundidade da linha neutra(c) em conformidade com o modo de ruptura;
- Calcular as deformações dos diversos materiais admitindo-se a linearidade da variação das mesmas;
- Conhecidas as deformações, calculam-se as tensões atuantes nos diversos materiais;
- A partir do conhecimento das forças faz-se as verificações do equilíbrio das mesmas. Se o momento resistente no sistema reforçado for maior que o momento solicitante máximo de cálculo o processo está completo.

Abaixo estão expostas as fórmulas utilizadas para encontrar a posição da linha neutra e o braço de alavanca.

1) Posição da linha neutra:

$$c = d.\left(\frac{1-\sqrt{1-2k}}{0{,}8}\right) \quad (11)$$

2) Braço de alavanca para concretos do grupo I:

$$z = d - \left(\frac{0{,}8c}{2}\right) \quad (12)$$

2.5 Reforço de elementos sujeito à flexo-compressão com CFRP

Os sistemas que utilizam CFRP podem ser utilizados para aumentar a resistência à compressão do concreto através do confinamento produzido por uma jaqueta – fibra de carbono que encobre o concreto – de CFRP.
A resistência à compressão de uma peça de concreto com peso específico normal, não delgada e confinada por uma jaqueta CFRP, deve ser calculada utilizando a resistência do concreto confinado.
Para concreto não protendido com estribos convencionai usamos a equação:

$$\phi P_n = 0{,}80\phi\left[0{,}85.f'_{cc}\left(A_g - A_{st}\right) + f_{y.}A_{st}\right] \quad (13)$$

Para calcular os valores necessários ao cálculo das seções confinadas, são utilizadas as seguintes expressões:

- Para o intervalo 0 [™$_c$ [™'t :

$$f_c = E_C.\varepsilon_C - \frac{(E_C - E_2)^2}{4f'_C}.\varepsilon_c{}^2 \quad (14)$$

- Para o intervalo ™'t [™$_c$ [™$_{ccu}$:

$$f_c = f'_c + E_2.\varepsilon_c \quad (15)$$

Sendo que:
f_c:Resistência a compressão do concreto;
E_2: Inclinação da porção linear do modelo tensão deformação para concreto confinado com FRP (MPa).
Em que:

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (16)$$

Em que:
f'_{cc}: Resistência a compressão do concreto confinado;
$™_{ccu}$: Deformação axial de compressãoúltima do comcreto confinado correspondente a 0,85 f'cc em um membro levemente confinado.
A máxima resistência á compressão no concreto confinado (f'_{cc}) e a máxima pressão de confinamento (f_i) serão calculadas com a utilização das seguintes equações:

$$f'_{cc} = f'_c = \psi.3,3.k_a.f_i \quad (17)$$

Considerando χ =0,95 tem-se que:

$$f'_{cc} = f'_c = 3,135.k_a.f_i \quad (18)$$

$$f_i = \frac{2E_f.n.t_f.\varepsilon_{fe}}{D} \quad (19)$$

Em que:
f_i: Pressão máxima de confinamento devido a FRP.
K_a: Fator de eficiência do reforço de FRP na determinação do $f'_{cc.}$
O fator de eficiência k™ considera a falha prematura do sistema CFRP. Esse valor foi encontrado experimentalmente variando entre 0,58 e 0,61. Assim sendo, será adotado o valor:

$$ka = 0,55 \quad (20)$$

A deformação máxima por compressão que pode ser mobilizada nas seções confinadas por CFRP é a fornecida pela expressão (21), sendo que a limitação do resultado encontrado na expressão deve ser de 0,01.

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1,50 + 12k_b.\left(\frac{f_i}{f'_c}\right).\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c}\right)^{0,45} \right) \quad (21)$$

Em que:
K_b: Fator de eficiência do reforço de FRP na determinação do ε_{ccu}.

2.6 Seções transversais não circulares
A norma americana ACI 440.2R-08 [3] não recomenda que seja executado o confinamento de peças que descumpram as seguintes recomendações:

- Relação:

$$\left(\frac{h}{b}\right) > 2 \quad (22)$$

- Dimensão dos lados (h ou b) que excedam 900 mm, a não ser que a efetividade do confinamento seja demonstrado através de teste, conforme Machado e Machado [1].

No caso das seções não circulares, D é igual ao comprimento da diagonal da seção transversal retangular, conforme a equação abaixo:

$$D = \sqrt{h^2 + b^2} \quad (23)$$

A forma das parábolas e a área resultante efetivamente confinada está em função das dimensões “h” e “b” da coluna, do raio de curvatura dos encontros dos lados (r_C), assim como da relação geométrica da armadura longitudinal da pela (ρ_g), conforme demonstrado pela equação 24.

$$\left(\frac{A_e}{A_c}\right)=\frac{\left(\frac{1-\left(\frac{b}{h}\right).(h-2r_c)^2+\left(\frac{h}{b}\right).(b-2r_c)^2}{3A_g}\right)}{1-\rho_g} \quad (24)$$

3. METODOLOGIA

Neste trabalho analisou-se uma estrutura de concreto armado inicialmente projetada para fins residenciais, mas que teve sua utilização alterada para uma biblioteca. Ao impor sobrecargas mais elevadas à estrutura, foi analisada sua resposta em termos de esforços, deformações e deslocamentos e propôs-se soluções de reforço estrutural de vigas e pilares ilustrando esta situação. Para a análise utilizou-se uma planta de fôrma de um projeto estrutural fictício. A edificação fictícia contém quatro pavimentos com piso a piso de três metros cada um. O dimensionamento foi realizado no Eberick® na versão 9, programa de análise e detalhamento de estruturas de concreto armado.
Com o suporte do software para projeto estrutural, realizou-se o dimensionamento da estrutura para fins residenciais e, posteriormente, utilizou a mesma estrutura, porém com sobrecargas referentes à nova utilização da edificação. Foram analisados os esforços e deslocamentos do edifício devido à nova sobrecarga não prevista na concepção do projeto. Através destes dados constatou-se a necessidade de reforço em várias vigas e pilares.
O programa foi alimentado através das informações das características físicas e geométricas admitidas para a estrutura conforme representação da planta de fôrma da estrutura demonstrada na figura A09 do apêndice. A tabela 01 apresenta as características físicas da estrutura, a tabela 02 mostra as características dos materiais e na tabela 03 contém as especificações das lajes, conforme exposto abaixo. Posteriormente, foram analisados os dados obtidos através do software e comparados com os valores, esforços e deslocamentos admissíveis e presumiu-se que o melhor método a adotar foi o reforço com compósito CFRP.

Tabela 1 – Características físicas da estrutura

Tipo de Concreto	Classe de Agressividade Ambiental	Relação água cimento	Cobrimento nominal (mm)	Modulo de elasticidade Ecs
CONCRETO ARMADO	CAAII	0,60	30	21,735

Tabela 2 – Características dos materiais

Elemento	fck (kgf/cm²)	Ecs (kgf/cm²)
Vigas	250	241500
Lajes	250	241500

Tabela 3 – Especificação das lajes

Dados						Sobrecarga (kgf/m²)		
Nome	Tipo	Altura (cm)	Elevação (cm)	Nível (cm)	Peso próprio (kgf/m²)	Adicional	Acidental	Localizada
L1	Maciça	10	0	300	250	100	150	-
L2	Maciça	10	0	300	250	100	150	Sim
L3	Maciça	10	0	300	250	100	150	-
L4	Maciça	10	0	300	250	100	150	-
L5	Maciça	10	0	300	250	100	150	Sim
L6	Maciça	10	0	300	250	100	150	-
L7	Maciça	10	0	300	250	100	150	-

Para efeitos deste estudo elegeu-se apenas um pilar e uma viga entre os que necessitam de reforços. Não houve um critério específico para a escolha dos elementos analisados, apenas verificou-se qual viga e pilar foram corretamente dimensionados sob atuação da sobrecarga de projeto e que no segundo momento não suportaram as sobrecargas impostas pela nova utilização. Nesse contexto foram selecionados a viga V7 (12x50 cm) e o pilar P8 (15x55 cm). Os cálculos de reforços dos elementos foram realizados para os pavimentos mais solicitados e replicados para os pavimentos necessitados de reforço.

ISSN 2448-1459

Além da sobrecarga imposta na estrutura devido à alteração da utilização, também foi simulado um erro de controle tecnológico dos pilares. Na simulação foi representada a constatação de que os projetos que solicitavam pilares com resistência característica do concreto à compressão (fck) de 40 MPa apresentavam apenas 25 MPa, conforme comprovação dos ensaios. Devido a essas ocorrências foi imposto um aumento da resistência em 28% e houve necessidade da execução do reforço com fibra de carbono nos pavimentos TIPO 1, TIPO 2, TIPO 3, TIPO 4 e COBERTURA. A figura 01 apresenta o detalhamento do pilar P8 conforme executado.

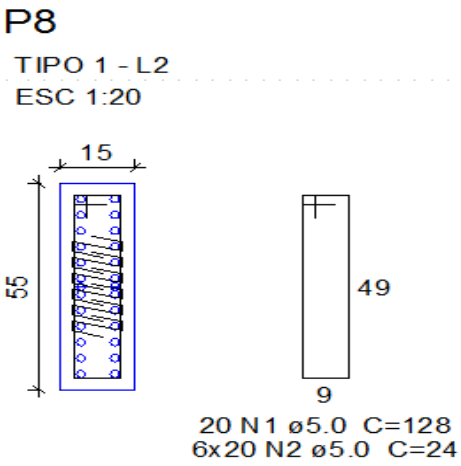

Figura 01: Detalhamento pilar P8

A viga V7 foi outro dos elementos que também não suportou a sobrecarga que a biblioteca impôs à estrutura. A viga, que apresentava momento fletor ilustrado na figura 02, passou a apresentar momentos iguais aos apresentados na figura 03. Para este caso foi considerado apenas flexão simples. Devido a isso foram realizados os cálculos para reforçá-la nos pavimentos TIPO 1, TIPO 2 e TIPO 3 com Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP).

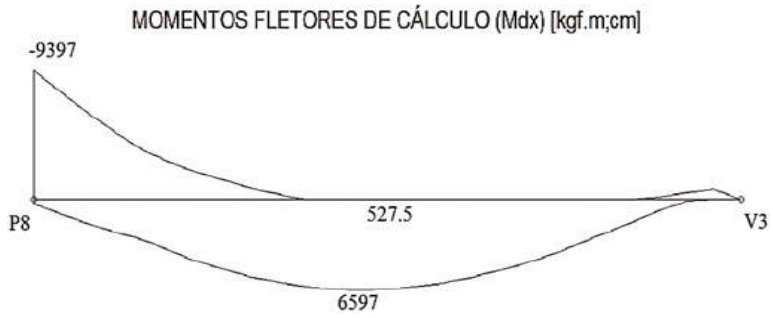

Figura 02: Momentos Fletores de Cálculo antes da sobrecarga

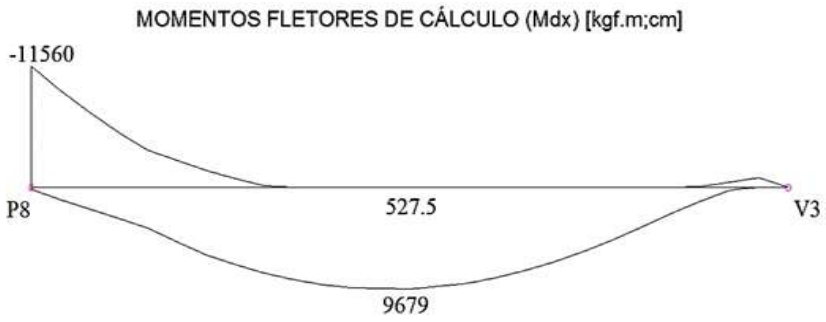

Figura 03: Momentos Fletores de Cálculo após a sobrecarga

Na figura 04 está o detalhamento referente à viga V7.

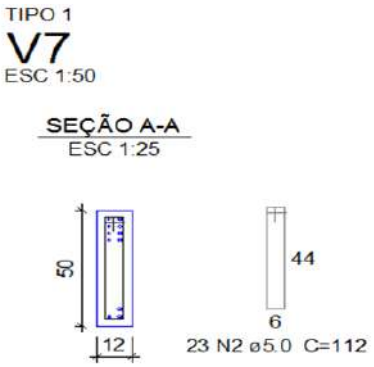

Figura 04: Detalhamento viga V7

A fibra utilizada no reforço tem as seguintes características: módulo de elasticidade do CFRP (E_f) igual a 228000 MPa; deformação de ruptura última do reforço CFRP (ε^*_{fu}) igual a 0,017 mm/mm; tensão última de tração (f^*_{fu}) igual a 3800 MPa e espessura nominal de uma camada de reforço de CFRP (t_f) igual a 0,33 mm.
Antes de realizar o reforço é necessário o tratamento da superfície onde este será aplicado. Após a verificação de que o substrato está saudável e que a superfície está descontaminada pode-se iniciar a preparação da superfície. Conforme recomendação de Machado [4], a limpeza da superfície deve ser feita através de jateamento ou força de abrasão. Além disso, também deve ser removida toda a poeira, pó, substâncias oleosas e graxas além das partículas sólidas. As quinas das seções deverão ser arredondadas com um raio mínimo de 1,5 cm para evitar a concentração de tensões nos cantos e evitar a criação de vazios nas dobras das seções retangulares entre o concreto e o CFRP, conforme orientação de Machado e Machado [1].
Após a preparação do substrato pode-se iniciar a aplicação do sistema CFRP. Inicialmente é necessária uma ponte de aderência entre o concreto e a fibra, que usualmente é feita através de resina epóxi. Posteriormente cortam-se as fibras de carbono em uma bancada e então as peças devem ser aderidas às peças a serem reforçadas. Há duas formas de execução: saturação via úmida e saturação via seca. Na saturação via úmida a lâmina é saturada em uma bancada própria sendo transportada depois para a peça estrutural. Já na saturação via seca é feito sobre a peça de concreto a ser reforçada, colando a lâmina logo após. O processo executivo da fibra está representado na figura A01 à A08 no anexo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após as análises realizadas através do programa computacional Eberick® V9 foi observada a forma como a estrutura reage após alterar a sua utilização, o que impôs uma sobrecarga, e após a simulação um erro de execução. Após essas verificações foi proposto o reforço da estrutura com o Composto de Fibra de Carbono (CFRP).
Para a determinação do número de lâminas de fibras a serem colocadas é necessário primeiramente conhecer previamente o nível de tensão existente na superfície do substrato no momento de sua aplicação. Conhecendo esse nível de tensão conhece-se também o nível de deformação existente na fibra externa do concreto.

4.1 Dimensionamento do reforço com CFRP da viga

A deformação máxima permitida na fibra é apresentada pela equação:

$$\varepsilon = \left(\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}\right) \leq \varepsilon_{fu} \tag{10}$$

Em que o ™$_{bi}$ é calculado por semelhança de triângulo de acordo com a figura 05.

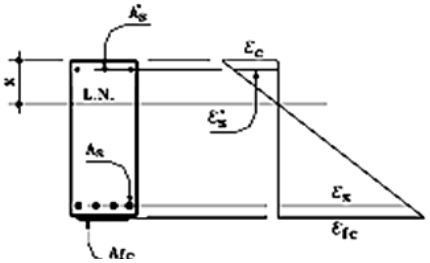

Figura 05: Deformação x Força resultante. Fonte: Machado e Machado [1].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Em que:
ε_{bi} : 3,86.10^{-5}
εfd : 0,005284629
ε_{fe}: 0,002319225
ε_c: 0,003835579
F_s: 965,58
F_y: 4350
ε_s: 0,004598

Machado [4] sugere que o reforço à flexão através de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono seja feito no estado limite último. A figura 06 representa a deformação x força resultante.

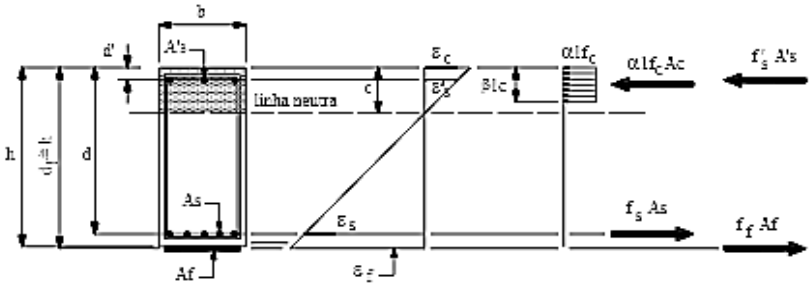

Figura 06: Deformação x Força resultante. Fonte: Machado e Machado [1].

Em que:
A_s =3,77 cm²
A_f = 1,77cm²
ε'_C=0,00018
β_1=1,060
α_1=0,590
h_f: =50 cm;
b_f = 12cm;
c = 0,0167 cm;
b = 12 cm;
d_f = 50 cm;
d = 44,58 cm.

A determinação do número de fibras a serem utilizadas é feito por tentativas. Admitindo duas lâminas de fibras de carbono têm-se os seguintes dados:

E_f =22.800 Mpa
ε_{fu}=0,017 mm
F_{fu}=3.800 Mpa
F_f= 0,33 mm

Arbitrando-se assim o C= 0,628 x d por estar dentro do domínio 3 no estado limite último, conforme figura 07.

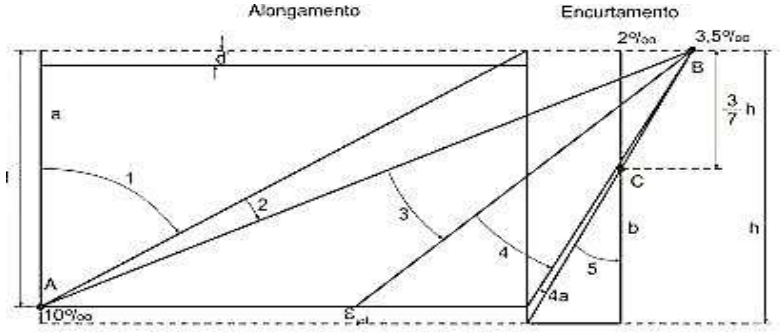

Figura 07: Domínios de dimensionamento do concreto armado. Fonte: NBR 6118:2014.

Para que seja possível realizar o reforço fazendo a utilização de 2 lâminas de fibras é necessário que o C_{arb} seja igual ou com um valor próximo ao $C_{cal.}$ A verificação foi atendida, pois: C_{Ar} = 27,9 e C_{cal}= 29,2.
Sendo assim, o dimensionamento estrutural excedeu os esforços majorados conforme solicitado em norma, o que torna a verificação válida.

$$\phi M_n/M_u \quad (4)$$

1871946 kg.f.cm /9679 kg.f.cm

4.2 Dimensionamento do reforço com CFRP do pilar

Seguindo a recomendação da norma ACI 440.2R-08 a primeira verificação é:

$$\left(\frac{h}{b}\right) > 2 \rightarrow \left(\frac{550}{150}\right) = 3,6$$

Tendo essa verificação atendida foram adotados os seguintes valores de projeto para a fibra:

Ffu:	3610	Mpa
Ɛfu:	0,01615	mm/mm
K:	0,55	

Na seção transversal foram extraídos os seguintes dados:

Ag:	82500	mm²
Ast:	471,2388	mm²
Ag-Ast:	82028,761	mm²

Então, solucionou-se a equação citada abaixo, que fornece a carga de compressão admissível em um pilar reforçado com CFRP, que resultou no cálculo da quantidade de lâminas necessárias para o reforço. Conforme demonstração de cálculo abaixo, foram necessárias 5 fibras para o reforço dos pilares.

$$\phi P_n = 0,8\phi\left[0,85\psi f'_{cc}\left(A_g - A_{st}\right) + f_y . A_{st}\right] \quad (16)$$

$$\phi P_n = 19067,25 \times n + 16964,28$$
$$n = 4,5 \approx 5$$

5. CONCLUSÕES

Conforme proposto, houve a necessidade de reforço em vários elementos. Porém, foi selecionado apenas um pilar (P8) e uma viga (V7) do projeto para realizar os dimensionamentos do reforço no desenvolvimento deste artigo. Após a escolha do método com compósito de fibra de carbono – método com crescente aceitação e utilização – foram calculados os reforços para saber com quantas lâminas conseguir-se-ia recuperar a capacidade resistente da atual estrutura com sobrecargas da nova utilização.
Após as análises e cálculos foram constatados a inevitabilidade da disposição de 2 (duas) lâminas de CFRP na viga V7 e a exigência de 5 (cinco) lâminas de CFRP no pilar P8 para que a estrutura possa trabalhar com eficiência e segurança.
Propõe-se um próximo estudo que compare outra técnica de reforço com reforço com compósito de fibra de carbono, realizado neste artigo, a fim de avaliar qual dos métodos é mais vantajoso.

7. REFERÊNCIAS

[1] MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. “Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP – Teoria e Prática.” 1. ed. São Paulo: Pini, 2015.
[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Projeto de estrutura de concreto – Procedimento (NBR 6118:2014)”. Rio de Janeiro, 2014.
[3] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-08).” Farmington Hills, 2008.
[4] MACHADO, A. P. “Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono”. São Paulo, 2015

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

.

8. ANEXO



Figura A01: Preparação do substrato.
Fonte: arquivo pessoal

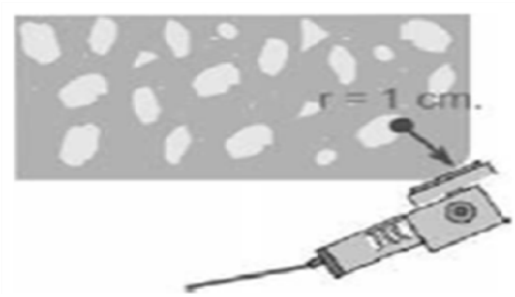

Figura A02: Arredondamento dos cantos vivos.
Fonte: Machado e Machado [1].

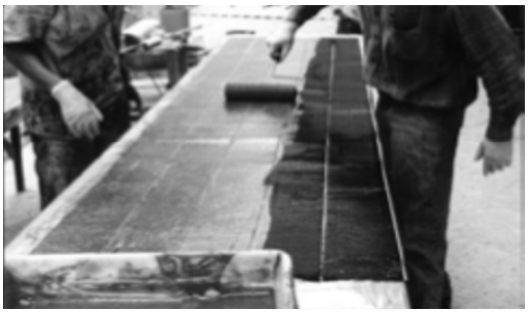

Figura A03: Saturaçao úmida na bancada.
Fonte: Machado e Machado [1].

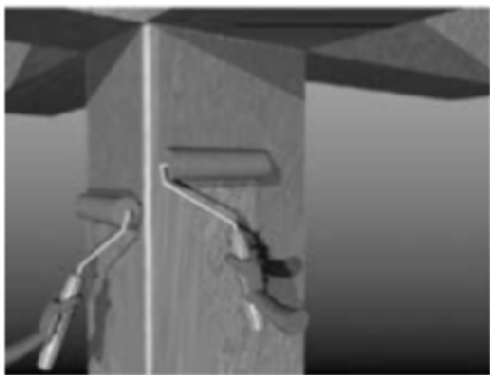

Figura A04: Saturação direta no concreto.
Fonte: Machado e Machado [1].

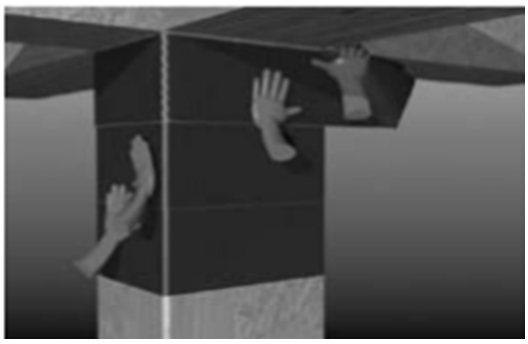

Figura A05: Aplicação da lâmina de fibra de carbono.
Fonte: Machado e Machado [1].



Figura A06: Reforço de pilares quadrados.
Fonte: Machado e Machado [1].



Figura A07: Reforço de pilares circular.
Fonte: Machado e Machado [1].



Figura A08: Reforço de Viga.
Fonte: Machado e Machado [1].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

9. APÊNDICE

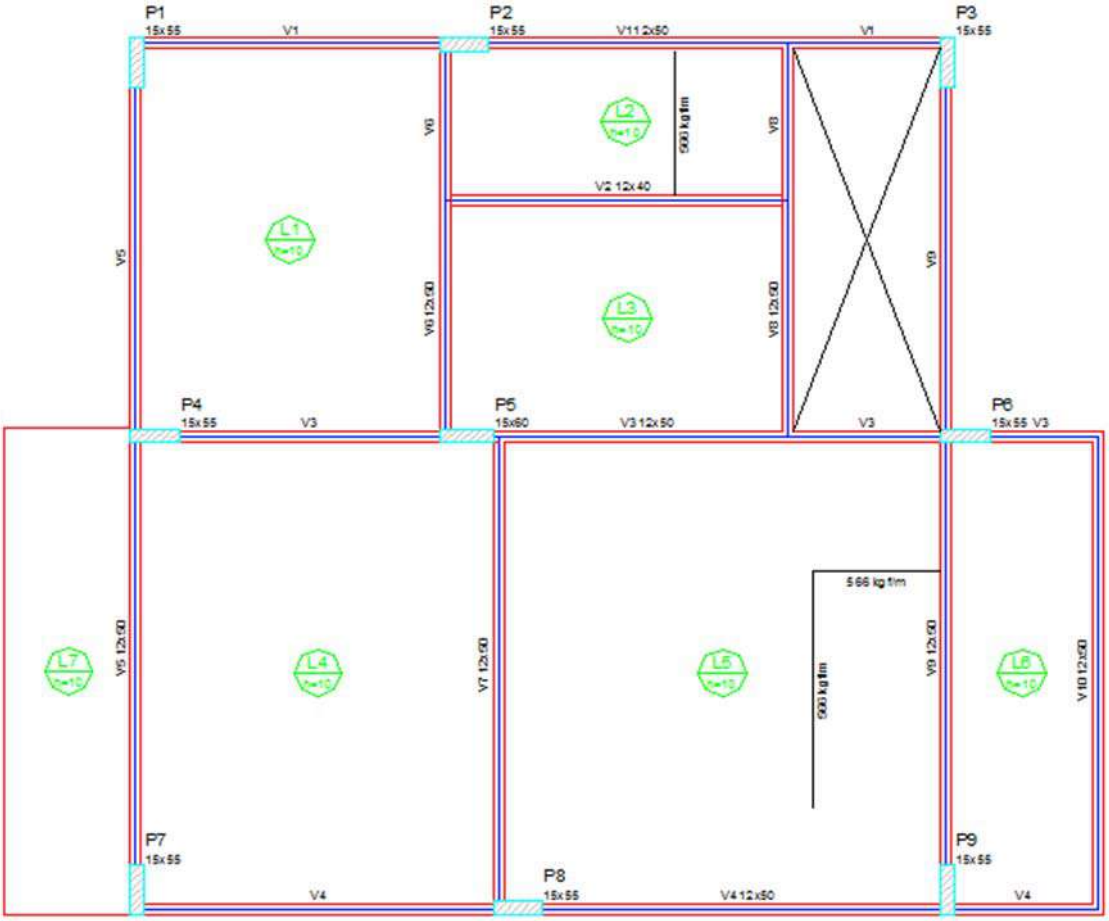

Figura A09: Planta de forma do pavimento TIPO 1 (Nível 300)