Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM PRFC

L. S.TAPAJÓS
Mestrando em Engenharia Civil
Universidade Federal do Pará
Pará, Brasil
luamim.tapajos@itec.ufpa.br

M.H.OLIVEIRA
Professor, Engenharia Civil e Ambiental
Universidade de Brasília
Distrito Federal, Brasil
marcoshonorato@unb.br

D.C.S.CARVALHO
Graduanda em Engenharia Civil
Universidade Federal do Pará
Pará, Brasil
daniela.carvalho@itec.ufpa.br

A.B.MDEIROS
Professor, Faculdade de Engenharia Civil
Universidade Federal do Pará
Pará, Brasil
medeiros@ufpa.br

F.P.MAUÉS
Graduando em Engenharia Civil
Universidade Federal do Pará
Pará, Brasil
frederico.maues@itec.ufpa.br

M.P.FERREIRA
Professor, Faculdade de Engenharia Civil
Universidade Federal do Pará
Pará, Brasil
mpina@ufpa.br

RESUMO

Polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) são largamente utilizados no mundo inteiro para o reforço de estruturas de concreto armado, por possuírem baixo peso próprio, elevada resistência à tração e pela praticidade e velocidade de execução. No Brasil, a demanda por este tipo de serviços de reforço tende a aumentar à medida que as construções existentes começam a ultrapassar sua vida útil e que o crescimento dos centros urbanos leva a mudanças nos usos das edificações. No entanto, seu uso no país ainda é restrito, uma vez que não existe hoje uma normalização nacional específica que oriente o projeto e a execução deste tipo de reforço. Este artigo tem como objetivo apresentar conceitos relevantes para o projeto de reforços à flexão de vigas com PRFC, tendo como base o ACI 440-2R (2015). Um banco de dados com resultados de ensaios em 82 vigas foi utilizado para avaliar as recomendações da norma americana, de forma a identificar a viabilidade de seu uso em projetos brasileiros.
Palavras-chave: Reforço, Concreto Armado, PRFC.

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) are widely used on the world to strengthening reinforced concrete structures, because they have low dead weight, high tensile strength and the convenience and speed of execution. In Brazil, the demand for strengthening services tends to increase as the existing buildings begin to exceed their useful life and the growth of urban centers leads to changes in the buildings uses. However, its use in the country is still limited, since there is not today a specific national standards to guide the design and implementation of this type of reinforcement. This article aims to present relevant concepts for reinforcements project bending beams with CFRP, based on the ACI 440-2R (2015). A database with test results in 82 beams was used to evaluate the recommendations of the American standard, to identify the viability of this use in Brazilian designs.
Keywords: Strengthening, Reinforced Concrete, CFRP.

1. INTRODUÇÃO

Existem diversos motivos que levam uma estrutura a ser reabilitada ou reforçada, como deterioração devido à idade superior alcançada para a qual a mesma foi projetada, mudança de solicitação, danos causados por ações ambientais e erros no projeto ou execução da edificação, segundo Toutanji *et al* [1]. Este tema tem uma grande relevância à nível internacional, uma vez que nos Estados Unidos são investidos cerca de 20 bilhões de dólares ao ano (Strategic Development Council [2] enquanto que o Reino Unido investiu cerca de 40 bilhões de dólares somente em 1995 (Beeby e Etman [3]).

Dentre as diversas técnicas existentes para o reforço de estruturas de concreto armado, destaca-se o sistema que emprega polímeros reforçados com fibras (PRF's) por apresentarem baixo peso, alta resistência à tração e à corrosão. A

utilização desse material como reforço é aplicada para diversos elementos estruturais, como pontes, lajes, pilares e, o caso deste estudo, vigas. Os tipos de fibras mais empregados para o reforço são as de vidro, aramida e de carbono, sendo este último material mais atrativo, uma vez que a sua capacidade resistente após 50 anos equivale a 90 % da inicial, enquanto que a de aramida apresenta 50% e a de vidro 30%, segundo Yamaguchi et al [4].

Além dos fatores citados, diversos estudos publicados em todo o mundo relatam o acréscimo de resistência à flexão de vigas devido ao uso dos polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) como comentam Teng *et al* [5]. Esse acréscimo se dá pela parcela contribuinte da fibra, que torna a análise de uma viga reforçada por esta técnica diferente das convencionais de concreto armado, justificando para isso a realização de estudos acerca deste tema.

Apesar das grandes vantagens apresentadas por esse sistema de reforço, o seu uso ainda é limitado no Brasil, devido a limitações como fabricação, distribuição, divulgação, poucas pesquisas nacionais neste tema, falta da cultura de manutenção, reparo e reforço de estruturas no país, assim como o preço do serviço e a mão de obra qualificada. Isto reflete diretamente no fato de não existirem recomendações normativas nacionais que permitam a utilização do PRFC como reforço à flexão de vigas de concreto armado.

Diante deste quadro, este estudo tem o objetivo de coletar ensaios experimentais em vigas reforçadas flexão com PRFC, com o intuito de analisar esse banco de dados por meio do ACI 440-2R [6], que trata do dimensionamento de reforço por meio desta técnica. Além de apresentar a metodologia adotada pela norma americana para projeto, este artigo ainda avalia o desempenho das recomendações americanas por meio de comparação dos resultados teóricos com os experimentais coletados, objetivando verificar a viabilidade de uso de suas recomendações.

2. VIGAS REFORÇADAS COM PRFC

2.1 Tipos de reforços

Tem-se disponíveis na literatura duas principais técnicas de reforço com PRFC. A primeira técnica de reforço é realizada pela colagem do PRFC externamente ao elemento estrutural, podendo ser utilizados a manta ou laminado de PRFC, como mostrado na Figura 1a. A segunda técnica consiste em instalar o PRFC internamente em aberturas executadas no elemento estrutural, como mostrado na Figura 1b, para esta técnica geralmente se utiliza a barra de PRFC. Dentre essas técnicas a primeira é a mais empregada pela praticidade, pois é uma técnica não destrutiva, sendo, do ponto de vista estrutural, semelhantes os comportamentos das duas técnicas segundo Bilotta *et al* [7].



a) Colagem externa do PRFC b) Colagem interna PRFC

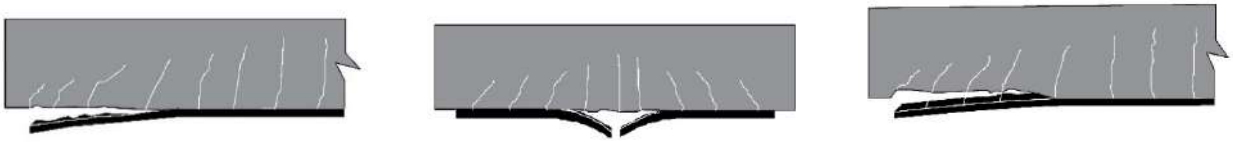
Figura 1: Técnica de reforço com PRFC

Dentre os reforços com colagem externa, as lâminas se diferenciam das mantas pelo fato de que as primeiras possuem um tratamento prévio, desta forma está preparada para a aplicação direta mediante a aplicação de uma resina de fixação, enquanto que a manta necessita de preparação in loco e o corte deve ser feito nas dimensões e orientações adequadas, necessitando, desta forma, maior atenção e técnica mais apurada do que o primeiro. Este estudo tratará somente do caso de reforços com aderência externa, uma vez que existem mais resultados de ensaios experimentais disponíveis na literatura e por ser a técnica mais empregada quando se utiliza fibras de carbono como reforço.

2.2 Modos de Ruptura

No reforço de vigas com PRFC deve-se atentar aos tipos frágeis de ruptura, pois com esses modos de ruptura, as estimativas de resistência do reforço podem ser contra a segurança, uma vez que o reforço pode não atingir toda a sua eficiência, constituindo essa a principal diferença entre o comportamento de uma viga convencional de concreto armado

e uma reforçada com fibra de carbono. Rupturas frágeis como o descolamento da fibra com a interface do concreto ou da própria fibra e destacamento do cobrimento de concreto são tipos de rupturas que devem ser evitadas, como ilustrado na Figura 2.



a) Descolamento da fibra b) Ruptura da fibra c) Destacamento do cobrimento de concreto

Figura 2: Tipos de rupturas frágeis em vigas reforçadas com PRFC

A ruptura na Figura 2a é típica de falha de ancoragem da fibra e leva a estimativas inseguras da capacidade resistente da viga, uma vez que a capacidade de reforço não tem sua máxima eficiência atingida. Para evitar este tipo de ruptura recorre-se à utilização de resinas de alto desempenho para obter uma boa aderência na interface entre a fibra e o concreto, ou ainda a utilização de dispositivos de ancoragem disponíveis na literatura, como o testado por Alam e Jumaat, [8], apresentado na Figura 3.

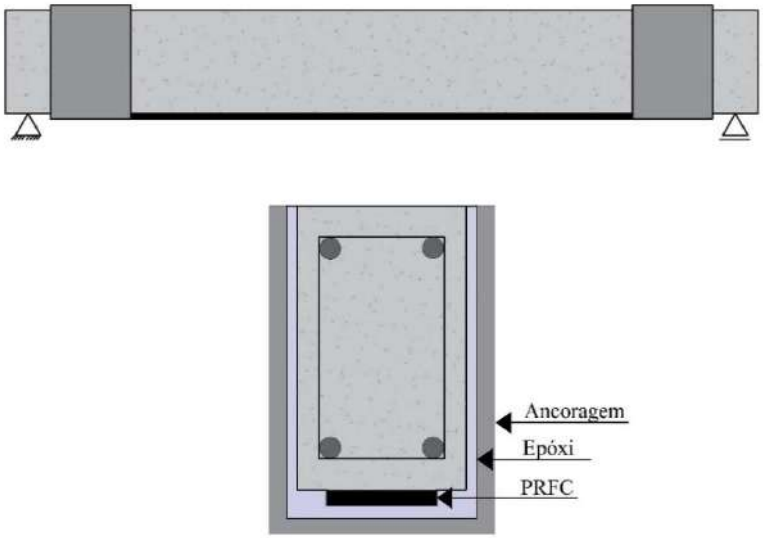


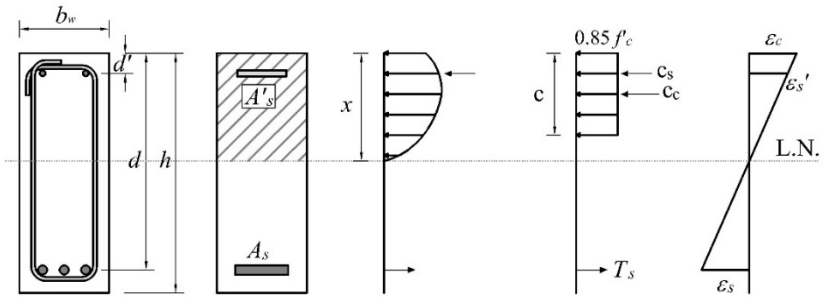
Figura 3: Dispositivo de ancoragem do PRFC (Adaptado de Alam e Jumaat [8])

Quando a fibra de carbono rompe em uma viga reforçada à flexão, como apresentado na Figura 2.b, é notável que a máxima capacidade resistente desse reforço foi atingida, porém este tipo de ruptura deve ser evitado, uma vez que se trata de uma ruptura frágil.

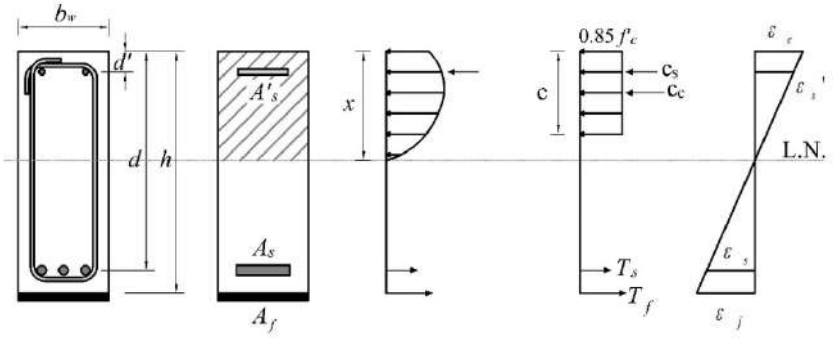
A Figura 2c apresenta o modo de ruptura frágil mais verificado nas vigas reforçadas à flexão com PRFC, este tipo de ruptura ocorre devido ao acumulo de tensões nesta região, com considerável influência das fissuras formadas pela distribuição das tensões de cisalhamento. Para evitar este tipo de ruptura, recorre-se aos dispositivos de ancoragem semelhantes aos utilizados para evitar o descolamento da fibra.

2.3 Comportamento de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com PRFC

O comportamento à flexão de vigas reforçadas com PRFC pode ser comparado ao comportamento de uma viga simples de concreto armado, a diferença consiste na parcela de contribuição da fibra de carbono que irá reposicionar a altura da linha neutra, de acordo com a deformação imposta sobre a fibra combinada com a deformação da armadura existente na viga, esta comparação pode ser verificada na Figura 4.



a) Viga sem PRFC



b) Viga com PRFC

Figura 4: Comportamento à flexão de vigas

O PRFC apresenta um comportamento linear elástico até a ruptura, suas propriedades mecânicas dependem do tipo de fibra empregada e do processo de fabricação, no entanto, o tipo mais comum a ser adotado é o que apresenta módulo de elasticidade próximo ao do aço, em torno de 200 GPa, e resistência à tração, em média, cinco vezes superior à do aço.

O ACI 440-2R [6] apresenta recomendações para o dimensionamento de reforço utilizando PRFC de modo a evitar os modos de ruptura prematuros apresentados anteriormente, baseadas nos estudos realizados por Teng *et al* [9, 10], onde os autores verificaram que a eficiência do reforço está diretamente ligada ao número de camadas de fibras de carbono utilizadas nas vigas, porém que em vigas com cinco camadas ou mais houveram rupturas prematuras. A Equação 1 apresenta o limite de deformação específica da fibra empregada no reforço de acordo com a norma americana, sendo esta a mesma equação proposta pelos autores citados.

$$\varepsilon_{fd} = 0{,}41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0{,}9 \cdot \varepsilon_{fu} \qquad (1)$$

Onde:
ε_{fd} é o valor limite de deformação da fibra a ser adotado no dimensionamento e verificação do reforço para evitar rupturas prematuras da fibra,
f'_c é a resistência característica à compressão do concreto,
n é o número de camadas de fibras,
E_f é o módulo de elasticidade,
t_f é a espessura da fibra de carbono,
ε_{fu} é a deformação última observada na fibra no momento da ruptura.

A partir da Equação 1 verifica-se que quanto maior é o número de camadas de reforço, menor será a eficiência do reforço, uma vez que a transmissão dos esforços resistidos pela fibra torna-se menos eficientes nas zonas de aderência entre as camadas.

O início do processo de verificação da resistência de uma viga reforçada à flexão com PRFC se dá pela estimativa da altura da linha neutra, assim é possível estimar as deformações das parcelas envolvidas no mecanismo da peça, por meio de semelhança de triângulos, baseada na Figura 4b. A Equação 2 determina a deformação da fibra de carbono.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{h - x}{x}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \qquad (2)$$

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Onde:
ε_{fe} é a deformação efetiva da fibra de carbono,
ε_{cu} é a deformação útima do concreto,
h é a altura da viga,
x é a altura linha neutra,
ε_{bi} é a deformação encontrada no cobrimento da armadura de tração na viga antes do reforço.

No caso de ensaios experimentais em laboratórios, poucos apresentam um carregamento preliminar para se aproximar mais da realidade, na maioria dos ensaios experimentais encontrados na literatura εbi será igual a 0. Assim é possível calcular a tensão na fibra a partir da Equação 3.

$$f_{fe} = E_{fe}\varepsilon_{fe} \tag{3}$$

Onde:
f_{fe} é a tensão efetiva da fibra.

O processo de determinação das deformações e tensões das armaduras positivas e negativas da peça é análogo ao apresentado para a fibra de carbono e podem ser calculados pelas equações 4, 5, 6 e 7.

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{x - d'}{x}\right) \tag{4}$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} \cdot \left(\frac{d - x}{h - x}\right) \tag{5}$$

$$f_s' = E_s \cdot \varepsilon_s' \leq f_{ys}' \tag{6}$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_{ys} \tag{7}$$

Onde:
$\varepsilon_{s'}$ é a deformação da armadura superior da viga,
d' é a altura da armadura superior da viga,
ε_s é a deformação da armadura inferior da viga,
d é a altura útil da viga,
h é a altura da viga,
$f_{s'}$ é a tensão da armadura superior da viga,
E_s é o módulo de elasticidade do aço,
$f_{ys'}$ é a tensão de escoamento do aço da armadura superior,
f_s é a tensão da armadura inferior,
f_{ys} é a tensão de escoamento da armadura inferior.

De posse desses valores é possível verificar se a altura da linha neutra adotada corresponde ao elemento analisado, uma vez que as forças de tração e compressão devem se equilibrar, assim a linha neutra pode ser calculada pela Equação 8.

$$x = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe} - A_s' \cdot f_s'}{0.85 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot b_w} \tag{8}$$

Onde:
A_s é a área de aço da armadura inferior da viga,
A_f é a área de fibra da viga,
$A_{s'}$ é a área de aço da armadura superior da viga,
β_1 é um coeficiente que determina a aproximação da curva da resultante de compressão do concreto a um retângulo, como ilustra a Figura 4,
b_w é a largura da viga.

O coeficiente β_1 depende da, resistência característica à compressão do concreto, sendo 0,85 para concretos com f'_c menor que 28 MPa e havendo um decréscimo linear de 0,05 para cada 7 MPa a mais do que os 28 MPa estabelecidos, sendo que o valor mínimo para esse coeficiente é de 0,65 ACI 318-M [11].

O ACI 440-2R [6] recomenda o método de tentativas e erros para verificar se a altura da linha neutra está correta ou não, desta forma é possível estabelecer uma correlação entre o valor da mesma com o somatório das forças de reação

das componentes da viga (armaduras positiva e negativa, fibra de carbono e o bloco de compressão do concreto), por meio de um processo iterativo. Corrigindo a altura da linha neutra e obtendo o seu valor verdadeiro, determina-se o momento resistente da viga reforçada com PRFC a partir da Equação 9.

$$M_R = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2}\right) + 0{,}85 \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot x}{2}\right) + A_s' \cdot f_s' \cdot \left(\frac{\beta_1 \cdot x}{2} - d'\right) \quad (9)$$

Onde:
M_R é o momento resistente da viga.

3. BANCO DE DADOS

Reuniu-se um banco de dados com 82 resultados experimentais de 12 autores diferentes de vigas reforçadas à flexão com PRFC ensaiadas pelo método de Stuttgart (Figura 5), onde as características das vigas estão expostas de forma resumida nas Tabelas 1 e 2.

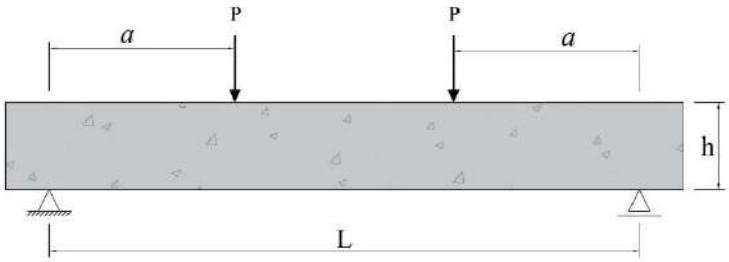


Figura 5: Ensaio de Stuttgart

Tabela 1: Características das vigas do banco de dados

Autor	Nº de vigas	b_w	h	d	d'	a	A_s	A_s'	f_{ys}	f_c
		(mm)					(mm²)		(N/mm²)	
(1)	12	150	300	272	24	833	245	62	706	32
(2)	8	120	250	219	31	783	157	56	565	33
(3)	4	150	300	267	30	933	307	100	500	39
(4)	9	150	200	164	33	600	226-628	157	350-406	24
(5)	9	203	356-406	318-368	28-34	1065-1220	395	142	440	35-37
(6)	5	200	300	262	38	1300	402	402	527	64-70
(7)	2	150	250	213	36	800	256-398	157	435	18
(8)	7	108	158	127	30	560	142	56	427	49
(9)	6	120	170	141-145	29	300	39-99	66	627-788	44
(10)	14	75	150	120	29	550	62	62	640	45
(11)	4	120	250	224	25	750	226-402	157	335	23
(12)	2	140	300	266	34	1800	402	402	435	30

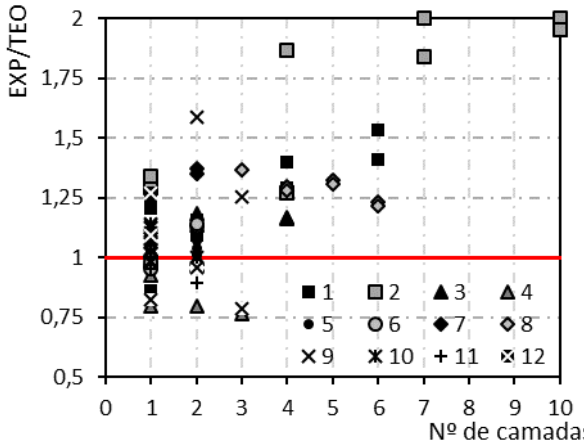
Obs: (1) Beber *et al* [12]; (2) Beber [13]; (3) David *et al* [14]; (4) Esfahani *et al* [15]; (5) Breña *et al* [16]; (6) Rusinowski *et al* [17]; (7) Shin e Lee [18]; (8) Toutanji *et al* [19]; (9) Barros *et al* [20]; (10) Gamino [21]; (11) Zhang *et al* [22]; (12) Spadea *et al* [23]

Tabela 2: Variáveis do reforço das vigas

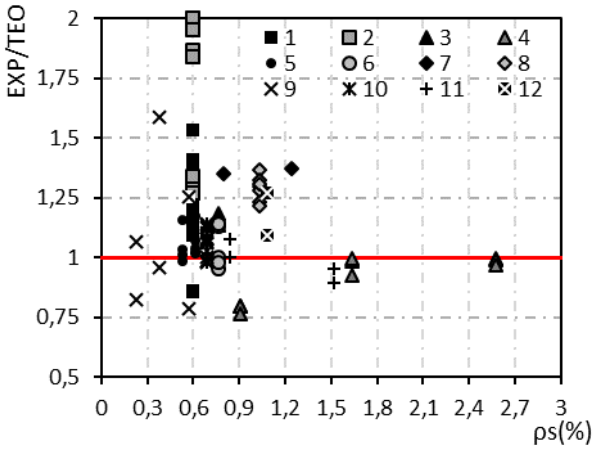
Autor	Nº de Vigas	Camadas	A_f	E_f	ε_{fu}
			(mm)	(Gpa)	(‰)
(1)	12	1-6	10-140	240	0,012-0,14
(2)	8	1-10	1,3-13,2	230	0,015
(3)	4	2-4	120	150	0,015
(4)	9	1-3	26,4-79,2	237	0,012
(5)	9	1-2	16,5-104	62-230	0,012-0,016
(6)	5	1-2	140-168	155-300	0,009-0,015
(7)	2	2	5,72	240	0,0125
(8)	7	3-6	50,5-101	110	0,006
(9)	6	1-3	13,4-40,3	158,8-240	0,015-0,017
(10)	14	1-2	8,25-16,5	230-235	0,015
(11)	4	1-2	13,3-26,6	235	0,01427
(12)	2	1	96	152	0,0151

4. RESULTADOS

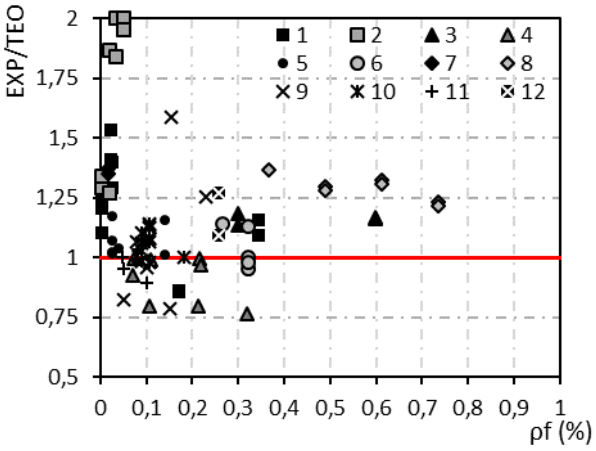
De forma a investigar o comportamento das vigas reforçadas à flexão com fibra de PRFC, comparou-se os resultados teóricos e experimentais de acordo com determinadas variáveis, como o número de camadas de reforço (ver Figura 6a), influência da taxa de armadura geométrica da viga (ver Figura 6b) e influência da taxa de fibras nas vigas (ver Figura 6c), este último parâmetro é determinado de forma análoga à taxa de armadura, com a área de fibras no lugar da área de aço.



a) Influência do número de camadas



b) Influência da taxa de armadura



c) Influência da taxa de fibra

Figura 6: Parâmetros que influenciam na resistência à flexão de vigas reforçadas com PRFC

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

De acordo com a Figura 6a, observa-se que para todas as vigas reforçadas com mais de três camadas de PRFC, os resultados foram considerados conservadores. Isso ocorre devido à formulação apresentada por Teng *et al* [9,10], que minora o limite de deformação da fibra para vigas com muitas camadas de reforço, sem levar em consideração a aderência e ancoragem das mesmas. Percebeu-se, por exemplo, que os dois espécimes ensaiados por Beber [13] que possuíam 10 camadas de reforço apresentaram um aumento na capacidade resistente de 200% em média, isto mostra que, apesar do grande número de camadas, houve uma transferência eficaz de esforços entre as camadas.

A partir da Figura 6b é possível dizer que o ACI 440-2R [6] tende a ser menos conservador com as vigas que possuem maiores taxas de armadura de flexão. Ainda é possível que as recomendações americanas apresentaram resultados contra à segurança, porém próximos dos experimentais, para as vigas com taxa de armadura maior que 1,5%.

A Figura 6c mostra que para taxas de fibra maiores que 0,35 % as estimativas americanas foram consideradas conservadoras, assim como para todas as vigas ensaiadas com taxa de fibra menor que 0,05% não houve nenhum valor contra a segurança. Porém vale ressaltar que o ACI 440-2R [6] não leva em consideração à taxa de fibra para as suas recomendações de dimensionamento.

A Figura 7 apresenta a distribuição dos resultados da relação entre a resistência experimental e teórica das vigas divididas em faixas, de forma a verificar o desempenho da norma americana, de acordo com a concentração de resultados em uma certa faixa.

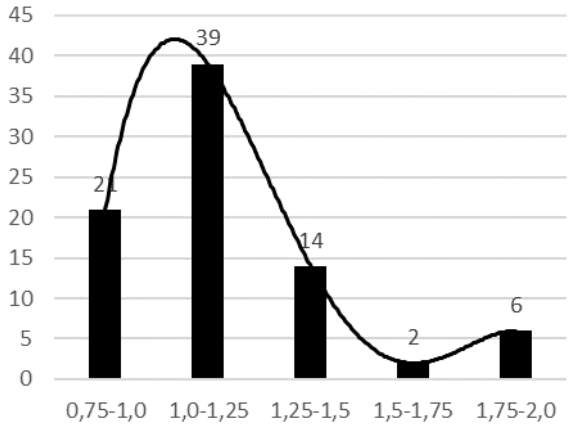
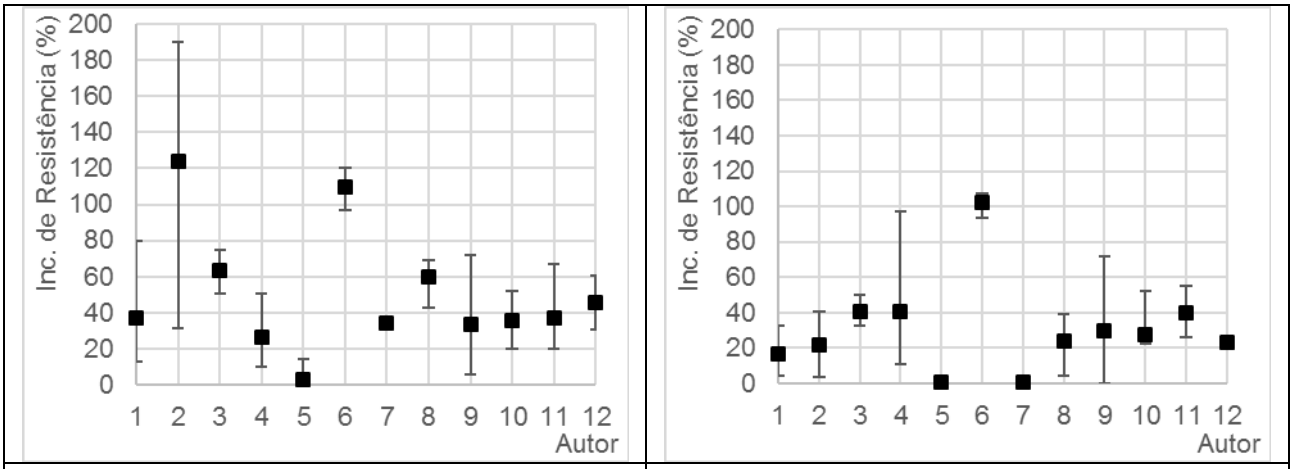


Figura 7 – Distribuição dos resultados

Escolheu-se faixas variando no valor de 0,25 cada, com o intuito de ter a primeira faixa valores contra à segurança, porém dentro do valor do coeficiente de segurança do ACI 440-R [6]. A partir da Figura 7, percebe-se que do total de 82 vigas ensaiadas, 21 apresentaram resultados contra à segurança, porém todas elas se encontravam dentro do coeficiente de seguranaça recomendado pelo documento americano. Verificou-se, também, que a maior concentração de resultados se encntra na segunda faixa, que inclui resultados a favor de segurança, sendo o maior valor 25% acima do valor ótimo, que é 1. As demais três faixas apresentam um distúrbio no comportamento normal, por conta das vigas ensaiadas por Beber [13] que possuíam muitas camadas de reforço e foram subestimadas pela norma americana.

Outra análise pertinente a ser apresentada é o aumento da capacidade resistente oferecida pelo reforço obtido nos ensaios experimentais (resistência experimental) e o obtido pelos métodos teóricos de estimativa de resistência (resistência teórica) conforme apresentado nas Figuras 8a e 8b respectivamente, onde apresentam o menor, médio e maior acréscimos. Os aumentos de resistência experimental foram aqueles informados pelos autores, ou seja, a comparação entre a resistência das vigas de referências e as reforçadas com PRFC, já o aumento de resistência teórica é aquele medido entre a resistência última experimental das vigas de referência e a estimada pelo ACI 440-2R [6] para as vigas reforçadas.



a) Incremento experimental | b) Incremento teórico

Figura 8: Incremento de resistência experimental x teórico

Os incrementos de resistência teóricos observados foram menores que os experimentais para os ensaios da maioria dos autores. Breña *et al* [16] obteve resultados onde não houve incremento de resistência em alguns modelos ensaiados, assim como teoricamente também não houve esse incremento pelo ACI 440-2R [6], enquanto que Shin e Lee [18] verificaram um incremento de resistência, porém não constatado pelas recomendações americanas. Beber [13] observou experimentalmente uma vasta variação de incrementos de resistência, porém de acordo com o código americano não houve tanta variação de resistência.

Ainda em relação à Figura 8, verificou-se que o incremento teórico das vigas ensaiadas por Esfahani *et al* [15] foi superior ao experimental, isso se dá pelo fato de que a vigas B2, B3 e B4 não atingiram sua capacidade máxima, uma vez que a primeira rompeu por descolamento da fibra, enquanto que as outras por destacamento do cobrimento de concreto. As vigas de Barros *et al* [20] são as em que o incremento de resistência teórica mais se aproxima do incremento experimental. De maneira resumida, a Tabela 4 apresenta uma análise estatística da relação entre os resultados experimentais e teóricos das vigas reforçadas analisadas.

Tabela 4: Resumo da relação entre resultados experimentais e teóricos

Vigas analisadas	82
Média dos resultados	1,16
Desvio padrão (%)	28
Coeficiente de variação (%)	23,7
Resultados contra à segurança (%)	25,6

5. CONCLUSÃO

Foi montado um banco de dados com resultados de 82 vigas reforçadas com mantas de fibra de carbono disponíveis na literatura, possibilitando realizar um estudo quantitativo e qualitativo acerca desta técnica, onde envolviam diversas variáveis que são levadas em conta no dimensionamento de reforço à flexão de vigas com PRFC.

Quanto à segurança, o ACI 440-2R [6] preza por evitar os modos de ruptura frágeis, como pode ser verificado nos resultados encontrados com vigas reforçadas com muitas camadas de PRFC, sendo este o principal motivo que leva vigas a rupturas frágeis, ressaltando a inviabilidade de reforços com muitas camadas e que, por isso, essa opção é pouco utilizada.

Apesar da equação proposta por Teng *et al* [9,10] minorar a capacidade resistente de vigas com muitas camadas de reforço, ela não leva em conta a qualidade da ancoragem da fibra de carbono à viga, o que levou a subestimar a resistência das vigas ensaiadas por Beber [13] que possuíam 10 camadas de fibra de carbono, como verificado nos pontos encontrados nos gráficos de dispersão, bem como na curva apresentada na Figura 7, que apresenta mudança de comportamento nas últimas faixas devido a estas peças. Vale ressaltar também que a falha na aderência leva à considerações contra à segurança, como verificado em algumas vigas de Esfahani *et al* [15], que concentram a maior

parte dos resultados contra à segurança verificados pelo ACI 440-2R [6], sendo que de todos os casos em que houveram resultados contra à segurança, o coeficiente de segurança da norma americana seria capaz de cobrir esta diferença..

De maneira geral, é possível concluir que a recomendações americanas são conservadoras, porém podem ser bem aplicadas ao projeto de reforço à flexão de vigas, uma vez que se trabalha com diversas incertezas em um reforço estrutural. A segurança das recomendações se justifica na pequena quantidade de resultados contra à segurança apresentados, sendo que estes se aproximam dos valores experimentais aos quais foram comparados, ratificando a viabilidade da utilização do ACI 440-2R [6].

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao pelo apoio a esta e a outras pesquisas à: Universidade Federal do Pará (UFPA); ao Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE); ao Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada (NUMEA); ao Campus de Tucuruí; à Eletronorte; e às Agências de fomento CNPq, CAPES e FAPESPA.

7. REFERÊNCIAS

[1] TOUTANJI *et al.* "Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix", *Engineering Structures*, V. 28, 2006, pp 557-566.
[2] Strategic Development Council. A Vision for the Concrete Repair, Protection and Strengthening Industry. Vision 2020, Baltimore, 2006.
[3] BEEBY, A.W.; ETMAN, E. *Repair of reinforced concrete beams with corroded reinforcement using CFRP plates*. International Conference Structural Faults and Repair, London, 1999.
[4] YAMAGUCHI *et al*. *Creep Rupture of FRP Rods Made of Aramid, Carbon and Glass Fibers*. Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, pp 179-186, 2001.
[5] TENG *et al*. FRP-strengthened RC structures. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley and Sons, 2002.
[6] ACI Committee 440-2R. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, Detroit, 2015.
[7] BILOTTA *et al*. "Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence", *Composite Structures*, V. 124, 2015, pp 163-175.
[8] ALAM, M. A.; JUMAAT, M. Z. "Eliminating Premature End Peeling of Flexurally Strengthened Reinforced Concrete Beams", *Journal of Applied Sciences*, V. 9, 2009, pp 1106-1113.
[9] TENG *et al.* "Intermediate Crack Induced Debonding in RC Beams and Slabs"**,** *Construction and Building Materials*, V. 17, 2001, pp 447-462.
[10] TENG *et al. Recent Research on Intermediate Crack Induced Debonding in FRP Strengthened Beams*. Proceedings of 4th International Conference on Advanced Composite Materials for Bridges and Structures, Calgary, 2004.
[11] ACI Committee 318-M, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2014.
[12] BEBER *et al. Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com compósitos de fibra de carbono*. V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo, 2003.
[13] BEBER, A.J. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
[14] DAVID *et al. "*Experimental analysis of flexural behavior of externally bonded CFRP reinforced concrete structures"**,** *RILEM Materials and Structures*, V. 38, 2003, pp 238-241.
[15] ESFAHANI *et al. "*Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets", *Engineering Structures*, V. 29, 2007, 2428-2444.
[16] BREÑA *et al. "*Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite", *ACI Structural Journal*, V. 100, 2003, pp 36-46.
[17] RUSINOWSKI *et al. Peeling Failure at the Cut-Off End of CFRP Strengthened RC Beams***.** Proceedings of the 9th International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, Sydney, 2009.
[18] SHIN, Y.; LEE, C. "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates at Different Levels of Sustaining Load"**,** *ACI Structural Journal*, V. 100, 2003, pp 231-239.
[19] TOUTANJI *et al.* Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. Engineering Structures, V. 28, 2006, pp 557-566.

[20] GAMINO, A.L. Modelagem física e computacional de estruturas de concreto reforçadas com CFPR. Tese de doutorado. Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
[21] BARROS *et al.* "Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams", *Cement and Concrete Composites*, V. 29, 2007, pp 203-217.
[22] ZHANG *et al.* "Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates", *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, V. 7, 2006, pp. 436-444.
[23] SPADEA *et al.* "Optimizing the performance characteristics of beams strengthened with bonded CFRP laminates", *RILEM Materials and Structures*, V. 33, pp 119-126.