

Influência da ancoragem na resistência à flexão de vigas reforçadas com mantas de PRFC

M. P. Ferreira^{1*} , M. H. Oliveira² , A. F. Lima Neto³ , L. S. Tapajós⁴ ,
A. J. C. Nascimento⁵ , M. C. Freire³ 

* Autor de Contato: mpinaf@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.269>

Recepção: 29/09/2017A | Aceitação: 18/10/2018 | Publicação: 30/12/2018

RESUMO

Buscando avaliar a influência da ancoragem na resistência à flexão de vigas reforçadas com mantas de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC), foram analisados os resultados experimentais de 126 ensaios presentes na literatura e de uma série inédita, ensaiada pelos autores, com 4 vigas de concreto armado. São avaliados os parâmetros que afetam o desempenho e a resistência das vigas, e discutidos os critérios de dimensionamento do *fib* Bulletin 14 (2001) e ACI 440-2R (2008). Observou-se que, mesmo com dispositivos auxiliares na ancoragem do PRFC, falhas prematuras são possíveis, e também que ambas as recomendações teóricas conduzem a estimativas a favor da segurança, porém excessivamente conservadoras nos casos onde a ancoragem da manta de PRFC é feita adequadamente.

Palavras-chave: concreto armado; reforço à flexão; mantas de PRFC; ancoragem.

Citar como: M. P. Ferreira, M. H. Oliveira, A. F. Lima Neto, L. S. Tapajós, A. Nascimento, M. C. Freire (2018), "Influência da Ancoragem na Resistência à Flexão de Vigas Reforçadas com Mantas de PRFC", Revista ALCONPAT, 9 (1), pp. 30 – 47, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.269>

¹ Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil.

² Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

³ Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, Brasil.

⁴ Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Oeste do Pará, Itaituba, Brasil

⁵ Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo, No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2019.

Influence of anchorage on flexural strength of beams strengthened with CFRP sheets

ABSTRACT

In order to evaluate the influence of anchorage on the flexural strength of beams strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheets, the experimental results of 126 tests in the literature and of an unprecedented series with 4 reinforced concrete beams, tested by these authors, were analyzed. The parameters affecting the performance and the strength of the beams are evaluated, and the design criteria of *fib* Bulletin 14 (2001) and ACI 440-2R (2008) are discussed. It was observed that, even with auxiliary devices in the PRFC anchorage, premature failure is possible, and also that both theoretical recommendations lead to safe estimates, but excessively conservative in cases where the anchorage of the PRFC sheet is properly done.

Keywords: reinforced concrete; flexural strengthening; CFRP sheets; anchorage.

Influencia del anclaje en la resistencia a la flexión de vigas reforzadas con mantas de PRFC

RESUMEN

Buscando evaluar la influencia del anclaje en la resistencia a la flexión de vigas reforzadas con mantas de Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (PRFC), se analizaron los resultados experimentales de 126 ensayos presentes en la literatura y de una serie inédita de los autores, con 4 vigas de hormigón armado. Se evalúan los parámetros que afectan desempeño y resistencia de vigas, y se discuten los criterios de dimensionamiento del *fib* Bulletin 14 (2001) y ACI 440-2R (2008). Se observó que, incluso con dispositivos auxiliares en el anclaje del PRFC, fallos prematuros son posibles, y que ambas recomendaciones conducen a estimaciones seguras, pero excesivamente conservadoras en los casos en que el anclaje de la manta de PRFC se realice adecuadamente..

Palabras clave: hormigón armado; refuerzo de la flexión; mantas de PRFC; fondeadero.

LISTA DE NOMENCLATURAS

a	– vão de cisalhamento	f_s	– tensão no aço da armadura tracionada
b_f	– largura da camada de PRFC	f_s'	– tensão no aço da armadura comprimida
b_w	– largura da viga	f_{ys}	– tensão de escoamento da armadura tracionada
c	– altura do bloco de compressão retangular equivalente do concreto	f_{ys}'	– tensão de escoamento da armadura comprimida
c_1	– fator obtido através de calibração de resultados (igual a 0,64 para PRFC)	h	– altura da viga
d	– altura útil da viga	k_b	– fator geométrico
d'	– posição do centroide da armadura comprimida	k_c	– constante que leva em consideração a compactação do concreto durante a concretagem
f_c	– resistência à compressão do concreto	l_b	– comprimento de ancoragem da manta de PRFC
f_{ctm}	– resistência à tração média do concreto	l	– largura do grampeamento
f_{fe}	– tensão efetiva do PRFC	n	– número de camadas de PRFC

t_f	– espessura do PRFC	T_s	– componente de tração devido à armadura tracionada
x	– posição da linha neutra	α	– coeficiente de redução devido à propagação de fissuras inclinadas
A_f	– área do reforço aplicado na viga	β_1	– coeficiente que determina a aproximação da curva resultante de compressão do concreto a um retângulo, segundo as recomendações do ACI 440-2R (2008)
A_s	– área de aço da armadura tracionada	ε_{bi}	– deformação encontrada no cobrimento da armadura de tração na viga antes do reforço
A_s'	– área de aço da armadura comprimida	ε_c	– deformação do concreto
C_C	– componente de compressão devido à parcela do concreto	ε_{cu}	– deformação última do concreto
C_S	– componente de compressão devido à armadura comprimida	ε_f	– deformação da fibra de carbono
E_f	– módulo de elasticidade do PRFC	ε_{fd}	– valor limite de deformação da fibra a ser adotado no dimensionamento e verificação do reforço
E_s	– módulo de elasticidade do aço	ε_{fe}	– deformação efetiva no PRFC
F_{cc}	– resultante de compressão	ε_{fu}	– deformação última observada no polímero no momento da ruptura
L	– comprimento total da viga	ε_s	– deformação da armadura tracionada
M	– momento aplicado durante o ensaio experimental	ε_s'	– deformação da armadura comprimida
M_R	– momento resistente na seção transversal da viga	ε_{ys}	– deformação de escoamento da armadura de flexão
$M_{R\text{te0}}$	– momento resistente estimado pelas recomendações	r	– taxa de armadura da viga antes do reforço
M_u	– momento último experimental	r_r	– taxa de armadura da viga após o reforço
M_{ACI}	– momento último segundo as recomendações do ACI 440-2R (2008)	\emptyset	– diâmetro da barra das armaduras
M_{fib}	– momento último segundo as recomendações do <i>fib</i> Bulletin 14 (2001)	ψ	– coeficiente que determina a aproximação da curva resultante de compressão do concreto a um retângulo, segundo as recomendações do <i>fib</i> Bulletin 14 (2001)
M_{V1}	– momento último experimental da viga V1		
$N_{fa,max}$	– força máxima que pode ser aplicada ao reforço da viga		
P	– carga aplicada no ensaio experimental		
R^2	– coeficiente de correlação dos resultados		
T_f	– componente de tração devido à parcela do reforço com fibra		

1. INTRODUÇÃO

Dentre as técnicas utilizadas para o reforço de estruturas de concreto armado, destacam-se os sistemas que empregam Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), por apresentarem baixo peso e elevada resistência à tração e à corrosão, sendo que os Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) têm mostrado expressiva aceitação por mais de duas décadas devido aos seus altos valores de resistência, rigidez e durabilidade, além da facilidade de instalação, quando comparados com outros tipos de fibras (Monti and Liotta, 2007). No caso específico do reforço à flexão de vigas de concreto armado, diversas pesquisas mostram que o uso de mantas de PRFC é uma metodologia

eficaz, destacando-se os trabalhos de Rafi *et al.* (2008), Khan and Fareed (2014) e Hawileh *et al.* (2015).

No entanto, é importante destacar que rupturas prematuras estão associadas ao seu uso. No caso de vigas reforçadas à flexão, essa ruptura frágil pode ocorrer devido ao descolamento da fibra de carbono em relação ao substrato de concreto, o que pode limitar o incremento de resistência proporcionado pelo reforço. Esse modo de ruína frágil está normalmente associado à deficiência na ancoragem do sistema de reforço, o que torna o uso de dispositivos adicionais recomendável, tal qual o grampeamento com faixas de manta de PRFC (ver Benjeddou *et al.*, 2007; Dong *et al.*, 2011; Kim and Shin, 2011, dentre outros).

Este trabalho apresenta uma série de ensaios experimentais em vigas de concreto armado reforçadas com mantas de PRFC, realizada com o objetivo de avaliar a influência da ancoragem no desempenho estrutural do reforço. Além disso, foi montado um amplo banco de dados, com resultados experimentais selecionados de trabalhos de diferentes autores. Esta base de dados é utilizada para discutir a influência de diferentes parâmetros no desempenho do reforço com mantas de PRFC e para avaliar o desempenho das previsões teóricas de resistência obtidas utilizando-se as recomendações apresentadas pelo ACI 440-2R (2008) e *fib* Bulletin 14 (2001).

2. VIGAS REFORÇADAS COM PRFC

2.1 Modos de ruptura

Teng *et al.* (2003) afirmam que vigas reforçadas à flexão com mantas de PRFC podem apresentar modos de ruína frágeis, como por exemplo: por esgotamento da capacidade resistente do PRFC (ver Figura 1a); descolamento do reforço na interface com o concreto (ver Figura 1b); e destacamento do reforço junto com o cobrimento de concreto da armadura de flexão (ver Figura 3c). A ruptura da manta de PRFC pode ocorrer em vigas fracamente armadas quanto à flexão, sendo um modo de ruína frágil uma vez que o PRFC apresenta comportamento linear-elástico até a ruptura. O descolamento da manta pode ocorrer por deficiência da ancoragem do reforço, por fissuração excessiva da viga ou, ainda, por falhas no seu processo de colagem. Já o destacamento da camada de cobrimento de concreto pode ser provocado por tensões cisalhantes na interface entre concreto e PRFC, devido à diferença entre os módulos de elasticidade destes materiais, podendo ser amplificado pela corrosão das armaduras de flexão.

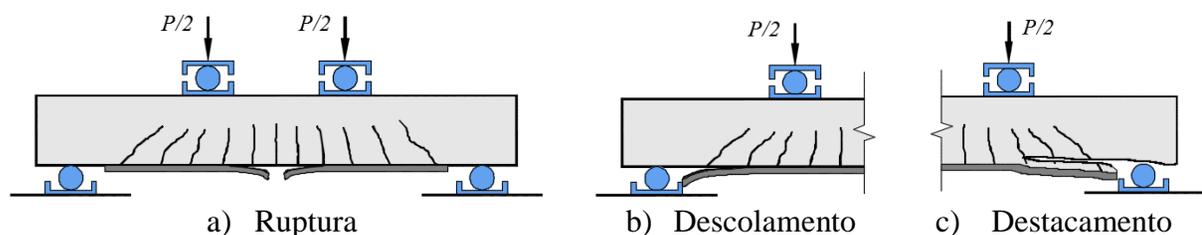


Figura 1. Modos de ruptura em vigas reforçadas à flexão com PRFC.

2.2 Resistência à flexão

O comportamento de uma viga de concreto armado reforçada com PRFC e submetida à flexão pode ser expresso conforme o diagrama da Figura 2. Nesta análise, considera-se que a taxa de armadura da viga reforçada é equivalente à somatória da taxa de armadura inicial com a contribuição proveniente do reforço, como apresentado em (1).

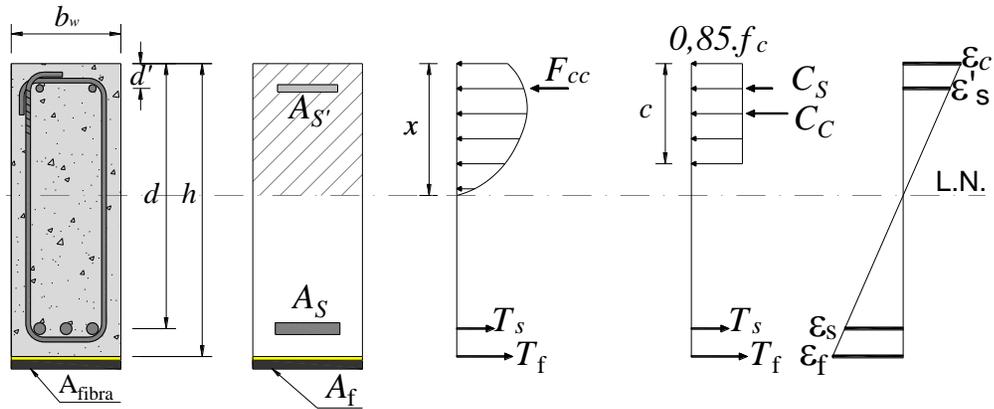


Figura 2. Diagrama tensão-deformação de uma viga reforçada com PRFC.

$$\rho_r = \rho + \frac{A_f \cdot E_f}{b_w \cdot h \cdot E_s} \quad (1)$$

Onde: ρ é a taxa de armadura da viga antes do reforço; A_f é a área do reforço aplicado na viga; E_f é o módulo de elasticidade do PRFC; E_s é o módulo de elasticidade do aço; b_w é a largura da viga; h é a altura da viga.

2.2.1 ACI 440-2R (2008)

A norma norte-americana ACI 440-2R (2008) apresenta recomendações para o dimensionamento de reforço utilizando PRFC. Para determinar a resistência à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de fibra de carbono, utilizam-se (2) - (10).

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} < 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{h-x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (3)$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (4)$$

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{x-d'}{x} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{fe} \cdot \left(\frac{d-x}{h-x} \right) \quad (6)$$

$$f_s' = E_s \cdot \varepsilon_s' \leq f_{ys}' \quad (7)$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_{ys} \quad (8)$$

$$x = \frac{(A_s \cdot f_s) + (A_f \cdot f_{fe}) - (A_s' \cdot f_s')}{\beta_1 \cdot 0,85 \cdot f_c \cdot b_w} \quad (9)$$

$$M_R = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + 0,85 \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \cdot \left(\frac{\beta_1 \cdot x}{2} - d' \right) \quad (10)$$

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; n é o número de camadas de PRFC; t_f é a espessura do PRFC; ε_{fu} é a deformação última observada no polímero no momento da ruptura; ε_{fe} é a deformação efetiva no PRFC; x é a posição da linha neutra; ε_{bi} é a deformação encontrada no cobrimento da armadura de tração na viga antes do reforço; f_{fe} é a tensão efetiva do PRFC; d é a altura útil da viga; ε_s' é a deformação na armadura comprimida; f_s' é a tensão do aço da armadura comprimida; d' é a posição do centroide da armadura comprimida; ε_s é a deformação na armadura tracionada; f_s é a tensão no aço da armadura tracionada; A_s é a área de aço da armadura tracionada; A_s' é a área de aço da armadura comprimida; β_1 é um coeficiente que determina a aproximação da curva da resultante de compressão do concreto a um retângulo, sendo 0,85 para concretos com valores de f_c menores que 28 MPa e havendo um decréscimo linear de 0,05 para cada 7 MPa acima desse limite de tensão, sendo que o valor mínimo para tal coeficiente, de acordo com ACI 318 (2014), é de 0,65; M_R é o momento resistente na seção transversal da viga.

2.2.2 fib Bulletin 14 (2001)

O *fib Bulletin 14 (2001)* traz recomendações para o dimensionamento de vigas reforçadas à flexão com PRFC e adota uma filosofia de cálculo similar à adotada pelo ACI 440-2R (2008). As mesmas equações apresentadas pelo ACI são utilizadas neste documento, diferenciando-se apenas os seguintes parâmetros: o coeficiente β_1 nela é chamado de ψ e equivale a 0,8, independente da classe de resistência do concreto; e o limite de deformação da fibra, que é calculado por (11), cujos parâmetros são encontrados por meio de (12) - (14).

$$\varepsilon_{fd} = \frac{N_{fa,max}}{E_f \cdot A_f} \quad (11)$$

$$N_{fa,max} = \alpha \cdot c_1 \cdot k_c \cdot k_b \cdot b_w \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}} \quad (12)$$

$$k_b = 1,06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b_w}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (13)$$

$$f_{ctm} = 0,33 \cdot \sqrt{f_c} \quad (14)$$

Onde: $N_{fa,max}$ é a força máxima que pode ser aplicada ao reforço da viga (expressa em N); α é um coeficiente de redução devido à propagação de fissuras inclinadas, adotado como 0,9; c_1 é igual a 0,64; k_c é uma constante que leva em consideração a compactação do concreto durante a concretagem, sendo esse valor igual a 1 quando o reforço é aplicado na face inferior da viga e 0,67 na face superior; k_b é um fator geométrico; f_{ctm} é a resistência à tração média do concreto, adotada segundo expresso no Eurocode 2 (2004); b_f é a largura da camada de PRFC.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Características das vigas

Foram realizados ensaios em 4 vigas de concreto armado reforçadas com mantas de PRFC, tendo como variáveis o comprimento de ancoragem da manta e a largura do grampeamento, a fim de avaliar sua influência tanto no desempenho quanto na resistência das vigas. Foi ensaiada 1 viga de referência sem reforço e 3 vigas reforçadas com manta de fibra de carbono. As taxas de armadura de aço e PRFC foram mantidas constantes. A Tabela 1 e a Figura 3 apresentam as principais características das vigas. As deformações nas armaduras de flexão, na manta de reforço e no grampeamento foram monitoradas com extensômetros elétricos, como mostra a Figura 4. Já a Figura 5 ilustra o sistema de ensaio das vigas.

Tabela 1. Características das vigas ensaiadas.

Viga	l (mm)	l_b (mm)	b_f (mm)	A_f (mm ²)	t_f (mm)	E_f (GPa)	ϵ_{fu} (%)
V1	-	-	-	-	-	-	-
V2	100	285	120	19,92	0,166	230	2,1
V3		385					
V4	150						

$b_w = 120$ mm; $h = 200$ mm; $d = 166$ mm; $A_s = 101$ mm²; $f_c = 20$ MPa; $a = 400$ mm

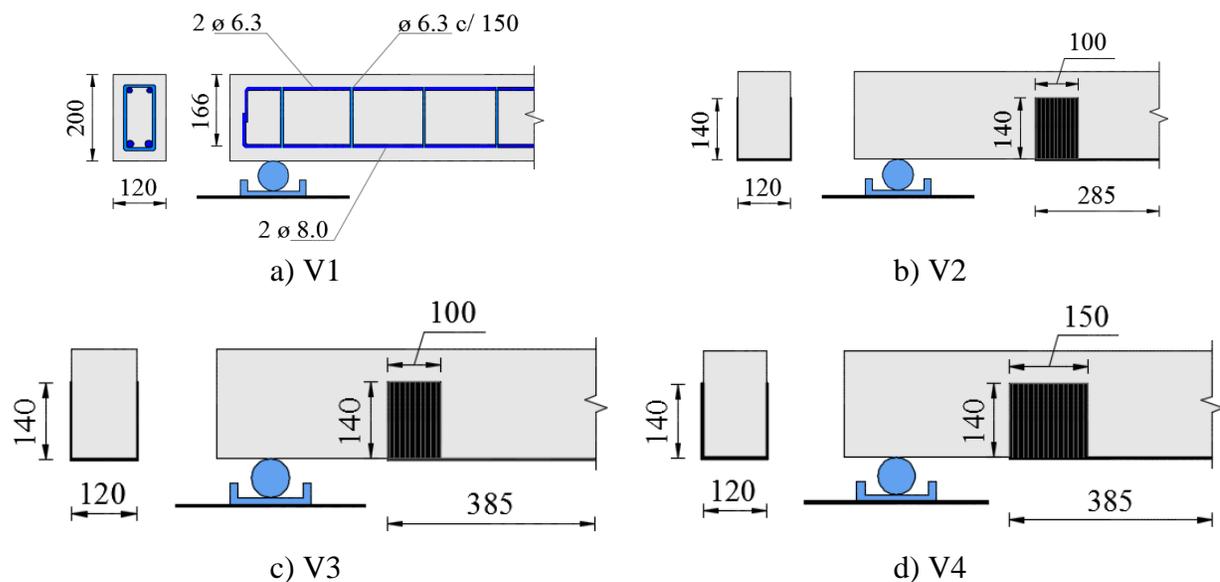


Figura 3. Características das vigas ensaiadas.

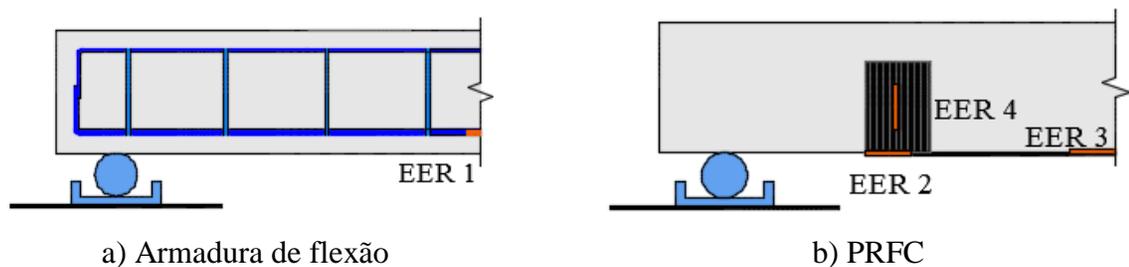


Figura 4. Instrumentação das vigas.

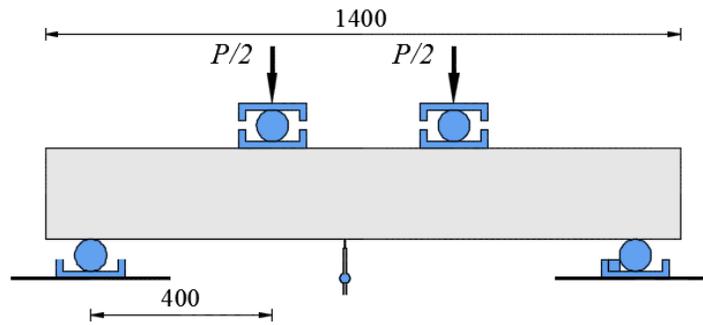


Figura 5. Sistema de ensaio das vigas.

3.2 Discussão dos Resultados

O modo de ruptura de cada uma das vigas ensaiadas pode ser visualizado na Figura 6. Observou-se que a viga de referência rompeu por flexão após sua armadura longitudinal atingir altos níveis de deformação (Figura 6a). Na viga V2 ocorreu o arrancamento do concreto na zona adjacente ao grampeamento (Figura 6b). A viga V3 perdeu sua capacidade resistente após ocorrer o descolamento da fibra em parte da zona de contato com o grampeamento (Figura 6c). Já a viga V4 rompeu após o destacamento do cobrimento do concreto na região do vão de flexão (Figura 6d).

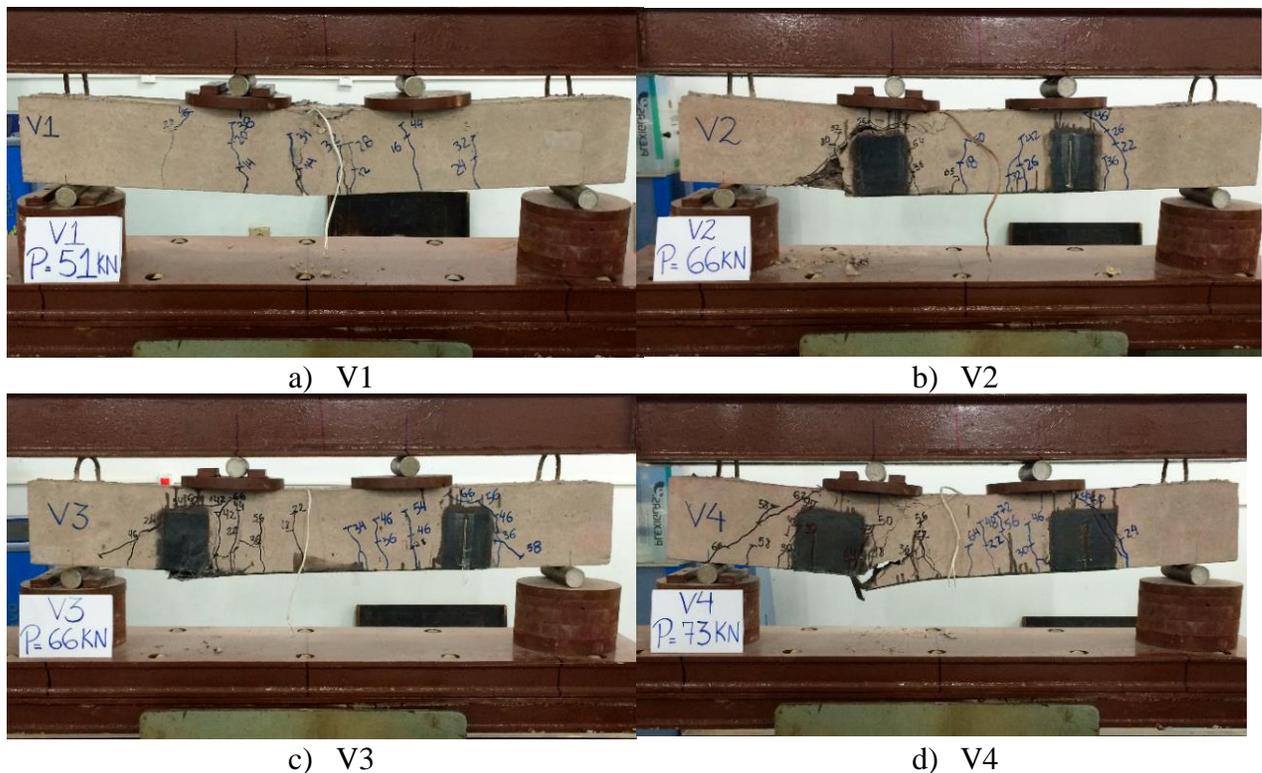


Figura 6. Superfície de ruptura das vigas ensaiadas.

A Figura 7 apresenta os resultados de deformações medidos nas armaduras de flexão e em diferentes pontos do PRFC. Percebe-se que, em todas as vigas, as armaduras de flexão atingiram o escoamento, como mostra a Figura 7a. As deformações na armadura de flexão foram menores nas vigas com a manta de PRFC para os mesmos níveis de carregamento, pois o reforço contribuiu na parte tracionada da peça. Além disso, destaca-se que o comportamento resistente das vigas com a manta foi mais frágil que o da viga sem reforço, uma vez que após atingir a resistência máxima, as leituras foram interrompidas pela falha da peça, enquanto que na viga V1, ao se alcançar a carga máxima, esse nível de carregamento permaneceu associado a um alto nível de deformação.

Na Figura 7b, observa-se que tanto o comprimento de ancoragem da fibra quanto a largura do grampeamento influenciaram na deformação última do PRFC medido nos ensaios, variando-se de 3,5‰ para a viga V2 até aproximadamente 4,2‰ para as vigas V3 e V4. Em todos os casos, deve-se destacar que estes são valores superiores aos previstos de forma teórica pelo ACI, que seriam de 1,9‰. Deve-se ressaltar ainda que em nenhuma das vigas rompeu com o esgotamento da resistência à tração da manta de PRFC. A Figura 7c mostra que em todas as vigas o nível de deformação na extremidade do reforço foi menor do que o medido no meio do vão, onde o momento é máximo e que a no caso da viga V2, que rompeu por descolamento da fibra nesta região, o limite de deformação medido foi praticamente o mesmo que o sugerido pelo fabricante, de 2,1‰. Já na Figura 7d é possível perceber que o nível de deformação desenvolvido na região do grampeamento foi pequeno e que na viga V3 ele claramente começa a descolar antes da ruína.

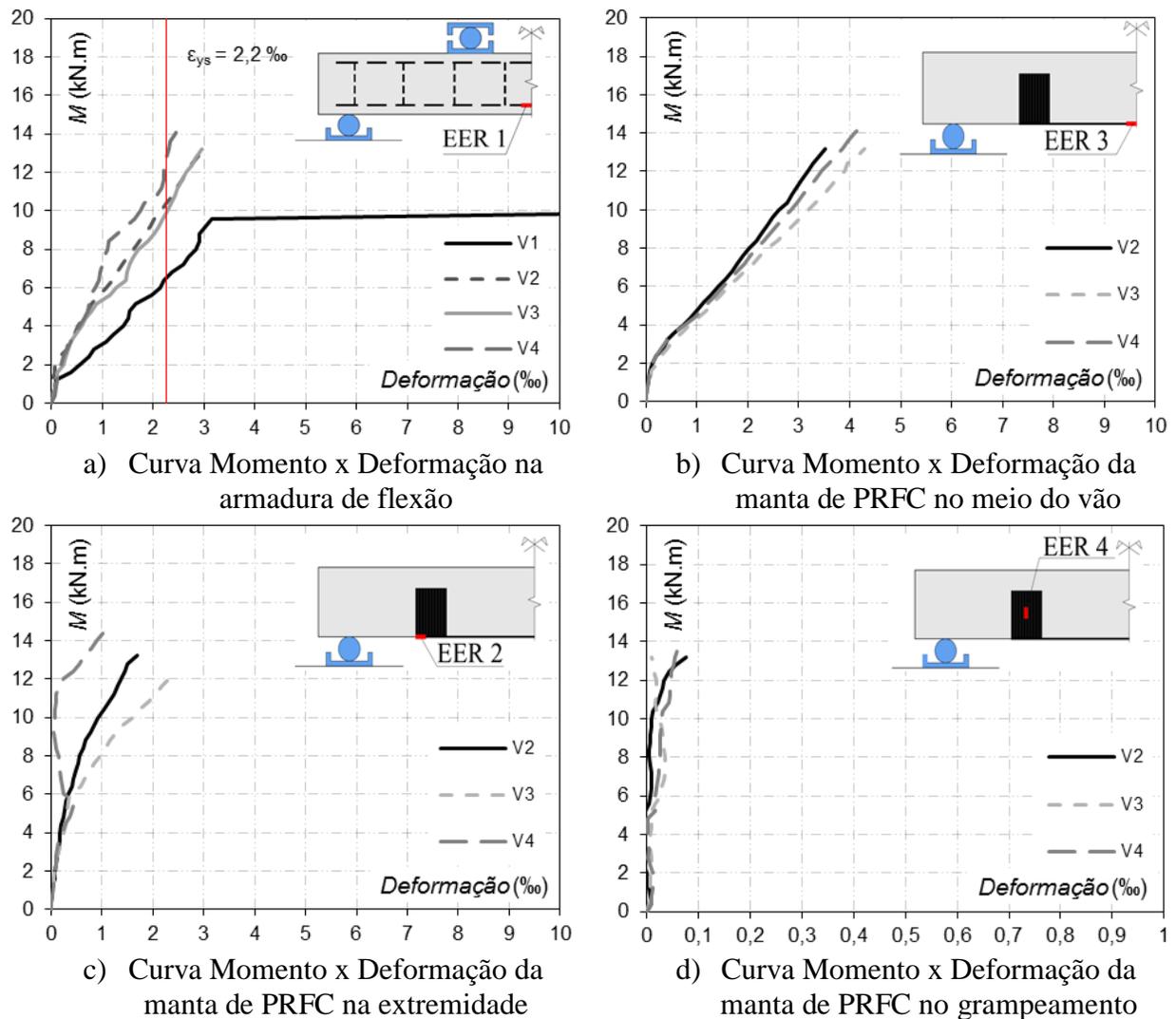


Figura 7. Resultados dos ensaios nas vigas.

A Figura 8 apresenta a curva de deslocamentos verticais das vigas, medidos no meio do vão. É possível perceber que as vigas reforçadas apresentaram resposta muito similar entre si, demonstrando maior rigidez que a viga de referência, a qual rompeu de forma dúctil por flexão e mostrando grandes deslocamentos ao atingir o momento de escoamento de suas armaduras de flexão. Como visto, todas as vigas reforçadas romperam de forma brusca, com a falha ocorrendo em diferentes regiões do PRFC.

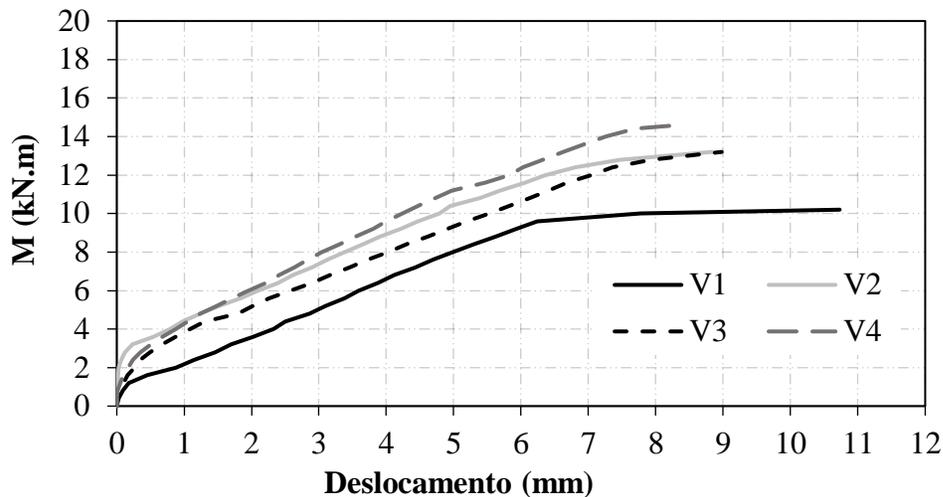


Figura 8. Curvas momento-deslocamento das vigas ensaiadas.

A Tabela 2 apresenta as cargas últimas das vigas ensaiadas e compara a resistência das vigas reforçadas com manta de PRFC com a da viga de referência (V1), a fim de determinar o incremento de resistência gerado pelo reforço. Além disso, a resistência experimental das vigas é comparada com estimativas teóricas obtidas seguindo as recomendações do ACI e do *fib*14. A partir desses resultados, observou-se que o aumento do comprimento de ancoragem da viga V3 em relação à viga V2 não resultou em aumento de resistência, e que foi o aumento da largura do grampeamento o responsável pela maior resistência da viga V4 em relação à viga V3. Também foi observado que o uso do ACI resultaria em previsões de resistência contra a segurança para as vigas V2 e V3, enquanto que o *fib* 14 apresentou resultados a favor da segurança.

Tabela 2. Cargas últimas das vigas.

Viga	M_u (kN.m)	M_u / M_{V1}	M_u / M_{ACI}	M_u / M_{fib}
V1	10,2	1,00	-	-
V2	13,2	1,29	0,94	1,14
V3	13,2	1,29	0,94	1,14
V4	14,6	1,43	1,04	1,26

4. BANCO DE DADOS

4.1 Metodologia de coleta e análise de dados

Em complemento ao programa experimental, foi coletado um banco de dados com os resultados de 126 ensaios de 20 autores, envolvendo vigas reforçadas à flexão com manta de PRFC. Como critério de escolha das vigas, foram selecionadas apenas as que romperam por flexão, sem carregamento inicial e com reforço colado externamente. O objetivo dessa análise de dados é avaliar a influência das principais variáveis na resistência à flexão de vigas reforçadas com PRFC. A análise do banco de dados envolve a comparação dos resultados experimentais com as estimativas teóricas obtidas usando-se o ACI e o *fib* 14. Assim, foram calculados os valores de média, coeficiente de variação e desvio-padrão da razão entre o momento último experimental e o momento resistente teórico (M_u/M_{Rteo}), e por fim, avaliou-se o percentual de resultados contra a segurança ($M_u/M_{Rteo} < 1$). Para avaliar a precisão dos modelos teóricos, são apresentados gráficos que confrontam o momento de ruptura experimental (M_u) em função do momento resistente previsto (M_{Rteo}), com o objetivo de analisar se a tendência dos resultados obtidos se aproxima da condição ideal ($M_u=M_{Rteo}$).

Como verificado anteriormente, o desempenho do reforço com manta de PRFC está diretamente relacionado à qualidade da ancoragem da fibra ao concreto. Portanto, as vigas do banco de dados foram divididas em 3 grupos: o grupo 1 para as situações em que a colagem da manta se estendia do centro da viga até o apoio ou além; o grupo 2 com vigas em que a colagem da manta não se estendia até o apoio; e o grupo 3 com vigas em que foram utilizados dispositivos externos para auxiliar na ancoragem do reforço, como parafusos ou gravatas. Ressalta-se que esse tipo de ancoragem é considerado por diversos autores como o mais favorável para a ancoragem da manta de PRFC, contanto que o dispositivo seja feito deste mesmo material.

Outro método de avaliação utilizado foi o critério de Collins (2001), conhecido como *Demerit Points Classification – DPC*, no qual os valores de M_u/M_{Rteo} foram classificados em faixas que vão de “extremamente perigoso” a “extremamente conservador”, sendo o desempenho do modelo teórico definido como um número que resulta da soma dos produtos de M_u/M_{Rteo} por seu escore correspondente, segundo a classificação. A Tabela 3 apresenta um resumo das características das vigas do banco de dados, além da simbologia utilizada pelos autores para identificação das figuras. A Tabela 4 mostra um resumo das variáveis referentes ao reforço com manta de fibra de carbono das vigas do banco de dado. A Tabela 5 apresenta os parâmetros relacionados com o DPC de Collins (2001).

Por fim, foram feitos gráficos que relacionam a resistência experimental das vigas com a previsão de ruptura teórica (M_u/M_{Rteo}) em função do número de camadas de mantas de PRFC, bem como a taxa de armadura após o reforço em relação à inicial (ρ_r/ρ). O objetivo destes gráficos é analisar se as hipóteses adotadas pelos modelos teóricos apresentam correlação adequada com as evidências experimentais existentes.

Tabela 3. Características das vigas do banco de dados.

Autor	No. viga	b_w (mm)	h (mm)	d (mm)	a (mm)	A_s (mm ²)	f_{ys} (MPa)	f_c (MPa)
Beber (2003)	12	150	300	272	833	245	706	32
Beber <i>et al.</i> (2000)	8	120	250	219	783	157	565	33
David <i>et al.</i> (2003)	4	150	300	267	933	307	500	39
Esfahani <i>et al.</i> (2007)	6	150	200	164	600	402-626	350-406	24
Breña <i>et al.</i> (2003)	9	203	356-406	318-368	1065-1220	395	440	35-37
Rusinowski <i>et al.</i> (2009)	5	200	300	262	1300	402	527	64-70
Toutanji <i>et al.</i> (2006)	7	108	158	127	560	142	427	49
Barros <i>et al.</i> (2007)	6	120	170	141-145	300	39-99	627-788	44
Gamino (2007)	14	75	150	120	550	62	640	45
Zhang <i>et al.</i> (2006)	4	120	250	224	750	226-402	335	23
Spadea <i>et al.</i> (2000)	2	140	300	266	1800	402	435	30
Alagusundaramoorthy <i>et al.</i> (2003)	12	230	380	342	1830	981,75	414	31
Ferrari (2007)	3	170	350	300	950	254,4	548	35-38
Dias <i>et al.</i> (2002)	5	120	180	160	720	100,5	533	41
Balaguru e Kurtz (2001)	3	200	300	255	1000	258	447	47
Vieira <i>et al.</i> (2016)	8	120	245	220	800	157-245	500	44
Bilotta <i>et al.</i> (2015)	2	120	160	135	925	157	590	21
Garcez (2007)	2	150	300	270	950	245,4	578	41,4
Juvandes (1999)	9	75-150	150	130	605-650	14-226	192-507	20-45
Chahrour e Soudki (2005)	5	150	250	219	750	402,1	400	39

Tabela 4. Variáveis do reforço das vigas.

Autor	No. viga	No. Cam.	b_f (mm)	t_f (mm)	A_f (mm ²)	E_f (GPa)	e_{fu} (%)
Beber (2003)	12	1-6	50-150	0,1-1,4	10-140	240	12-14
Beber <i>et al.</i> (2000)	8	1-10	120	0,011	1,3-13,2	230	15
David <i>et al.</i> (2003)	4	2-4	50	1,2	120-240	150	15
Esfahani <i>et al.</i> (2007)	6	1-2	100-150	0,176	17,6-52,8	237	12
Breña <i>et al.</i> (2003)	9	1-2	50-100	0,165-1,2	16,5-104	62-230	12-16
Rusinowski <i>et al.</i> (2009)	5	1-2	50-120	1,4	140-168	155-300	9-15
Toutanji <i>et al.</i> (2006)	7	3-6	102	0,165	50,5-101	110	6
Barros <i>et al.</i> (2007)	6	1-3	9,6-80	0,1-1,4	13,4-40,3	158,8-240	15-17
Gamino (2007)	14	1-2	75	0,11-0,13	8,2-16,5	230-235	15
Zhang <i>et al.</i> (2006)	4	1-2	120	0,11	13,3-26,6	235	14,27
Spadea <i>et al.</i> (2000)	2	1	80	1,2	96	152	15,1
Alagusundaramoorthy <i>et al.</i> (2003)	12	1-3	76-203	1,4-4,7	36,4-975	48-228	11,5-15
Ferrari (2007)	3	1-3	16,5	0,17	2,8-8,4	50	13
Dias <i>et al.</i> (2002)	5	1-2	20-70	0,1-1,4	15,5-28	200-240	11-15
Balaguru e Kurtz (2001)	3	2-5	152	0,071	21,6-54	200	6
Vieira <i>et al.</i> (2016)	8	2-5	100	0,166	33,2-83	230	21
Bilotta <i>et al.</i> (2015)	2	1-2	40	1,4	56-112	171	12
Garcez (2007)	2	1-2	150	0,165	247-49	227	15
Juvandes (1999)	9	1	50	1,2	60	155	19
Chahrouh e Soudki (2005)	5	1	100	1,2	120	155	19

Tabela 5. Critério de Collins.

M_{exp}/M_{Rteo}	Classificação	Penalidade
< 0,50	Extremamente Perigoso	10
(0,50 - 0,65)	Perigoso	5
(0,65 - 0,85)	Baixa Segurança	2
(0,85 -1,15)	Segurança Adequada	0
(1,15 - 2,00)	Conservador	1
$\geq 2,00$	Extremamente Conservador	2

4.2 Discussão dos Resultados

A Figura 9 mostra os gráficos que confrontam a resistência experimental do banco de dados com as previsões teóricas, incluindo-se em vermelho os resultados experimentais dos ensaios desta pesquisa. Observou-se que os dois modelos teóricos apresentaram desempenho similar em relação à média dos resultados, porém com o *fib* 14 mostrando maior dispersão e maior percentual de resultados contra a segurança. Ainda, percebe-se que as vigas ensaiadas se encaixam bem na tendência de resultados observados para o universo mais amplo gerado pelo banco de dados.

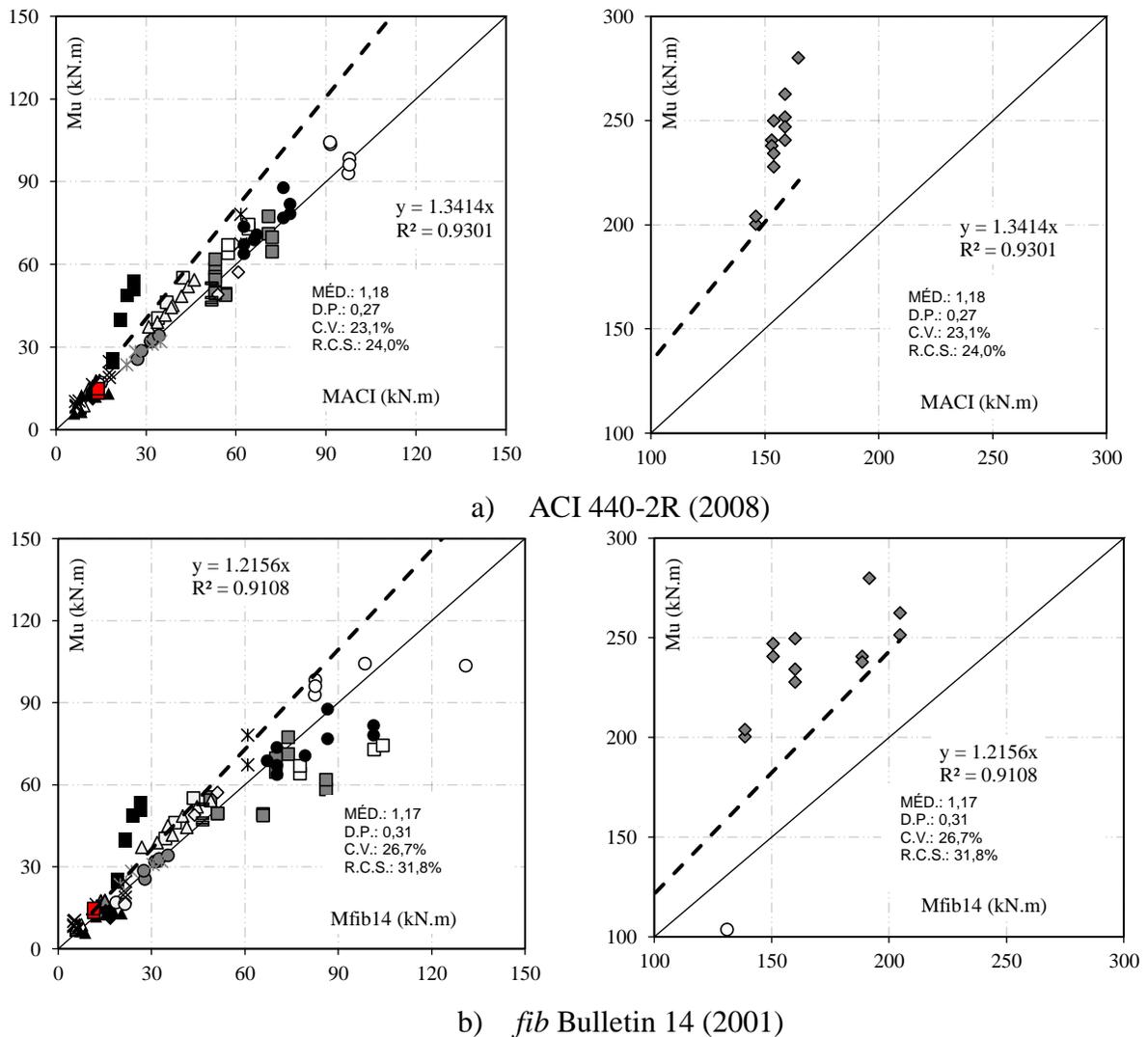


Figura 9. Análise da precisão dos modelos teóricos.

Para avaliar a influência do tipo de ancoragem do reforço com PRFC no desempenho das previsões teóricas, a Figura 10 divide os dados gerais apresentados na Figura 9, classificando-os por tipo de ancoragem em 3 grupos distintos. Para o grupo 1, o ACI apresentou uma média mais próxima de 1,0, bem como uma menor dispersão de resultados e aproximadamente o mesmo número de valores contra a segurança, quando comparado com o *fib* 14. No grupo 2, esse comportamento foi invertido, e o *fib* 14 apresentou menor média, mas ainda com maior dispersão e maior percentual de resultados contra a segurança. Para as vigas do grupo 3 os métodos teóricos apresentaram desempenho semelhante, com o ACI mostrando novamente menor dispersão.

Como visto, utilizando o critério de Collins (2001), é possível estabelecer pontuações para as duas recomendações, com base no espaço amostral do banco de dados coletado, conforme mostra a Figura 11. Observa-se que o ACI apresenta menor penalidade de acordo com o critério adotado.

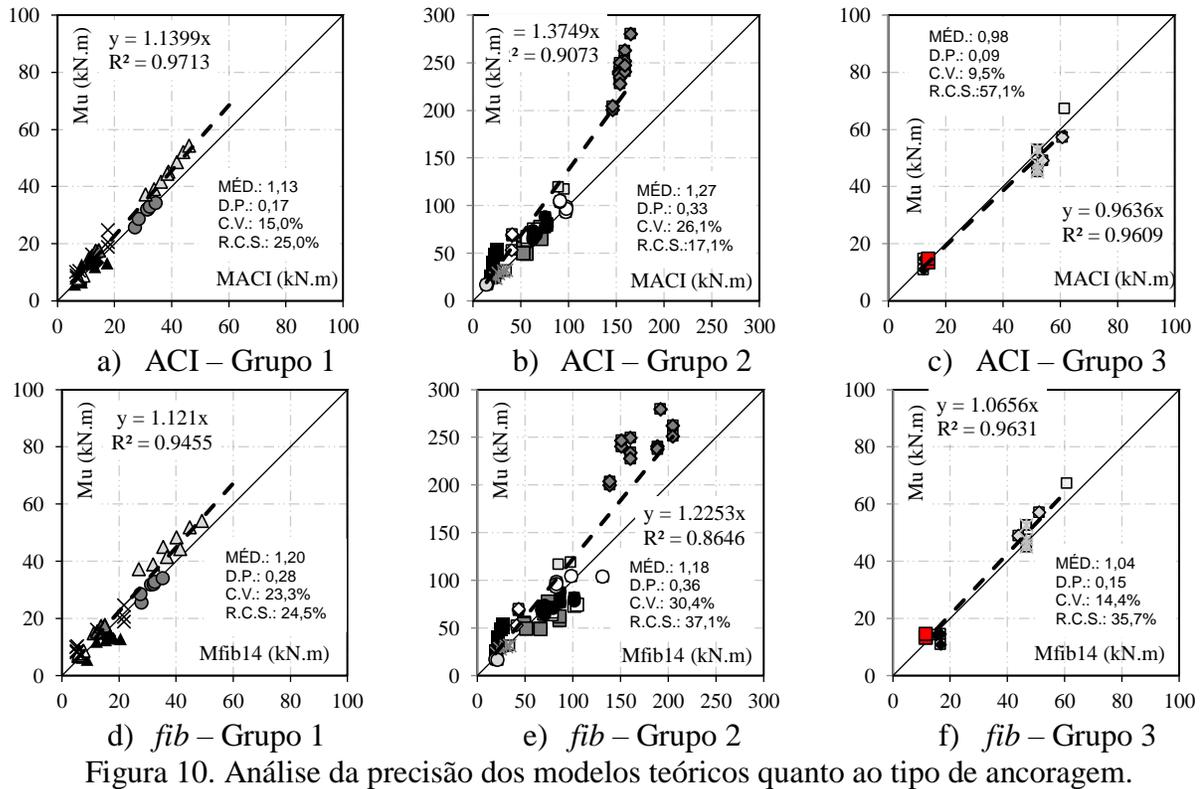
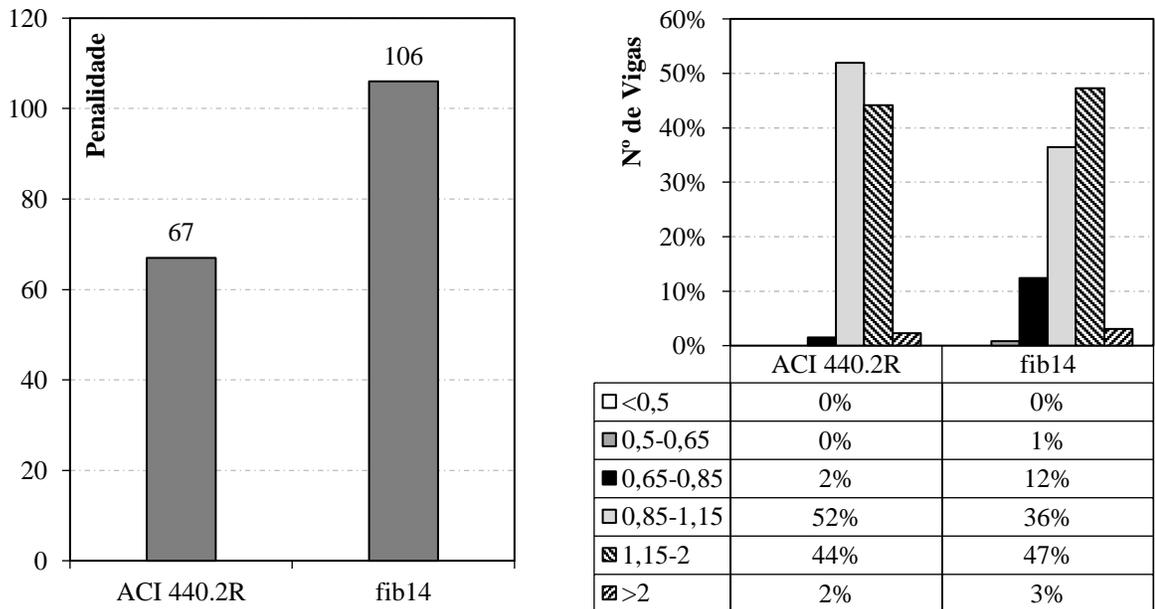


Figura 10. Análise da precisão dos modelos teóricos quanto ao tipo de ancoragem.



a) Penalidade de Collins aplicada b) Distribuição dos resultados das vigas
 Figura 11. Resultado do critério de Collins (2001).

A Figura 12 analisa a influência do número de camadas de PRFC tanto no desempenho do reforço quanto dos métodos teóricos. Percebe-se que há uma tendência de resultados mais conservadores conforme se aumenta a quantidade de camadas, o que é justificável pelo fato de que ambas as recomendações limitam a deformação do PRFC. Para o ACI, essa tendência é ligeiramente superior, uma vez que em sua equação é utilizado o número de camadas, o que penaliza a estimativa de resistência de vigas reforçadas com um número elevado de camadas. Em contrapartida, no *fib* 14 esse fator não é levado em consideração.

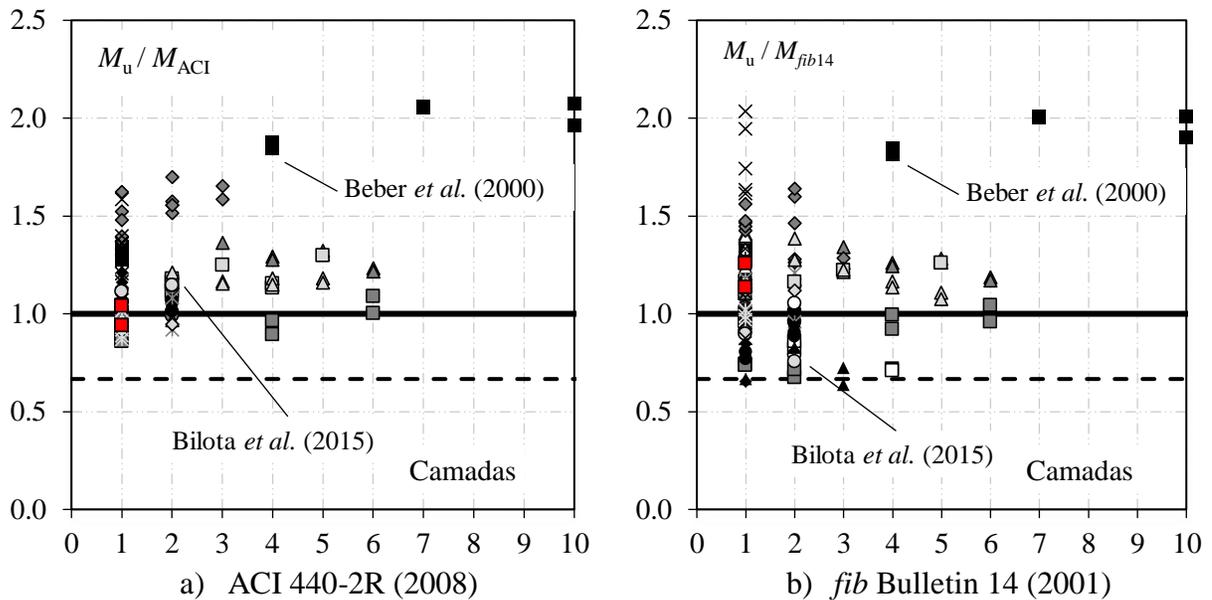


Figura 12. Influência do número de camadas de reforço.

A Figura 13 mostra a influência da razão entre a taxa de armadura após o reforço e a taxa de armadura de flexão (ρ_r/ρ). Verifica-se que há uma tendência de resultados menos conservadores à medida que ρ_r/ρ cresce, sendo que para valores acima de 1,4, o ACI tende a estabilizar essa tendência, evitando-se estimativas de resistência contra a segurança. Contudo, o mesmo não foi observado para o *fib* 14, cujas previsões se aproximaram da linha tracejada, que expressa o limite da resistência de projeto.

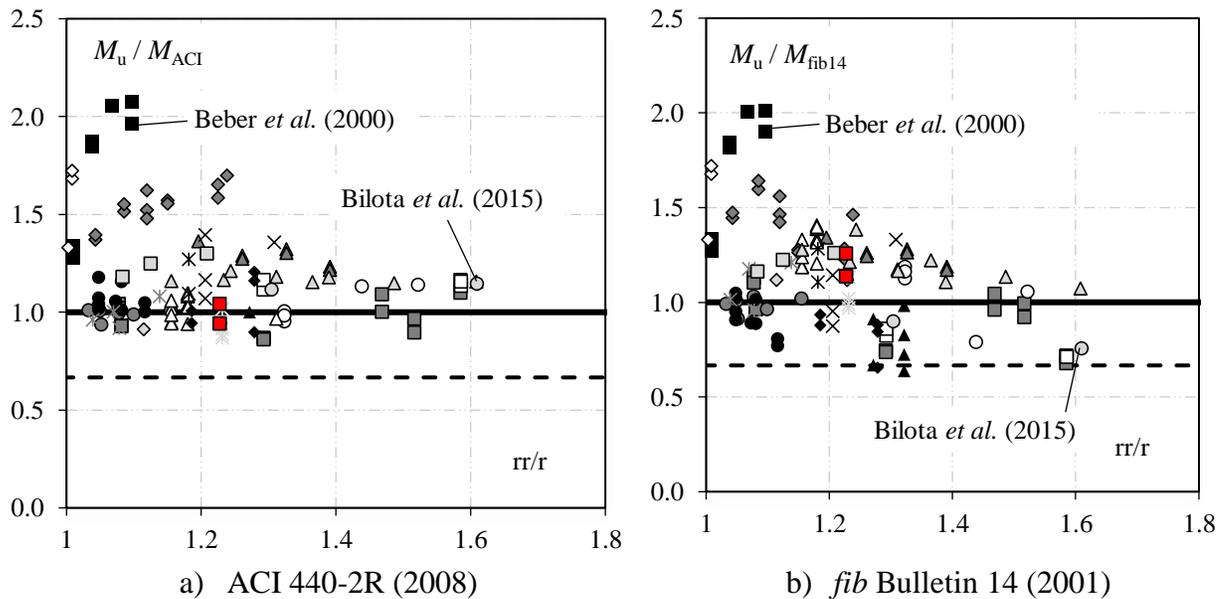


Figura 13. Influência do acréscimo da taxa de armadura (ρ_r/ρ)

As Figuras 12 e 13 mostram que o número de camadas de PRFC não é, necessariamente, um parâmetro que deve ser penalizado na previsão de resistência de vigas reforçadas à flexão com mantas de PRFC, conforme definido pelo ACI. Isso fica evidente analisando-se, por exemplo, os resultados de Beber *et al.* (2000), que testaram vigas com até dez camadas de mantas de PRFC e obtiveram bom desempenho, e os de Bilota *et al.* (2015), cujas vigas testadas tinham apenas uma ou duas camadas de PRFC e mostraram desempenho bem inferior. Analisando-se a Figura 13, é

possível perceber que as vigas de Beber *et al.* (2000) apresentam baixos valores de ρ_r/ρ enquanto que as de Bilota *et al.* (2015) apresentaram valores extremos dentro das vigas deste banco de dados, evidenciando que ρ_r/ρ é um parâmetro fundamental para ser levado em consideração em projeto.

5. CONCLUSÃO

Para observar a influência da ancoragem do reforço com PRFC no comportamento de vigas resistindo à flexão, foi realizado um estudo experimental, envolvendo ensaios em 4 vigas de concreto armado, variando os critérios de ancoragem das mantas de fibra de carbono. Além da abordagem experimental, um banco de dados com resultados de diversos autores foi utilizado para avaliar a influência de diferentes parâmetros na resistência de vigas reforçadas à flexão com mantas de PRFC. Estes dados foram usados ainda para discutir o desempenho dos métodos teóricos propostos pelo *fib* Bulletin 14 (2001) e ACI 440-2R (2008).

Quanto aos ensaios das vigas, observou-se que a largura do grampeamento teve maior influência na resistência à flexão das vigas reforçadas com manta de PRFC, visto que a viga V4 apresentou a maior resistência em relação às demais, mesmo tendo comprimento de ancoragem idêntico ao da viga V3. As vigas V2 e V3 apresentaram os mesmos valores de resistência, ainda que a viga V3 apresente maior comprimento de ancoragem entre elas. Outro ponto importante é que, mesmo com os acréscimos de resistência das vigas reforçadas em relação à de referência, as vigas com manta de PRFC falharam prematuramente. Por fim, observou-se que os valores limites de deformação da manta de PRFC assumidos pelo fabricante são muito conservadores diante dos resultados experimentais registrados nesta pesquisa.

Quanto à avaliação dos modelos teóricos, verifica-se que tanto o *fib* 14 quanto o ACI apresentaram resultados conservadores em relação a razão M_u/M_{Rteo} , o que na prática deve garantir previsões de resistência a favor da segurança, na maioria dos casos. Observou-se ainda que o procedimento de minorar a eficiência do reforço por meio de limitações nas deformações do PRFC, apesar de estar, em geral, a favor da segurança, pode se tornar excessivamente conservador nos casos de reforço onde a ancoragem do PRFC é executada de forma adequada. Por fim, ressalta-se que dentre os parâmetros avaliados que afetam na resistência a flexão de vigas com mantas de PRFC, destaca-se que a relação ρ_r/ρ se mostrou mais relevante do que comparado o número de camadas de mantas de PRFC, levando-se em conta os dados deste banco de dados.

6. AGRADECIMENTOS

Pelo apoio à esta e outras pesquisas, os autores agradecem: à Universidade Federal do Pará (UFPA); ao Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE); ao Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada (NUMEA); ao *Campus* Universitário de Tucuruí (CAMTUC); à Eletrobras Eletronorte; à VIAPOL Ltda por ter doado o material de reforço usado nos experimentos; e às agências de fomento CNPq, CAPES e FAPESPA.

7. REFERÊNCIAS

Alagusundaramoorthy, I., Harik, I. E. and Choo, C. C. (2003), *Flexural Behavior of R/C Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets or Fabric*. ASCE - Journal of Composites for Constructions. 7 (4):292-301. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:4\(292\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:4(292))

American Concrete Institute. (2014), *ACI Committee 318-M. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, Michigan.

- American Concrete Institute. (2008), *ACI Committee 440-2R. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. Farmington Hills, Michigan.
- Balaguru, P. and Kurtz, S. (2001), *Comparison of inorganic and organic matrices for strengthening of RC beams with carbon sheets*. Journal of Structural Engineering, 127:35-42.
- Barros, J. A. O., Dias, S. J. E. and Lima, J. L. T. (2007), *Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams*. Cement and Concrete Composites. Volume 29, Issue 3, Pages 203-217. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.001>
- Beber, A. J. (2003), “*Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono*”. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 289.
- Beber, J. A., Campos Filho, A. and Campagnolo, J. L. (2000), “*Estudo Teórico-Experimental de Vigas de Concreto Reforçadas com Tecidos de Fibra de Carbono*”. IV Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo.
- Benjeddou, O., Ouezdou, M. B. and Bedday, A. (2007), *Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates*. Construction and Building Materials. Volume 21, Issue 6, Pages 1301-1310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.01.008>
- Bilotta, A., Ceroni, F., Nigro, E. and Pecce, M. (2015), *Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence*. Composite Structures, 124:163-175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.046>
- Breña, S. F., Bramblett, R. M., Wood, S. L. and Kreger, M. E. (2003), *Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites*. ACI Structural Journal. 100:36-46.
- Chahrouh, A. and Soudki, K. (2005), *Flexural Response of Reinforced Concrete Beams Strengthened with End-Anchored Partially Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strips*. ASCE Journal of Composites for Construction. 9 (2):170-177. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2005\)9:2\(170\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:2(170))
- Collins, M. P. (2001), “*Evaluation of shear design procedures for concrete structures*”. A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design.
- David, E., Ragneau, E. and Buyle-Bodin, F. (2003), *Experimental analysis of flexural behavior of externally bonded CFRP reinforced concrete structures*. RILEM Materials and Structures. 38:238-241.
- Dias, S. J. E., Juvandes, L. F. P. and Figueiras, J. A. (2002), *Comportamento de Vigas de Betão Armado Reforçadas à Flexão com Sistemas Compósitos de CFRP*. Unidireccionais. Engenharia Civil UM. 14:15-28.
- Dong, J. F., Wang, Q. Y., Qiu, C. C. and He, D. (2011), *Experimental study on RC beams strengthened with CFRP sheets*. Advanced Materials Research. 213:548-52.
- Dong, J. F., Wang, Q. Y., Zhu, Y. M. and Qiu, C. C. (2010), *Experimental study on RC beams strengthened with externally bonded FRP sheets*. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). 42:197-203.
- Esfahani, M. R., Kianoush, M. R. and Tajari, A. R. (2007), *Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets*. Engineering Structures. 29:2428-2444. [10.1016/j.engstruct.2006.12.008](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.12.008)
- Eurocode 2 (2004), *Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels, Belgium.
- Ferrari, V. J. (2007), “*Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado com Manta de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) Aderido a Substrato de Transição Constituído por Compósito Cimentício de Alto Desempenho*”. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, p. 310.
- fib Bulletin 14 (2001), *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. FIB, Lausanne.

- Gamino, A. L. (2007), “*Modelagem física e computacional de estruturas de concreto reforçadas com CFRP*”. Tese de doutorado, Escola politécnica da universidade de São Paulo, p. 259.
- Garcez, M. R. (2007), “*Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras*”. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 241.
- Hawileh, R.A., Nawaz, W., Abdalla, J. A. and Saqan, E. I. (2015), *Effect of flexural CFRP sheets on shear strength of reinforced concrete beams*. Composite Structures. 122:468-476. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.010>
- Juvandes, L. F. P. (1999), “*Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”*”. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, p. 302.
- Khan, A. R. and Fareed, S. (2014), *Behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP wraps with and without end anchorages*. Procedia Engineering. 77:123-130. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.011>
- Kim, H. S. and Shin, Y. S. (2011), *Flexural behaviour of reinforced concrete (RC) beams retrofitted with hybrid fiber reinforced polymers (FRPs) under sustaining loads*. Composite Structures. 93:802-11.
- Monti, G. and Liotta, M. A. (2007). *Tests and design equations for FRP-Strengthening in shear*. Construction and Building Materials. 21:799-809. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.023>
- Rafi, M. M., Nadjai, A., Ali, F. and Talamona, D. (2008), *Aspects of behavior of CFRP reinforced concrete beams in bending*. Construction and Building Materials. 22:277-285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.014>
- Rusinowsky, P., Taljsten, B. and Sand, B. (2009), “*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.
- Spadea, G., Bencardino, F. and Swamy, R. N. (2000), *Optimizing the performance characteristics of beams strengthened with bonded CFRP laminates*. Materials and Structures. 33:119-126.
- Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J. and Chen, J. F. (2003), *Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs*. Construction and Building Materials. 17:447-462. [10.1016/S0950-0618\(03\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00043-6)
- Toutanji, H., Zhao, L. and Zhang, Y. (2006), *Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix*. Engineering Structures, 28:557-566. [10.1016/j.engstruct.2005.09.011](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.011)
- Vieira, M. M., Santos, A. R. S., Mont’Alverne, A. M., Bezerra, L. M., Montenegro, L. C. S. and Cabral, A. E. B. (2016), *Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened in bending with carbon fiber reinforced polymer*. IBRACON Structures and Materials Journal. 9 (1) pp. 123:152. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000100008>
- Zhang, A., Jin, W. and Li, G. (2006), *Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates*. Journal of Zhejiang University SCIENCE A. 7:436-444. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A0436>