

Influencia del anclaje en la resistencia a la flexión de vigas reforzadas con 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 Contacto: mpinaf@gmail.com

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

Recepción: 29/09/2017 | Aceptación: 18/10/2018 | Publicación: 30/12/2018

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.

Citar como: M. P. Ferreira, M. H. Oliveira, A. F. Lima Neto, L. S. Tapajós, A. Nascimento, M. C. Freire (2018), " *Influencia del anclaje en la resistencia a la flexión de vigas reforzadas con 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.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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.

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

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: reforço; viga; concreto armado; encamisamento.

LISTA DE NOMENCLATURAS

a	– vano de cizallamiento	f_s'	– tensión en el acero de la armadura comprimida
b_f	– ancho de la capa de PRFC	f_{ys}	– tensión de fluencia de la armadura traccionada
b_w	– ancho da viga	f_{ys}'	– tensión de fluencia de la armadura comprimida
c	– altura del bloque de compresión rectangular equivalente del concreto	h	– altura da viga
c_1	– factor obtenido a través de la calibración de resultados (igual a 0,64 para PRFC)	k_b	– factor geométrico
d	– altura útil de la viga	k_c	– constante que toma en consideración la compactación del concreto durante el vaciado
d'	– posición del centroide de la armadura comprimida	l_b	– largo de anclaje de ls a manta de PRFC
f_c	– resistencia a la compresión del concreto	l	– ancho do grapado
f_{ctm}	– resistencia a la tracción promedio del concreto	n	– número de capas de PRFC
f_{fe}	– tensión efectiva del PRFC	t_f	– espesor del PRFC
f_s	– tensión en el acero de la armadura traccionada	x	– posición de la línea neutra
		A_f	– área de refuerzo aplicado en la viga

A_s	– área de acero da armadura traccionada	α	– coeficiente de reducción debido a la propagación de fisuras inclinadas
A_s'	– área de acero de la armadura comprimida	β_1	– coeficiente que determina la aproximación de la curva resultante de compresión del concreto a un rectángulo, según las recomendaciones de la ACI 440-2R (2008)
C_C	– componente de compresión debido a la parte do concreto	ϵ_{bi}	– deformación encontrada en el recubrimiento de la armadura de tracción en la viga antes del refuerzo
C_S	– componente de compresión debido a la armadura comprimida	ϵ_c	– deformación del concreto
E_f	– módulo de elasticidad del PRFC	ϵ_{cu}	– deformación última del concreto
E_s	– módulo de elasticidad del acero	ϵ_f	– deformación de la fibra de carbono
F_{cc}	– resultante de compresión	ϵ_{fd}	– valor límite de deformación de la fibra a ser adoptado en el dimensionamiento y verificación del refuerzo
L	– largo total de la viga	ϵ_{fe}	– deformación efectiva en el PRFC
M	– momento aplicado durante el ensayo experimental	ϵ_{fu}	– deformación última observada en el polímero en el momento de la ruptura
M_R	– momento resistente na seção transversal da viga	ϵ_s	– deformación de la armadura traccionada
M_{Rteo}	– momento resistente estimado por las recomendaciones	ϵ_s'	– deformación de la armadura comprimida
M_u	– momento último experimental	ϵ_{ys}	– deformación de fluencia de la armadura de flexión
M_{ACI}	– momento último según as recomendaciones do ACI 440-2R (2008)	r	– tasa de la armadura de la viga antes del refuerzo
M_{fib}	– momento último según las recomendaciones del <i>fib</i> Bulletin 14 (2001)	r_r	– tasa de la armadura de la viga luego del refuerzo
M_{V1}	– momento último experimental de la viga V1	\emptyset	– diámetro de la barra de las armaduras
$N_{fa,max}$	– fuerza máxima que puede ser aplicada al refuerzo de la viga	ψ	– coeficiente que determina la aproximación de la curva resultante de compresión en el concreto a un rectángulo, según las recomendaciones del <i>fib</i> Bulletin 14 (2001)
P	– carga aplicada en el ensayo experimental		
R^2	– coeficiente de correlación de los resultados		
T_f	– componente de tracción debido a la parte del refuerzo con fibra		
T_s	– componente de tracción debido a la armadura traccionada		

1. INTRODUCCIÓN

Entre las técnicas utilizadas para el refuerzo de estructuras de concreto armado, se destaca los sistemas que utilizan Polímeros Reforzados con Fibras (PRF), por presentar bajo peso y elevada resistencia a la tracción y a la corrosión, siendo que los Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono (PRFC) han mostrado gran aceptación por más de dos décadas debido a sus altos valores de resistencia, rigidez y durabilidad, además de la facilidad de instalación, cuando se comparan con otros tipos de fibras (Monti and Liotta, 2007). En el caso específico del refuerzo a flexión de vigas de concreto armado, diversas investigaciones muestran que el uso de mantas de PRFC es una metodología eficaz, destacándose los trabajos de Rafi *et al.* (2008), Khan y Fareed (2014) y Hawileh *et al.* (2015).

No obstante, es importante destacar que rupturas prematuras están asociadas a su uso. En el caso de vigas reforzadas a flexión, esa ruptura frágil puede ocurrir debido al despegado de la fibra de carbono en relación con el sustrato de concreto, lo que puede limitar el incremento de la resistencia proporcionado por el refuerzo. Ese modo de falla frágil está normalmente asociado a la deficiencia del anclaje en el sistema de refuerzo, lo que hace el uso de dispositivos adicionales recomendable, tal cual el grapado con bandas de manta de PRFC (ver Benjeddou *et al.*, 2007; Dong *et al.*, 2011; Kim y Shin, 2011, entre otros).

Este trabajo presenta una serie de ensayos experimentales en vigas de concreto armado reforzadas con mantas de PRFC, realizada con el objetivo de evaluar la influencia del anclaje en el desempeño estructural del refuerzo. Además de ello, fue montado un amplio banco de datos, con resultados experimentales seleccionados de trabajos de diferentes autores. Esta base de datos es utilizada para discutir la influencia de diferentes parámetros en el desempeño del refuerzo con mantas de PRFC y para evaluar el desempeño de las previsiones teóricas de resistencia obtenidas tomando las recomendaciones presentadas por el ACI 440-2R (2008) y el *fib* Bulletin 14 (2001).

2. VIGAS REFORZADAS CON PRFC

2.1 Modos de ruptura

Teng *et al.* (2003) Afirman que vigas reforzadas a flexión con mantas de PRFC pueden presentar modos de falla frágiles, como, por ejemplo: por agotamiento de la capacidad resistente del PRFC (ver Figura 1a); desprendimiento del refuerzo en la interfaz con el concreto (ver Figura 1b); y evidencia del refuerzo juntamente con el recubrimiento de concreto de la armadura de flexión (ver Figura 3c). La ruptura de la manta de PRFC puede ocurrir en vigas débilmente armadas en cuanto a la flexión, siendo un modo de falla frágil una vez que el PRFC presenta un comportamiento lineal-elástico hasta la ruptura. El desprendimiento de la manta puede ocurrir por deficiencia del anclaje del refuerzo, por fisuración excesiva de la viga o también por fallas en el proceso de pegado. La evidencia de la capa de recubrimiento de concreto puede ser provocada por tensiones cizallantes en la interfaz entre el concreto y PRFC, debido a la diferencia entre sus módulos de elasticidad, pudiendo ser amplificado por la corrosión de las armaduras de flexión.

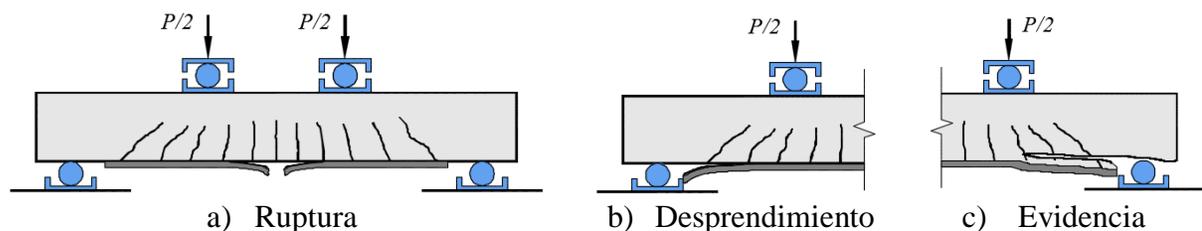


Figura 1. Modos de ruptura en vigas reforzadas a flexión con PRFC.

2.2 Resistencia a la flexión

El comportamiento de una viga de concreto armado reforzada con PRFC es sometida a flexión puede ser observado en el diagrama de la Figura 2. En este análisis, se considera que la cantidad de acero de la viga reforzada es equivalente a la sumatoria de la cantidad de acero inicial con la contribución proveniente del refuerzo, como es presentado em (1).

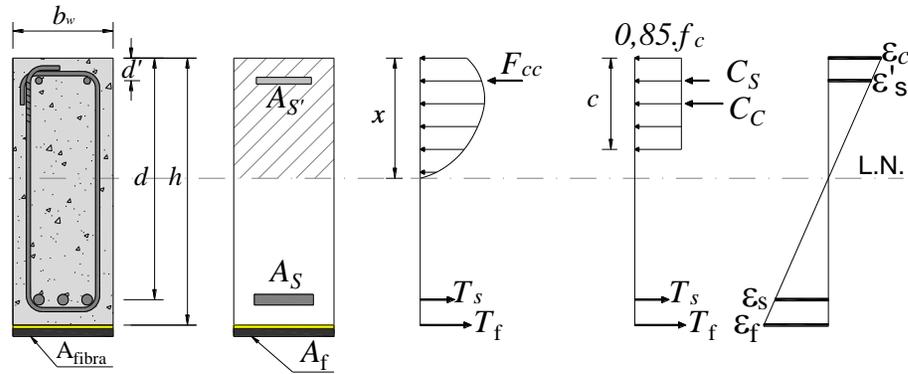


Figura 2. Diagrama tensión-deformación de una viga reforzada con PRFC.

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

Donde: ρ es la porción de acero de la viga antes del refuerzo; A_f es el área de refuerzo aplicado a la viga; E_f es el módulo de elasticidad del PRFC; E_s es el módulo de elasticidad del acero; b_w es el ancho de la viga; h es la altura de la viga.

2.2.1 ACI 440-2R (2008)

La norma norteamericana ACI 440-2R (2008) presenta recomendaciones para el dimensionamiento del refuerzo utilizando PRFC. Para determinar la resistencia a flexión de vigas de concreto armado reforzadas con mantas de fibra de carbono, se usaron (2) - (10).

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

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

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

$$\epsilon'_s = \epsilon_{cu} \cdot \left(\frac{x-d'}{x} \right) \quad (5)$$

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

$$f'_s = E_s \cdot \epsilon'_s \leq f_{ys}' \quad (7)$$

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

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

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

Donde: ε_{fd} es el valor límite de deformación de la fibra a ser adoptado en el dimensionamiento y verificación del refuerzo para evitar rupturas prematuras de la fibra; n es el número de capas de PRFC; t_f es el espesor del PRFC; ε_{fu} es la deformación última observada en el polímero al momento de la ruptura; ε_{fe} es la deformación efectiva en el PRFC; x es la posición del eje neutro; ε_{bi} es la deformación encontrada en el recubrimiento de la armadura de tracción en la viga antes del refuerzo; f_{fe} es la tensión efectiva del PRFC; d es la altura útil de la viga; ε_s' es la deformación en la armadura comprimida; f_s' es la tensión del acero de la armadura comprimida; d' es la posición del centroide de la armadura comprimida; ε_s es la deformación de la armadura traccionada; f_s es la tensión en el acero de la armadura traccionada; A_s es el área de acero de la armadura traccionada; A_s' es el área de acero de la armadura comprimida; β_1 es un coeficiente que determina la aproximación de la curva da resultante de compresión del concreto a un rectángulo, siendo 0,85 para concretos con valores de f_c menores que 28 MPa y habiendo una disminución lineal de 0,05 para cada 7 MPa sobre este límite de tensión, siendo que el valor mínimo para tal coeficiente, de acuerdo con la ACI 318 (2014), es de 0,65; M_R es el momento resistente en la sección transversal de la viga.

2.2.2 fib Bulletin 14 (2001)

El fib Bulletin 14 (2001) trae recomendaciones para el dimensionamiento de vigas reforzadas a flexión con PRFC y adopta una filosofía de cálculo similar al adoptado por el ACI 440-2R (2008). Las mismas ecuaciones presentadas por el ACI son utilizadas en este documento, diferenciándose apenas en los siguientes parámetros: el coeficiente β_1 en este es denominado ψ y equivale a 0,8 independientemente de la clase de resistencia del concreto; el límite de deformación de la fibra, que es calculado por (11), cuyos parámetros son encontrados a través de (12) - (14).

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

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

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

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

Donde: $N_{fa,max}$ es a fuerza máxima que puede ser aplicada al refuerzo de la viga (expresada en N); α es un coeficiente de reducción debido a la propagación de fisuras inclinadas, adoptado como 0,9; c_1 es igual a 0,64; k_c es una constante que toma en consideración la compactación del concreto durante el vaciado, siendo ese valor igual a 1 cuando el refuerzo es aplicado en la cara inferior de la viga es 0,67 y en la cara superior; k_b es un factor geométrico; f_{ctm} es la resistencia a tracción promedio del concreto, adoptada según lo expresado en el Eurocode 2 (2004); b_f es el ancho de la capa de PRFC.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Características de las vigas

Fueron realizados ensayos en 4 vigas de concreto armado reforzadas con mantas de PRFC, teniendo como variables el largo del anclaje de la manta y el ancho del grapado, a fin de evaluar su influencia tanto en el desempeño como en la resistencia de las vigas. Fue ensayada 1 viga de referencia sin refuerzo y 3 vigas reforzadas con manta de fibra de carbono. Las áreas de la armadura de acero y PRFC fueron mantenidas constantes. La Tabla 1 y la Figura 3 presentan las principales características de las vigas. Las deformaciones en las armaduras de flexión, en la manta de refuerzo y en el grapado fueron monitoreadas con extensómetros eléctricos, como muestra la Figura 4. En la Figura 5 se ilustra el sistema de ensayo de las vigas.

Tabla 1. Características de las vigas ensayadas.

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

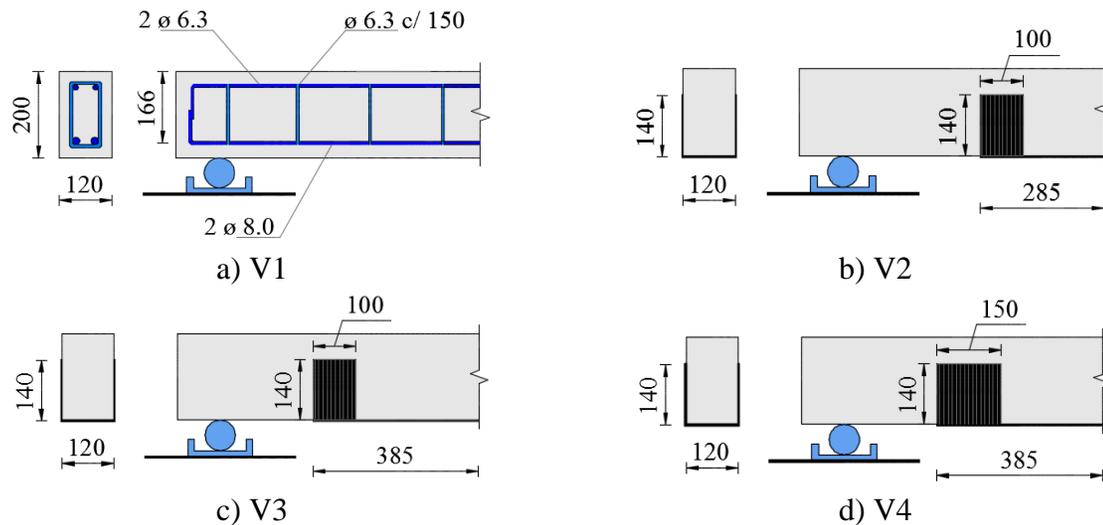


Figura 3. Características de las vigas ensayadas.



Figura 4. Instrumentación de las vigas.

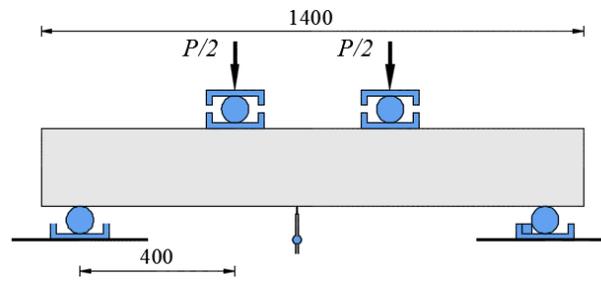


Figura 5. Sistema de ensayo de las vigas.

3.2 Discusión de los Resultados

El modo de ruptura de cada una de las vigas ensayadas puede ser visualizado en la Figura 6. Se observó que la viga de referencia rompió por flexión luego que la armadura longitudinal alcanzó altos niveles de deformación (Figura 6a). En la viga V2 ocurrió el arrancamiento del concreto en la zona adyacente al grapado (Figura 6b). La viga V3 perdió su capacidad resistente luego del desprendimiento de la fibra en parte de la zona de contacto con el grapado (Figura 6c). Ya la viga V4 se rompió luego de la evidencia del recubrimiento del concreto en la región del vano de flexión (Figura 6d).

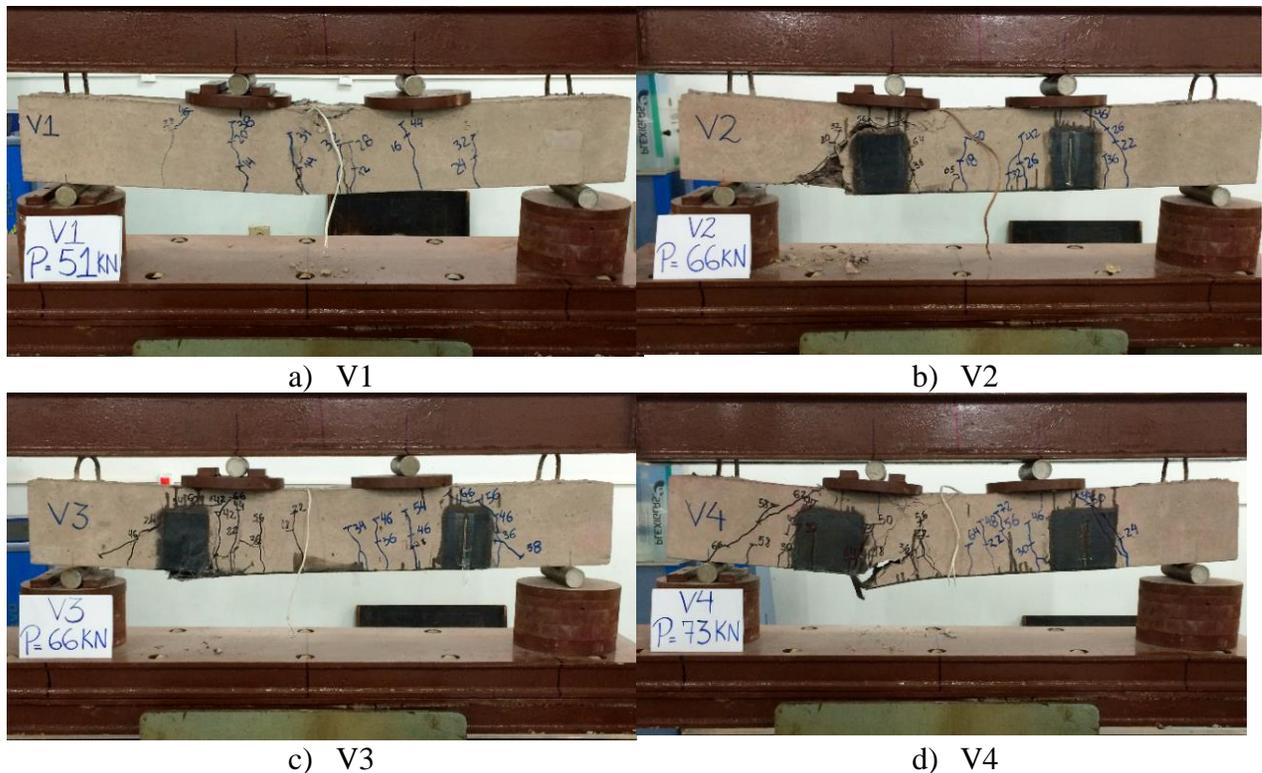


Figura 6. Superficie de ruptura de las vigas ensayadas.

La Figura 7 presenta los resultados de deformaciones medidos en las armaduras de flexión y en diferentes puntos del PRFC. Se aprecia que, en todas las vigas, las armaduras de flexión alcanzaron la fluencia, como se muestra en la Figura 7a. Las deformaciones de la armadura de flexión fueron menores en las vigas con la manta de PRFC para los mismos niveles de carga, pues el refuerzo contribuyó en la parte traccionada de la pieza. Además de eso, se destaca que el comportamiento resistente de las vigas con la manta fue más frágil que el de la viga sin refuerzo, una vez que luego de alcanzar la resistencia máxima, las lecturas fueron interrumpidas por la falla de la pieza, mientras

que en la viga V1, al alcanzar la carga máxima, ese nivel de carga permaneció asociado a un alto nivel de deformación.

En la Figura 7b, se observa que tanto el largo del anclaje de la fibra cuanto el ancho del grapado influye en la deformación última del PRFC medido en los ensayos, variando de 3,5% para la viga V2 hasta aproximadamente 4,2% para las vigas V3 y V4. En todos los casos, se debe destacar que estos son valores superiores a los previstos de forma teórica por el ACI, que serían de 1,9%. Además, hay que destacar que ninguna de las vigas se rompió con el agotamiento de la resistencia a tracción de la manta de PRFC. La Figura 7c muestra que en todas las vigas el nivel de deformación en la extremidad del refuerzo fue menor que lo medido en el medio del vano, donde el momento es máximo y que en el caso de la viga V2, que rompió por desprendimiento de la fibra en esta región, el límite de deformación medido fue prácticamente el mismo que el sugerido por el fabricante, de 2,1%. Ya en la Figura 7d es posible percibir que el nivel de deformación desarrollado en la región del grapado fue pequeño y que en la viga V3 este claramente comienza a desprenderse antes de la falla.

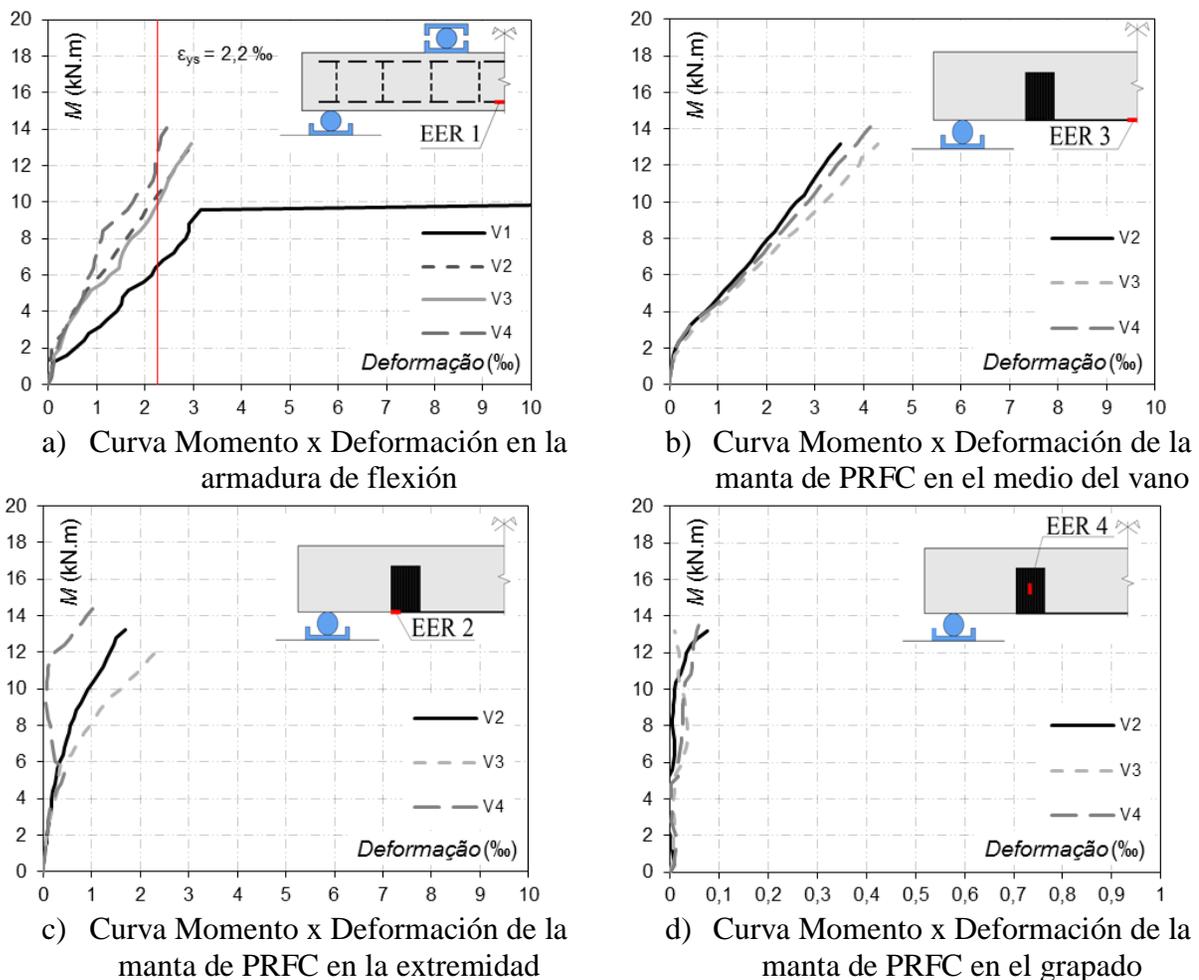


Figura 7. Resultados de los ensayos en las vigas.

La Figura 8 presenta la curva de desplazamientos verticales de las vigas, medidos en el medio del vano. Es posible percibir que las vigas reforzadas presentaron una respuesta muy similar entre si, demostrando mayor rigidez que la viga de referencia, la cual se rompió de forma dúctil por flexión y mostrando grandes desplazamientos al alcanzar el momento de fluencia de sus armaduras de flexión. Como se apreció todas las vigas reforzadas se rompen de forma brusca, con la falla ocurriendo en diferentes regiones del PRFC.

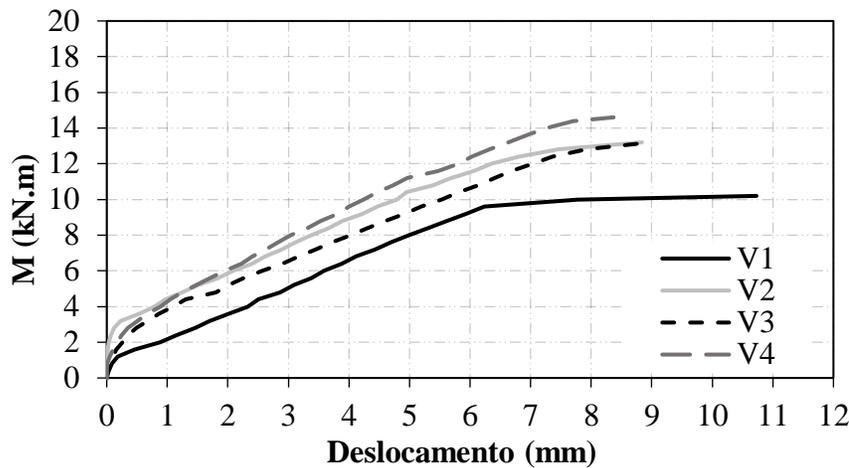


Figura 8. Curvas momento-desplazamiento de las vigas ensayadas.

La Tabla 2 presenta las cargas últimas de las vigas ensayadas y compara la resistencia de las vigas reforzadas con manta de PRFC con la de la viga de referencia (V1), a fin de determinar el incremento de la resistencia generado por el refuerzo. Además de eso la resistencia experimental de las vigas es comparada con estimaciones teóricas obtenidas siguiendo las recomendaciones del ACI y del *fib*14. A partir de esos resultados, se observó que el aumento del largo de anclaje de la viga V3 en relación con la viga V2 no resultó en aumento de la resistencia, y que fue el aumento del ancho del grapado el responsable por la mayor resistencia de la viga V4 en relación a la viga V3. También fue observado que el uso del ACI resultaría en previsiones de resistencia contra la seguridad para las vigas V2 y V3, mientras que el *fib* 14 presentó resultados a favor de la seguridad.

Tabla 2. Cargas últimas de las 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 DATOS

4.1 Metodología de recolección y análisis de datos

En complemento al programa experimental, fue recolectado un banco de datos con los resultados de 126 ensayos de 20 autores, envolviendo vigas reforzadas a flexión con manta de PRFC. Como criterio de elección de las vigas, fueron seleccionadas apenas las que se rompieron por flexión, sin carga inicial y con refuerzo colocado externamente. El objetivo de ese análisis de datos es evaluar la influencia de las principales variables en la resistencia a la flexión de vigas reforzadas con PRFC. El análisis del banco de datos involucra la comparación de los resultados experimentales con las estimaciones teóricas obtenidas usando el ACI y el *fib* 14. Así se calcularon los valores promedio, coeficiente de variación y desviación-estándar de la razón entre el momento último experimental y el momento resistente teórico (M_u/M_{Rteo}), se evaluó finalmente el porcentaje de resultados contra la seguridad ($M_u/M_{Rteo} < 1$). Para evaluar la precisión de los modelos teóricos, son presentados gráficos que confrontan el momento de ruptura experimental (M_u) en función del momento resistente previsto (M_{Rteo}), con el objetivo de analizar si la tendencia de los resultados obtenidos se aproxima de la condición ideal ($M_u=M_{Rteo}$).

Como fue verificado anteriormente, el desempeño del refuerzo con la manta de PRFC está directamente relacionado la calidad del anclaje de la fibra al concreto. Por tanto, las vigas do banco

de datos fueron divididas en 3 grupos: el grupo 1 para las situaciones en que la colocación de la manta se extendía del centro de la viga hasta el apoyo o más allá; el grupo 2 con vigas en que la colocación de la manta no se extendía hasta el apoyo; y el grupo 3 con vigas en que fueron utilizados dispositivos externos para auxiliar el anclaje del refuerzo, como tornillos o corbatas. Se resalta que ese tipo de anclaje es considerado por diversos autores como el más favorable para el anclaje de la manta de PRFC, siempre que el dispositivo sea hecho de este mismo material.

Otro método de evaluación utilizado fue el criterio de Collins (2001), conocido como *Demerit Points Classification – DPC*, en el cual los valores de M_u/M_{Rteo} fueron clasificados en bandas que van de “extremadamente peligroso” a “extremadamente conservador”, siendo el desempeño del modelo teórico definido como un número que resulta de la suma de los productos de M_u/M_{Rteo} por la puntuación correspondiente, según la clasificación. La Tabla 3 presenta un resumen de las características de las vigas del banco de datos, además de la simbología utilizada por los autores para identificación de las figuras. A Tabla 4 muestra un resumen de las variables referentes al refuerzo con manta de fibra de carbono de las vigas del banco de datos. La Tabla 5 presenta los parámetros relacionados con el DPC de Collins (2001).

Finalmente fueron hechos los gráficos que relacionan la resistencia experimental de las vigas con la previsión de ruptura teórica (M_u/M_{Rteo}) en función del número de capas de mantas de PRFC, bien como la cantidad de armadura posterior al refuerzo en relación con la inicial (ρ_r/ρ). El objetivo de estos gráficos es analizar si las hipótesis adoptadas por los modelos teóricos presentan correlación adecuada con las evidencias experimentales existentes.

Tabla 3. Características de las vigas del banco de datos.

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 et al. (2000)	8	120	250	219	783	157	565	33
David et al. (2003)	4	150	300	267	933	307	500	39
Esfahani et al. (2007)	6	150	200	164	600	402-626	350-406	24
Breña et al. (2003)	9	203	356-406	318-368	1065-1220	395	440	35-37
Rusinowski et al. (2009)	5	200	300	262	1300	402	527	64-70
Toutanji et al. (2006)	7	108	158	127	560	142	427	49
Barros et al. (2007)	6	120	170	141-145	300	39-99	627-788	44
Gamino (2007)	14	75	150	120	550	62	640	45
Zhang et al. (2006)	4	120	250	224	750	226-402	335	23
Spadea et al. (2000)	2	140	300	266	1800	402	435	30
Alagusundaramoorthy et al. (2003)	12	230	380	342	1830	981,75	414	31
Ferrari (2007)	3	170	350	300	950	254,4	548	35-38
Dias et al. (2002)	5	120	180	160	720	100,5	533	41
Balaguru e Kurtz (2001)	3	200	300	255	1000	258	447	47
Vieira et al. (2016)	8	120	245	220	800	157-245	500	44
Bilotta et al. (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

Tabla 4. Variables del refuerzo de las 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

Tabla 5. Criterio de Collins.

M_{exp}/M_{Rteo}	Clasificación	Penalización
< 0,50	Extremadamente Peligroso	10
(0,50 - 0,65)	Peligroso	5
(0,65 - 0,85)	Baja Seguridad	2
(0,85 - 1,15)	Seguridad Apropriada	0
(1,15 - 2,00)	Conservador	1
$\geq 2,00$	Extremadamente Conservador	2

4.2 Discusión de los Resultados

La Figura 9 muestra los gráficos que confrontan la resistencia experimental del banco de datos con las previsiones teóricas, incluyendo en rojo los resultados experimentales de los ensayos de esta investigación. Se observó que los dos modelos teóricos presentaron desempeño similar en relación con el promedio de los resultados, sin embargo, con el *fib* 14 mostrando mayor dispersión y mayor porcentaje de resultados contra la seguridad. Sin embargo, se percibe que las vigas ensayadas se encajan bien en la tendencia de resultados observados para el universo más amplio generado por el banco de datos.

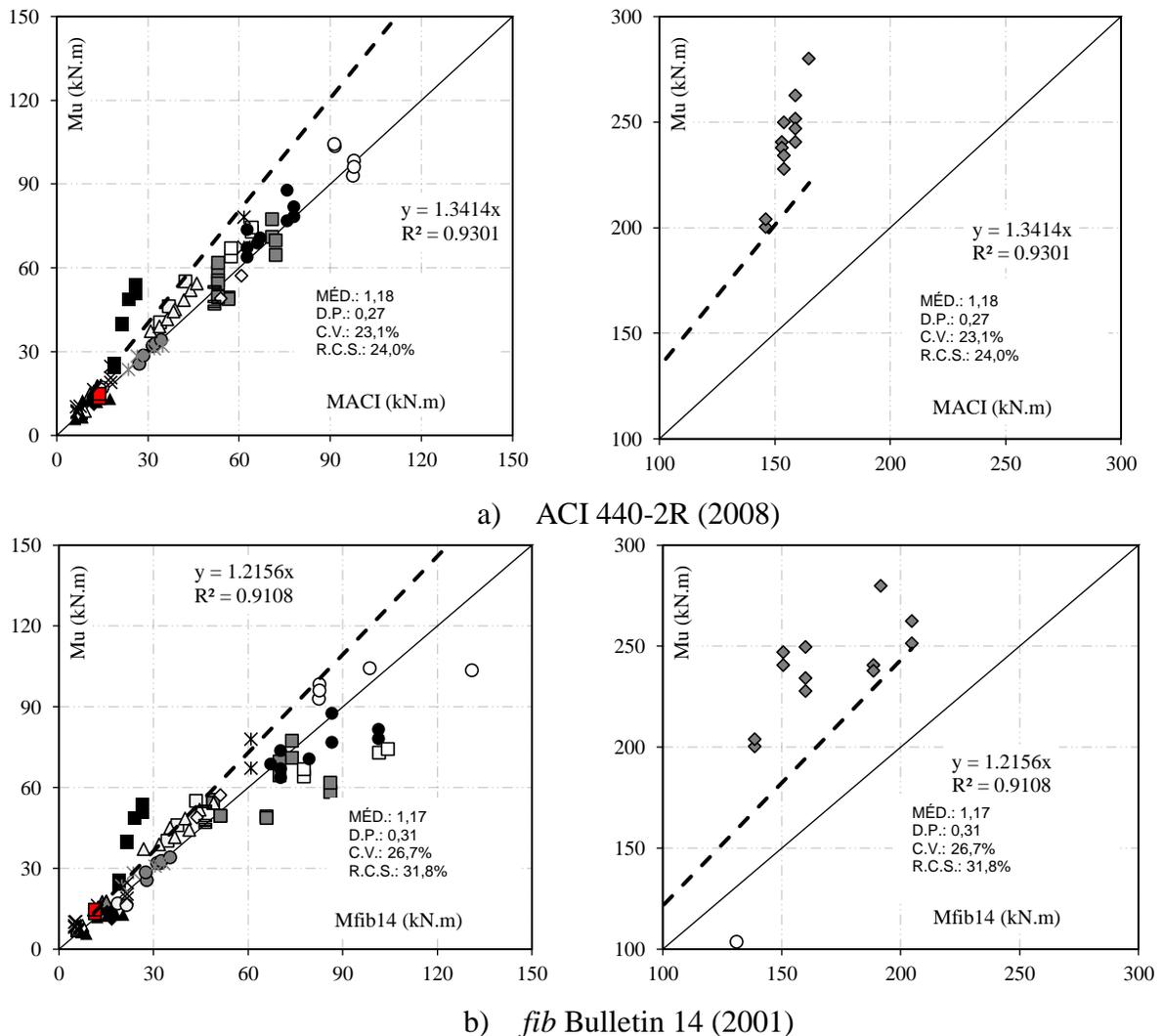


Figura 9. Análisis de la precisión de los modelos teóricos.

Para evaluar la influencia del tipo de anclaje del refuerzo con PRFC en el desempeño de las previsiones teóricas, la Figura 10 divide los datos generales presentados en la Figura 9, clasificándolos por tipo de anclaje en 3 grupos distintos. Para el grupo 1, el ACI presentó un promedio más cercano de 1,0 así como una menor dispersión de resultados y aproximadamente el mismo número de valores contra la seguridad, cuando es comparado con el *fib* 14. En el grupo 2, ese comportamiento fue invertido, y el *fib* 14 presentó menor promedio, pero también con mayor dispersión y mayor porcentaje de resultados contra la seguridad. Para las vigas del grupo 3 los métodos teóricos presentaron desempeño parecido, con el ACI mostrando nuevamente menor dispersión. Como se ve, utilizando el criterio de Collins (2001), es posible establecer puntuaciones para las dos recomendaciones, con base en el espacio muestral del banco de datos recolectado, según se muestra en la Figura 11. Se observa que el ACI presenta menor penalización de acuerdo con el criterio adoptado.

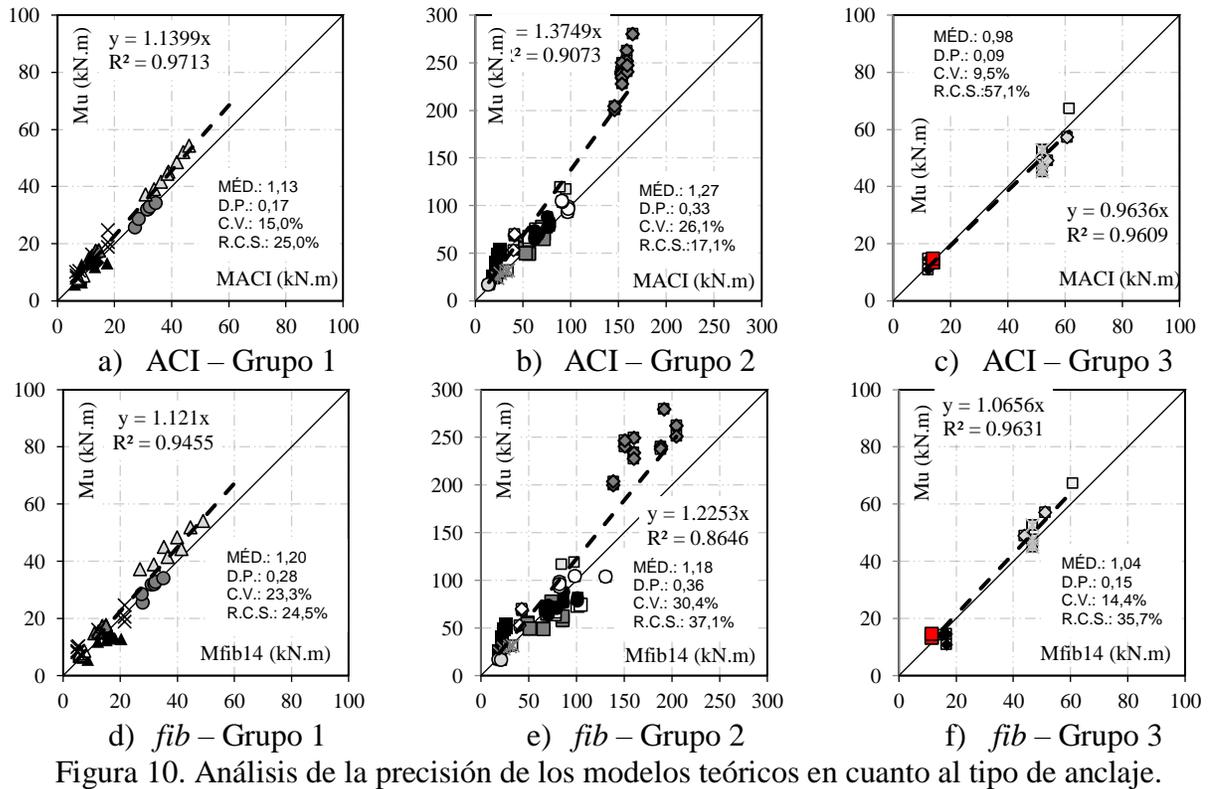
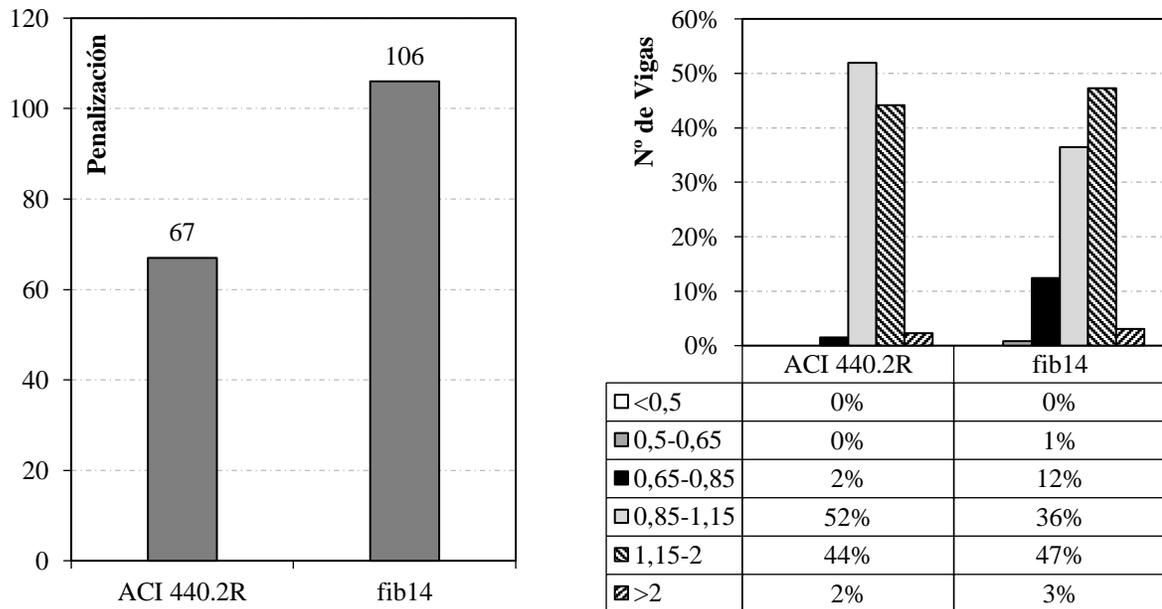


Figura 10. Análisis de la precisión de los modelos teóricos en cuanto al tipo de anclaje.



a) Penalización de Collins aplicada b) Distribución de los resultados de las vigas
 Figura 11. Resultado del criterio de Collins (2001).

La Figura 12 analiza la influencia del número de capas de PRFC tanto en el desempeño del refuerzo como de los métodos teóricos. Se percibe que hay una tendencia de resultados más conservadores conforme se aumenta la cantidad de las capas, lo que es justificable por el hecho de que ambas recomendaciones limitan la deformación del PRFC. Para el ACI, esa tendencia es ligeramente superior, una vez que en su ecuación es utilizado el número de capas, lo que penaliza la estimación de resistencia de vigas reforzadas con un número elevado de capas. En contrapartida, en el *fib* 14 ese factor no es tomado en consideración.

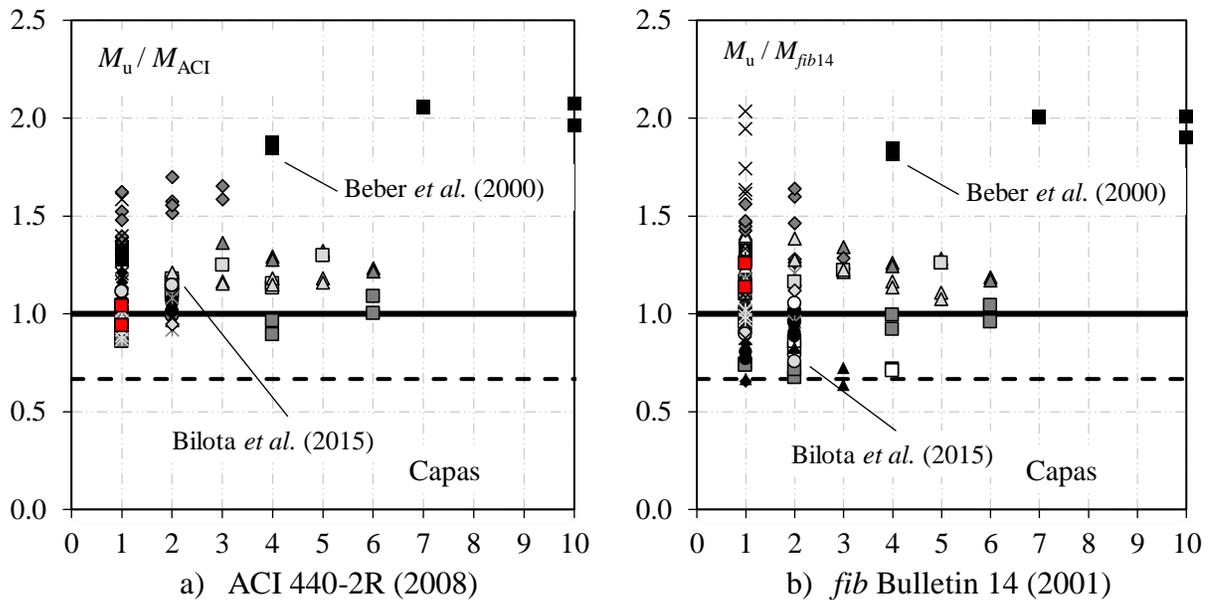


Figura 12. Influencia del número de capas de refuerzo.

La Figura 13 muestra la influencia de la razón entre el aporte de la armadura posterior al refuerzo y la cantidad de armadura de flexión (ρ_r/ρ). Se verificó que hay una tendencia de resultados menos conservadores a medida que ρ_r/ρ crece, siendo que para valores sobre 1,4 el ACI tiende a estabilizar la tendencia, evitando estimaciones de resistencia contra la seguridad. Sin embargo, el mismo no fué observado para el *fib* 14, cuyas previsiones se aproximaron de la línea discontinua, que expresa el límite de la resistencia de proyecto.

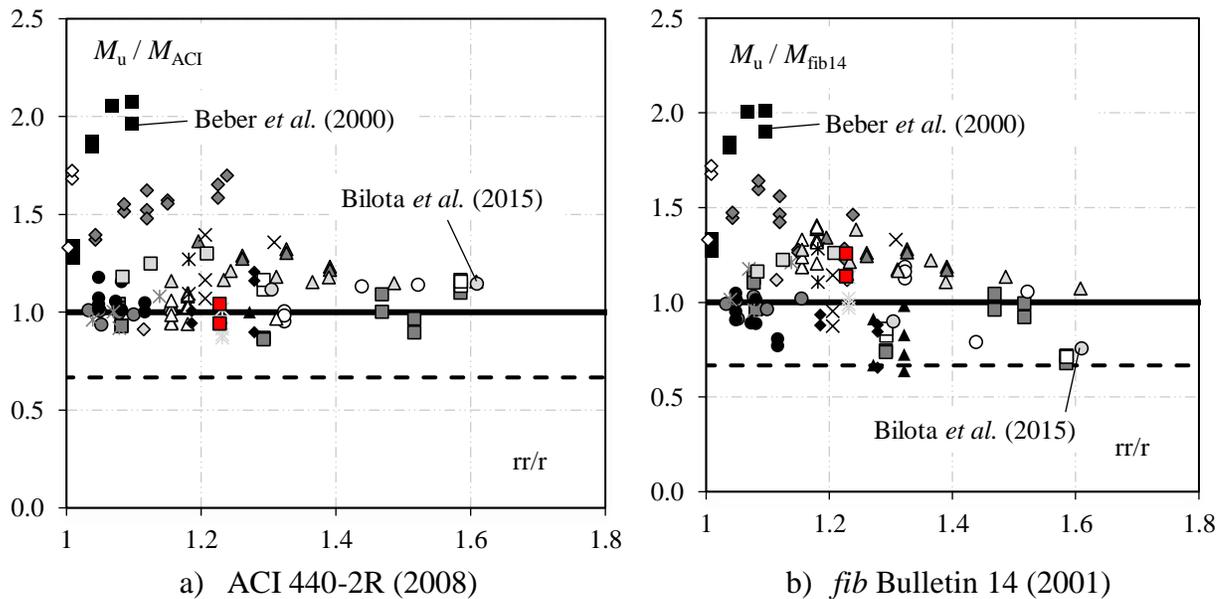


Figura 13. Influencia del incremento de la cantidad de la armadura (ρ_r/ρ)

Las Figuras 12 y 13 muestran que el número de capas de PRFC no es, necesariamente un parámetro que debe ser penalizado en pronóstico de la resistencia de vigas reforzadas a flexión con mantas de PRFC, conforme lo definido por el ACI. Eso queda evidente analizándose, por ejemplo, los resultados de Beber *et al.* (2000), que ensayaron vigas con hasta 10 capas de mantas de PRFC y obtuvieron buen desempeño, y los de Bilota *et al.* (2015), cuyas vigas ensayadas tenían apenas una ó dos capas de PRFC y mostraron desempeño muy inferior. Analizándose la Figura 13, es posible

percibir que las vigas de Beber *et al.* (2000) presentan bajos valores de ρ_r/ρ mientras que las de Bilota *et al.* (2015) presentaron valores extremos dentro de las vigas de este banco de datos, evidenciando que ρ_r/ρ es un parámetro fundamental para ser tomado en consideración en el proyecto.

5. CONCLUSIÓN

Para observar la influencia del anclaje del refuerzo con PRFC en el comportamiento de vigas resistiendo la flexión, fue realizado el estudio experimental, involucrando ensayos en 4 vigas de concreto armado, variando los criterios de anclaje de las mantas de fibra de carbono. Además del enfoque experimental, un banco de datos con resultados de diversos autores fue utilizado para evaluar la influencia de diferentes parámetros en la resistencia de vigas reforzadas a flexión con mantas de PRFC. Estos datos fueron usados para discutir el desempeño de los métodos teóricos propuestos por el *fib* Bulletin 14 (2001) y ACI 440-2R (2008).

En cuanto a los ensayos de las vigas, se observó que el ancho del grapado tuvo mayor influencia en la resistencia a la flexión de las vigas reforzadas con la manta de PRFC, observando que la viga V4 presentó la mayor resistencia en relación con las demás, aun cuando tenían el mismo largo de anclaje como el de la viga V3. Las vigas V2 y V3 presentaron los mismos valores de resistencia, aunque la viga V3 presente mayor largo de anclaje entre ellas. Otro punto importante es que, aún con los incrementos de resistencia de las vigas reforzadas en relación con el de referencia, las vigas con manta de PRFC fallaron prematuramente. Por fin, se observó que los valores límites de deformación de la manta de PRFC asumidos por el fabricante son muy conservadores ante los resultados experimentales registrados en esta investigación.

En cuanto a la evaluación de los modelos teóricos, se verifica que tanto el *fib* 14 cuanto el ACI presentaron resultados conservadores en relación con razón M_u/M_{Rteo} , lo que en la práctica debe garantizar previsiones de resistencia a favor de la seguridad, en la mayoría de los casos. Se observó que el procedimiento de aminorar la eficiencia del refuerzo por medio de limitaciones en las deformaciones del PRFC, a pesar de estar en general, a favor de la seguridad, puede volverse excesivamente conservador en los casos de refuerzo donde el anclaje del PRFC es realizado de forma adecuada. Finalmente se destaca que entre los parámetros evaluados que afectan en la resistencia a la flexión de vigas con mantas de PRFC, se aprecia que la relación ρ_r/ρ se mostró más relevante comparado con el número de capas de mantas de PRFC, tomando en cuenta los datos de este banco de datos.

6. AGRADECIMIENTOS

Por el apoyo a esta y otras investigaciones, los autores agradecen: a Universidad Federal de Pará (UFPA); al Núcleo de Desarrollo Amazónico en Ingeniería (NDAE); al Núcleo de Modelaje Estructural Aplicada (NUMEA); al *Campus* Universitário de Tucuruí (CAMTUC); a Eletrobras Eletronorte; a VIAPOL Ltda por la donación del material de refuerzo usado en los experimentos; y las agencias de fomento CNPq, CAPES y FAPESPA.

7. REFERENCIAS

Alagusundaramoorthy, I., Harik, I. E., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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>