

VERIFICAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DAS FIBRAS FORMADORAS DO COMPÓSITO NOS SISTEMAS PRF APLICADOS NO REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

POSSIBILITY OF REPLACING FIBERS IN FRP SYSTEMS USED AS FLEXURAL POST-STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Leila Cristina Meneghetti, Luiz Carlos Pinto da Silva Filho e Mônica Regina Garcez

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Av. Osvaldo Aranha, 99 – Centro

Porto Alegre, RS Brasil

¹E-mail: lcmeneghetti@yahoo.com.br

²E-mail: lcarlos@ppgec.ufrgs.br

³E-mail: mrgarcez@hotmail.com,

RESUMO

A utilização de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) no reforço de estruturas de concreto armado começou a ser investigada na década de 70 e se consolidou como uma atraente alternativa para utilização em obras civis, principalmente em casos onde ambientes agressivos impedem a utilização de materiais susceptíveis à corrosão, como o aço. Apesar dos inúmeros desenvolvimentos positivos referentes à utilização de PRFC em estruturas civis, considera-se que existem diversas possibilidades de avanço, ainda pouco exploradas, que podem favorecer uma utilização mais eficiente, segura e racional dos sistemas PRF. O principal objetivo deste trabalho é estudar a potencialidade e eficiência de algumas alternativas de emprego da técnica de reforço por colagem de PRF, com análise do efeito de variação das fibras formadoras do compósito. Sendo assim, ensaios à flexão com carregamento estático foram executados em vigas reforçadas à flexão com fibras carbono, vidro e aramida. Os dados obtidos possibilitaram a análise dos sistemas de reforço estudados, permitindo que se indique a melhor solução de acordo com as condições as quais a estrutura está submetida.

Palavras-Chave: PRF, carbono, aramida, vidro, solução analítica, reforço.

ABSTRACT

The use of Fiber Reinforced Polymers (FRP) to post-strengthen concrete structures started to be investigated in the mid-1970s and today is recognized as an attractive technique to be used in civil structures, especially when aggressive environments prevent the use of materials that are susceptible to corrosion, such as steel. Despite the positive developments regarding the use of FRP in civil structures, some new possibilities are being considered to provide a more efficient, safe and rational use of FRP systems. The main purpose of this paper is to analyze the effects of the fiber type replacement in the performance of the FRP post strengthening technique. A experimental program was developed, to compare the behavior of reinforced concrete beams post-strengthened with Carbon, Aramid and Glass Fiber Reinforced Polymers (CFRP, AFRP, GFRP) subjected to static loading tests. These experimental results allow the analysis of the quality and shortcomings of post-strengthen systems studied and make possible the identification of the more suitable post-strengthening solution to each circumstance.

Keywords: FRP, carbon, aramid, glass, analytical solution, post-strengthening.

1 – INTRODUÇÃO

A recuperação estrutural pode ser necessária para restaurar ou aumentar capacidade resistente de estruturas existentes. De acordo com Meier (1995), um reforço estrutural é necessário quando as estruturas estão sujeitas a cargas com magnitude superior àquelas para as quais foram dimensionadas. Além disso, reforços localizados podem ser necessários durante o processo de modernização de uma construção, quando danos devido ao envelhecimento natural ou por fatores ambientais ocorrem e em casos onde erros de projeto ou execução colocam a segurança em risco. Outras razões para a execução de reforços são as

mudanças de uso da estrutura, danos devido a fatores externos ou mesmo por deficiência de projeto de parte ou de toda a estrutura.

Diversas técnicas de reforço à flexão têm sido desenvolvidas com o intuito de melhorar a capacidade em serviço ou desempenho no estado limite último. Estas técnicas consistem basicamente na adição de um material de reforço externamente, na face tracionada do elemento estrutural.

Nas últimas décadas alguns materiais não corrosivos, de alta resistência e baixo peso específico, chamados Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), desenvolvidos inicialmente para a indústria aeronáutica, começaram a ser

utilizados na engenharia civil. O uso destes materiais, colados no substrato de peças de concreto armado, começaram a ser discutidos e investigados na metade dos anos 1980, no EMPA na Suíça (Meier, 1995). Desde então, investigações sobre reforço de estruturas de concreto armado com PRF desenvolveram-se em todos os centros de pesquisa do mundo. Resultados experimentais sobre o comportamento do reforço à flexão com materiais compósitos são encontrados em Meier (1987), Saadatmanesh e Ehsani (1990), Triantafillou e Plevris (1992), Al-Sulaimani *et al* (1994), Nanni (1995), Grace *et al* (1998), El-Mihilmy e Tedesco (2000), Figueiras e Juvandes (2000), Teng *et al* (2002), Mufti (2003), Fam e Rizkalla (2003), Hollaway (2003), Ulloa (2004), Kumar *et al* (2004) e Anania *et al* (2005). No Brasil, estudos sobre reforço com PRF iniciaram há dez anos e são encontrados em Beber (1999), Fortes *et al* (2000), Salles Neto e Mello (2000), Garcez (2002), Araújo e Bittencourt (2003), Sánchez *et. al.* (2003) e Silva Filho (2005).

A maioria dos sistemas PRF usados atualmente consistem em fibras de carbono embebidas em matriz epoxídica (PRFC). De acordo com Meier (2005) a questão de qual fibra é a mais adequada é ainda assunto de longa discussão. O autor enfatiza que para recuperação de pontes, as fibras de carbono são as mais adequadas para utilização na maioria dos casos de reforço, devido, principalmente, à sua resistência aos álcalis e por não estarem sujeitas a um fenômeno chamado fadiga estática, dois argumentos muito importantes para tal aplicação.

Existem diversas razões que fazem com que as fibras de carbono sejam a alternativa mais atrativa para o reforço de estruturas de concreto. Se comparadas com o aço, as fibras de carbono podem ser cinco vezes mais leves e oito a dez vezes mais resistentes à tração. Considerando todos os tipos de fibras utilizadas para produzir PRF, as fibras de carbono têm o maior módulo e a resistência mais elevada que proporciona uma grande rigidez ao sistema, sendo a escolha ideal para aplicação em estruturas sensíveis ao peso e deslocamento vertical.

Apesar das vantagens e dos bons resultados mostrados com a técnica de reforço com PRFC, pesquisas experimentais revelam que na maioria dos casos a ruptura dos elementos reforçados é prematura. Isto significa que somente uma pequena parte da alta resistência das fibras de carbono é usada. Além disso, o relativo alto custo dos compósitos de PRFC inibe sua disseminação, especialmente nos países do terceiro mundo, os quais, na maioria das vezes, necessitam importar todos os componentes do sistema de reforço.

Recentemente, resultados observados em pesquisas sugerem o uso de novas combinações fibra-matriz com o intuito de reduzir os altos custos dos sistemas de reforço comumente utilizados. No entanto, é importante que estas combinações fibras-matriz apresentem comportamento mecânico apropriado e boa compatibilidade com outros materiais de construção.

Buscando alternativas na obtenção de diferentes sistemas compósitos, o grupo de pesquisa do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) iniciou um projeto

de pesquisa para investigar o desempenho de compósitos formados por fibras de aramida (PRFA) e vidro (PRFV) em matriz epoxídica.

As fibras de vidro apresentam baixo custo quando comparadas com o carbono e a aramida e são técnica e economicamente viáveis quando um aumento moderado de capacidade de carga é requerido. Em geral, fibras de vidro são brancas e caracterizadas pela alta resistência, módulo de elasticidade e peso específico moderados e pela baixa condutividade térmica. Dependendo da configuração do reforço, elas não apresentam rigidez suficiente, como em algumas aplicações estruturais para aviões e reforço estrutural em pontes. Outro problema relativo ao uso das fibras de vidro de baixo custo, como por exemplo as do tipo E-glass, no reforço de estruturas existentes é que elas não possuem resistência aos álcalis e sofrem ruptura por fluência quando submetidas a altos níveis de tensão. O ACI 440.2R-02 sugere que as fibras de vidro podem sustentar 30% da sua resistência última para evitar problemas com ruptura por fluência. No entanto, devido ao seu baixo custo, fibras de vidro estão entre os materiais industriais mais versáteis conhecidos atualmente e são usadas na produção de compósitos estruturais e numa larga faixa de produtos com razões específicas (Wallenberger *et al*, 2005).

As fibras de aramida são usualmente amarelas, possuem baixo peso específico e são não condutivas. Mecanicamente, as fibras de aramida apresentam uma resistência longitudinal à tração maior do que outras fibras poliméricas e, além disso, são conhecidas pela tenacidade e alta resistência ao impacto e abrasão. As fibras de aramida possuem boa resistência à degradação química e são relativamente inertes na maioria dos solventes, apesar de degradáveis em fortes ácidos e bases (Callister, 2004). Entretanto, as fibras de aramida são suscetíveis à degradação à radiação ultravioleta e são sensíveis à fluência. Comparado com os outros sistemas compósitos, o desempenho econômico e mecânico do PRFA está entre o dos formados por fibras de vidro e carbono.

É importante ressaltar que a seleção da fibra geralmente é baseada em considerações de custo, rigidez, resistência e comportamento ao longo do tempo. Dependendo do tipo de fibra utilizada, diferentes desempenhos podem ser obtidos.

Este trabalho tem por fim investigar o desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com materiais compósitos de carbono, aramida e vidro. O objetivo principal da pesquisa foi investigar a possibilidade de utilização de diferentes sistemas compósitos no reforço à flexão. Os resultados experimentais permitem analisar aspectos como o tipo de fibras, taxa de reforço, ductilidade e custos. Um modelo analítico desenvolvido considerando o comportamento tri-linear da curva carga x deslocamento foi usado para validar os resultados experimentais.

2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu de ensaios à flexão, realizados em seis vigas de concreto armado construídas e reforçadas em laboratório. Uma das vigas não recebeu

reforço e serviu como testemunho para as demais. As outras cinco vigas foram reforçadas à flexão com PRFC, PRFA e PRFV. A Tabela 1 mostra a descrição do programa experimental.

Tabela 1 – Descrição do programa experimental

Viga	Tipo de Fibra	Número de Camadas	Incremento de Carga (dimensionamento) %
CB	-	-	-
CFB_01	carbono	01	25
AFB_01	aramida	01	25
CFB_02	carbono	02	45
AFB_02	aramida	02	45
GFB_02	vidro	03	45

O reforço das vigas CFB_01 e AFB_01 foi dimensionado para aumentar em 25% a capacidade de carga das vigas, que receberam uma camada de fibra de carbono (24,74 mm²) e uma camada de fibra de aramida (42,90 mm²), respectivamente. O reforço das vigas CFB_02, AFB_02 e GFB_02 foi dimensionado para um incremento de capacidade de carga de 45%, que significou duas camadas de fibra de carbono (49,50 mm²), duas camadas de fibra de aramida (85,80 mm²) e três camadas de fibra de vidro (159 mm²), respectivamente. A viga reforçada com fibra de vidro recebeu maior número de camadas devido à suas propriedades mecânicas, que não são tão elevadas quanto às das fibras de carbono e aramida.

2.1 Características das vigas

Foram ensaiadas vigas de concreto armado de 3,0m de comprimento e seção transversal 150 x 300 mm. Todas as vigas foram armadas com duas barras de aço CA-50 de 12,5 mm na parte inferior e duas barras de aço CA-60 de 6,3 mm na parte superior. As vigas receberam estribos de aço de 6,3 mm espaçados a cada 70 mm em todo o comprimento. A Figura 1 mostra os detalhes da armadura das vigas. A tensão de escoamento das barras de aço, obtida através de ensaio de tração, foi de 578 MPa. Para o concreto foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão e o módulo de elasticidade aos 28 dias, que resultaram 41,40 MPa e 37,60 GPa, respectivamente, como valores médios.

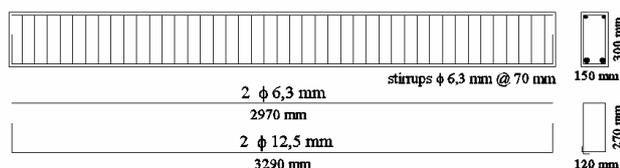


Figura 1 – Detalhes da geometria e armadura das vigas.

2.2 Sistemas de reforço

Os sistemas de reforço PRFC e PRFV foram selecionados principalmente por sua disponibilidade comercial no

mercado. Ambos são compostos por fibras unidirecionais do tipo *dry-fabrics* e resina do tipo epóxi da *Basf Construction Chemicals* (MBrace™). O sistema de reforço PRFA foi criado em laboratório com a fibra unidirecional do tipo *dry-fabric* AK-60 fabricada pela *Du Pont* e uma resina de baixa viscosidade fabricada pela *Huntsman*. As propriedades mecânicas das fibras de carbono, aramida e vidro constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades das fibras

Tipo de Fibra	Espessura	Deformação Última	Peso
	mm	%	kg/m ²
Carbono MBrace CF 130	0,165	15	0,30
Vidro MBrace EG 900	0,353	21	0,90
Aramida Du Pont AK 60	0,286	23	0,45
	Resistência à Tração	Módulo de Elasticidade	
	MPa	GPa	
Carbono MBrace CF 130	3400	227	
Vidro MBrace EG 900	1517	72,4	
Aramida Du Pont AK 60	2800	124	

As fibras de carbono, aramida e vidro foram coladas na face inferior de cada viga pela técnica de moldagem por contato, de acordo com as recomendações dos fabricantes, que incluíam os seguintes passos: preparação da superfície, aplicação do *primer*, aplicação da primeira camada de fibra e aplicação da camada superficial de resina.

Os reforços foram dimensionados de acordo com as recomendações do guia de dimensionamento ACI.440.2R-02. Ancoragens adicionais foram dimensionadas de acordo com o *German General Guidelines for Post-Strengthened Concrete Structures* do *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt) (1999, 2001a, 2001b), que segue as recomendações da norma EN 1992-1-1 (2004), parte do *Eurocode 2*. Os detalhes do esquema de reforço das vigas são mostrados na Figura 2.

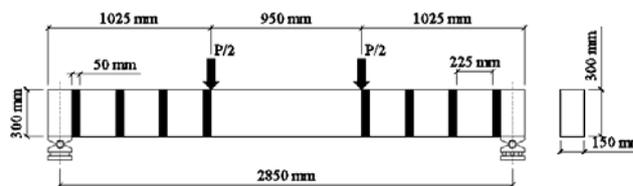


Figura 2 – Detalhes do esquema de reforço das vigas.

2.3 Ensaio e instrumentação

A fim de gerar uma região de momento fletor constante na região central das vigas, duas forças verticais simétricas espaçadas em 950 mm foram aplicadas, nos terços médios do vão livre, como mostra a Figura 3.

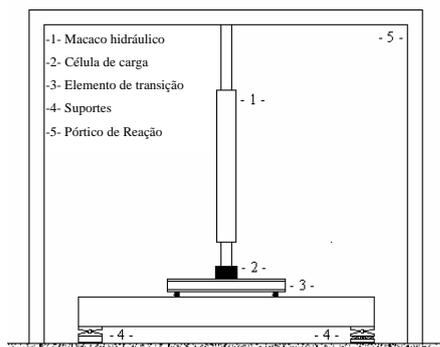


Figura 3 – Esquema de ensaio.

A fim de obter os deslocamentos no centro do vão, um LVDT foi posicionado na face inferior das vigas. As deformações específicas, no vão central, para o aço, o concreto e o reforço, foram obtidas através de extensômetros elétricos localizados na parte central das vigas. Uma célula de carga foi utilizada para o controle do carregamento durante a realização dos ensaios. Durante os ensaios, os deslocamentos, forças e deformações específicas de cada viga foram armazenados através de um sistema de aquisição de dados. O acompanhamento do desenvolvimento das fissuras foi realizado visualmente com o auxílio de um fissurômetro, a cada incremento de carga.

3 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Cargas últimas e modos de falha

As cargas últimas teóricas e experimentais, as taxas de aumento da capacidade de carga, relativas às cargas teóricas e experimentais das vigas, e os modos de ruptura das vigas reforçadas, podem ser vistos na Tabela 3.

O modo de ruptura de todas as vigas reforçadas se deu pelo descolamento do PRF, com início no vão central da viga, após o escoamento da armadura e antes do esmagamento do concreto. É importante ressaltar, no entanto, que todos os valores (exceto para a CFB_01) das cargas últimas experimentais foram mais elevados que o das cargas teóricas. O modo de ruptura observado em todas as vigas reforçadas revela a possibilidade de descolamentos provocados por deslocamentos diferenciais nas bordas de fissuras de flexão, que ocasionam zonas de tensão elevada e contribuem para o processo de descolamento PRF (Figura 4).

Na Tabela 3 pode-se observar também que o aumento na capacidade de carga foi mais significativo nas vigas CFB_02 (83,26%), AFB_02 (59,43%) e GFB_02 (77,90%), dimensionadas para ter as suas capacidades de carga aumentadas em 45%. Esta diferença provavelmente indica que os fatores de segurança utilizados no dimensionamento das vigas reforçadas foram muito conservadores. Por outro lado, a utilização de mais de uma camada de fibra aumentou consideravelmente a força de tração no PRF, propiciando uma ação mais efetiva do compósito no controle da abertura das fissuras. As ancoragens adicionais aplicadas nos vãos de cisalhamento também ajudaram a evitar falhas prematuras do PRF, pois

elas controlaram o crescimento das fissuras de cisalhamento e evitaram o surgimento de rupturas nas extremidades das vigas. É importante notar também que graças à utilização de mais camadas de fibras no reforço a largura das fissuras foi menor e adiou-se o surgimento de zonas de alta tensão nas bordas das fissuras.

Tabela 3 – Capacidade de carga e modos de falha das vigas reforçadas.

Viga	Carga Última	
	Dimensionamento	Experimental
	kN	kN
CB	80,88	103,16
CFB_01	103,26	128,68
AFB_01	102,13	134,50
CFB_02	120,48	189,06
AFB_02	118,92	164,47
GFB_02	121,16	183,53
Viga	Incremento na Capacidade de Carga	
	Dimensionamento	Experimental
	%	%
CB	-	-
CFB_01	27,67	24,74
AFB_01	26,27	30,38
CFB_02	48,96	83,26
AFB_02	47,03	59,43
GFB_02	49,80	77,90
Viga	Modos de Falha	
	Escoamento do aço da armadura	
CB	Escoamento do aço da armadura	
CFB_01	Descolamento do PRF	
AFB_01	Descolamento do PRF	
CFB_02	Descolamento do PRF	
AFB_02	Descolamento do PRF	
GFB_02	Descolamento do PRF	

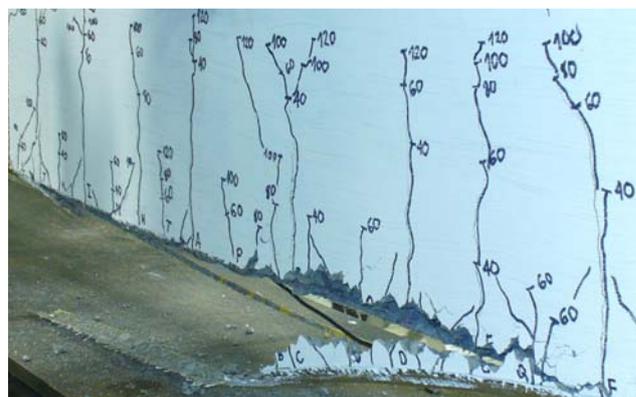


Figura 4 – Fissuras de flexão e descolamento do PRF iniciando próximo a uma borda de fissura.

3.2 Força x deslocamento no centro do vão

As curvas de força x deslocamento nas vigas reforçadas (Figura 5) mostram que o comportamento de cada protótipo varia de acordo com o tipo de sistema PRF utilizado. Observou-se que, enquanto o concreto não apresentou fissuras, todas as vigas reforçadas comportaram-se de forma semelhante à viga testemunho. Após o surgimento das fissuras, as vigas reforçadas

mostraram-se mais rígidas do que a sem reforço. As vigas GFB_02, CFB_02 e AFB_02, reforçadas para ter as suas capacidades de carga aumentadas em 45%, apresentaram comportamento similar de força x deslocamento até o momento em que a armadura começou a escoar. O mesmo ocorreu com as vigas CFB_01 e AFB_01, reforçadas para ter suas capacidades de cargas elevadas em 25%.

As cargas de fissuração, escoamento da armadura e carga última de todas as vigas reforçadas são mostradas na Tabela 4. A carga até o ponto de escoamento do aço cresceu cerca de 13% nas vigas CFB_01 e AFB_01 e cerca de 19% nas vigas GFB_02, CFB_02 e AFB_02. Após o escoamento, todas as vigas reforçadas apresentaram cargas significativamente maiores quando comparadas às da viga testemunho. Todas as vigas reforçadas romperam bruscamente e mostraram maior capacidade de carga e menor deslocamento que a viga testemunho. Os únicos indicadores de que o descolamento do reforço era iminente foram o aumento na abertura das fissuras e o descolamento da ancoragem adicional próxima ao vão central. No entanto, nenhum sinal de ruptura iminente pôde ser observado na face inferior das vigas.

Tabela 4 – Valores de carga de fissuração, escoamento da armadura e carga última e respectivos deslocamentos verticais.

Viga	Fissuração	
	Carga kN	Deslocamento mm
CB	20,24	1,65
CFB_01	20,65	1,87
AFB_01	20,65	1,87
CFB_02	25,72	2,03
AFB_02	25,18	2,20
GFB_02	29,82	2,80

Viga	Escoamento do aço da armadura	
	Carga kN	Deslocamento mm
CB	74,31	14,64
CFB_01	83,85	14,80
AFB_01	83,85	14,80
CFB_02	88,55	14,36
AFB_02	88,96	14,23
GFB_02	88,90	14,16

Viga	Carga última	
	Carga kN	Deslocamento mm
CB	103,16	81,67
CFB_01	128,68	42,20
AFB_01	134,50	51,91
CFB_02	189,06	59,31
AFB_02	164,47	52,11
GFB_02	183,53	52,10

Os resultados experimentais também revelam que, mesmo com a utilização de um módulo de elasticidade baixo da fibra de vidro, no caso do reforço da viga GFB_02, obteve-se uma resistência semelhante às da viga CFB_02 e AFB_02, graças ao número de camadas de fibra empregadas no reforço.

3.3 Fissuração

A influência do reforço externo no desenvolvimento das fissuras mostrou-se significativa. Uma comparação dos padrões de fissura das vigas reforçadas com o da viga testemunho deixa claro que as fissuras demoraram mais a surgir no primeiro grupo. Também se observou que o espaçamento entre as fissuras foi praticamente uniforme dentro da região de momento fletor constante para todas as vigas testadas.

A Tabela 5 mostra a abertura das fissuras sob um carregamento moderado (60kN), com o carregamento máximo na viga testemunho (100kN) e para cada uma das cinco vigas reforçadas.

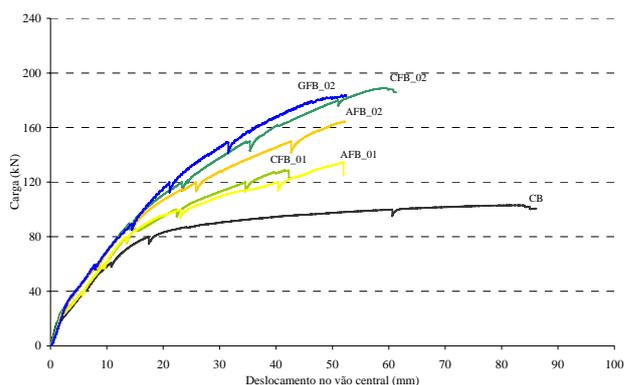


Figura 5 – Curvas carga x deslocamento das vigas reforçadas

Na viga testemunho, a primeira fissura foi observada quando o carregamento alcançou 20 kN e, na carga última (103,16 kN), as fissuras de maior largura tinham 2 mm na região de momento fletor máximo. Entre as vigas reforçadas, a maior abertura de fissura observada a 100 kN foi de 0,40 mm, nas vigas CFB_01 e AFB_01, valor cinco vezes menor do que o observado na viga testemunho. Nas vigas CFB_02, AFB_02 e GFB_01 a diferença foi ainda maior, chegando a 0,15 mm (CFB_02) e 0,20 mm (AFB_02 e GFB_02).

Os resultados experimentais também indicam que o número de fissuras não é menor nas vigas reforçadas, se comparadas a testemunho. Entretanto, a abertura das fissuras nas vigas reforçadas é significativamente menor, tendo-se em conta que os carregamentos máximos destas vigas são muito mais elevados do que o da viga testemunho.

Tabela 5 – Abertura de fissuras para 60 kN, 100 kN e carga última.

Viga	Abertura Máxima de Fissura a 60 kN	Abertura Máxima de Fissura a 100 kN	Abertura Máxima de Fissura para a Carga Máxima
	mm	mm	mm
CB	0,30	2,00	2,00
CFB_01	0,10	0,40	1,30
AFB_01	0,10	0,40	-
CFB_02	0,06	0,15	1,20
AFB_02	0,10	0,20	1,60
GFB_02	0,10	0,20	-

3.4 Ductilidade

Recentes estudos de Mufti *et al* (1996), Zou (2003) e Tann *et al* (2004), descritos e comentados por Feng *et al* (2004) e Tann *et al* (2002), propõem que a determinação da ductilidade de um elemento reforçado com PRF seja feita em termos de deformabilidade, ou seja, da capacidade do elemento reforçado absorver tanto energia elástica quanto inelástica.

Segundo Spadea *et al* (2000), o fator de desempenho (PF) proposto por Mufti *et al* (1996), que considera, além do fator de deformabilidade (DF), um fator de resistência (SF), pode ser aplicado adequadamente a estruturas de concreto armado reforçadas com PRF, na medida em que reflete os comportamentos tanto da viga não reforçada quanto da viga reforçada.

O fator de desempenho (FP) proposto por Mufti *et al* (1996) pode ser definido pelo produto entre o fator de deformabilidade e o fator de resistência.

O fator de deformabilidade (FD) é o coeficiente entre o deslocamento ou curvatura no ponto de carregamento máximo (estado limite último) e o deslocamento ou curvatura no ponto em que a deformação no concreto comprimido atinge 1‰, ponto abaixo do qual o comportamento à compressão do concreto pode ser considerado linear.

Já o fator de resistência (FR), é o coeficiente entre o carregamento máximo (estado limite último) e o carregamento no ponto em que a deformação do concreto comprimido atinge 1‰. Os autores recomendam que o valor do FP não deve ser inferior a 4 para vigas com seção transversal retangular reforçadas.

A Tabela 6 mostra os fatores de deformabilidade, resistência e desempenho para todas as vigas ensaiadas. É importante ressaltar que os coeficientes não são absolutos, mas relativos aos da viga testemunho. Mufti *et al* (1996) definem que vigas de concreto armado reforçadas com sistemas PRF devem apresentar um fator de desempenho superior a 4 para que seja garantido à viga um adequado comportamento quanto à ductilidade.

Tabela 6 – Fatores de deformabilidade, resistência e desempenho.

Viga	Deslocamento		DF
	quando $\epsilon_c = 1‰$	para a carga última	
	mm	mm	
CB	13,35	81,67	6,11
CFB_01	19,70	42,20	2,14
AFB_01	19,70	51,91	2,63
CFB_02	19,75	59,31	3,00
AFB_02	19,75	52,11	2,63
GFB_02	19,30	52,10	2,69

Viga	Carregamento		SF	PF x SF	DF
	quando $\epsilon_c = 1‰$	para a carga última			
	mm	mm			
CB	70,32	103,16	1,46	8,92	
CFB_01	95,33	128,68	1,34	2,86	
AFB_01	95,33	134,50	1,41	3,70	
CFB_02	110,05	189,06	1,71	5,13	
AFB_02	106,17	164,47	1,54	4,05	
GFB_02	112,80	183,53	1,63	4,38	

Como pode ser observado na Tabela 6, o fator de desempenho de todas as vigas reforçadas são inferiores ao da viga testemunho (8,92).

Entretanto, o fator de desempenho das vigas CFB_02 (5,13), AFB_02 (4,05) e GFB_02 (4,38), reforçadas com mais de uma camada de fibra, são mais elevados que o das vigas CFB_01 (2,86) e AFB_01 (3,70), reforçadas com somente uma camada de fibra.

Os resultados indicam que a utilização de esquemas de reforço com mais de uma camada de fibra podem ser benéficos, uma vez que, de acordo com o critério de Mufti *et al* (1996), somente as vigas CFB_02, AFB_02 e GFB_02 apresentaram adequados fatores de desempenho. A análise dos fatores de desempenho das vigas ensaiadas confirma, portanto, que a ductilidade de vigas reforçadas com sistemas PRF é fortemente influenciada pela forma como o reforço é projetado.

A utilização de ancoragens adicionais claramente refletiu em um melhor fator de resistência em todas as vigas reforçadas, uma vez que contribuiu para evitar rupturas prematuras por descolamento do reforço nas extremidades das vigas. Os resultados mostram que, se corretamente projetadas, as ancoragens adicionais podem colaborar para melhorar o comportamento de vigas reforçadas com sistemas PRF quanto à ductibilidade.

3.5 Análise de custo dos sistemas de reforço

No caso das vigas CFB_01 e CFB_02, o custo do reforço é determinado tanto pelo custo das fibras (USD\$55/m²) quanto pelo custo das formulações epóxi (USD\$29/kg), já que ambos são relativamente altos.

Na viga CFB_01 o custo total do reforço foi de USD\$85,03, soma dos custos do adesivo USD\$42,68 e da fibra USD\$ 42,35. Para a viga CFB_02 os custos do adesivo e da fibra foram, USD\$85,47 e USD\$68,14, que somados totalizam USD\$153,60.

Nos sistemas de reforço com fibras de aramida e vidro utilizados, os custos das formulações epóxi (cerca de USD\$70/kg e USD\$29/kg) foram mais significantes que o custo das fibras, considerando um custo médio de USD\$26/m² para as fibras de aramida e USD\$13/m² para as fibras de vidro.

Os custos estimados das fibras e adesivos epóxi utilizados no reforço das vigas AFB_01 (USD\$19,95 e USD\$45,41) e AFB_02 (USD\$39,89 e USD\$72,69) resultam em um custo total de reforço de USD\$65,36, para a viga AFB_01 e USD\$112,58, para a viga AFB_02. Esta redução de custo, de 23% e 27%, em relação ao das vigas reforçadas com fibras de carbono, pode se tornar ainda mais significativa se forem utilizadas formulações epóxi de menor custo nos sistemas de reforço com fibras de aramida.

Os custos da formulação epóxi (USD\$29,92) e das fibras de vidro (cerca de USD\$93,57) necessárias para reforçar a viga GFB_02 foram elevados devido a necessidade de utilização de três camadas de fibra de vidro, para compensar seu baixo módulo de elasticidade e manter o mesmo nível de reforço das vigas CFB_02 e AFB_02. Desta forma, apesar do baixo custo das fibras de

vidro em relação às demais fibras, o custo do reforço da viga GFB_02 foi elevado, já que as três camadas de fibra de vidro utilizadas exigiram uma maior quantidade de adesivo.

Os dados da Tabela 7 mostram que a viga CFB_01 apresentou o maior custo por capacidade de carga. Os resultados indicam que o custo por capacidade de carga tende a aumentar quanto maior o número de camadas utilizadas. Para a viga CFB_02, o custo por capacidade de carga foi 23% mais elevado que para a viga CFB_01.

Com relação às vigas reforçadas com PRFA, o custo do reforço por capacidade de carga da viga AFB_02 foi 41,66% superior ao da viga AFB_01.

Tabela 7 – Custo do reforço vs. Capacidade de carga.

Beam	Custo do Reforço	Capacidade de carga	Incremento na capacidade de carga	Custo / Capacidade de carga
	USD\$	kN	%	USD\$/kN
CFB_01	85,03	128,68	24,74	0,66
AFB_01	65,36	134,50	30,38	0,48
CFB_02	153,61	189,06	83,26	0,81
AFB_02	112,58	164,47	59,43	0,68
GFB_02	123,49	183,53	77,90	0,67

3.6 Considerações gerais sobre os sistemas de reforço

Os resultados experimentais mostraram que a influência do tipo de fibra no reforço das vigas não foi significativa no que diz respeito ao incremento de carga, modo de falha e fissuração, uma vez que os reforços das vigas foram dimensionados para promoverem mesmos incrementos de carga, 25% nas vigas CFB_01 e AFB_01 e 45% nas vigas CFB_02, AFB_02 e GFB_02. Considerando os resultados discutidos nas seções anteriores, todos os sistemas de reforço utilizados mostraram desempenho estrutural adequada para aplicação em estruturas de concreto armado. Desta forma, quando da seleção do sistema PRF mais adequado a cada aplicação deve-se considerar principalmente condições ambientais às quais a estrutura reforçada estará exposta e o nível de reforço requerido, além da relação custo benefício da utilização de cada sistema. Foi observado que quando elevados níveis de reforço são requeridos, a utilização de fibras com elevado módulo de elasticidade, como as de carbono, é mais conveniente. Entretanto, a mesma rigidez pode ser alcançada com a utilização de fibras de menor módulo de elasticidade, como as de aramida, se mais camadas de reforço forem utilizadas. É importante observar ainda que quanto maior o número de camadas de reforço utilizadas maior será o custo da operação de reforço. A opção pela utilização de fibras de menor módulo de elasticidade deve levar em conta ainda a quantidade de fibra presente em cada camada do produto fornecido pelo fabricante, uma vez que quanto maior a quantidade de fibras presente em cada camada menor será o número de camadas necessário.

4 – CONCLUSÕES

Resultados experimentais e numéricos de cinco vigas reforçadas à flexão com PRFC, PRFA e PRFV foram discutidos neste artigo. As vigas foram dimensionadas para ter sua capacidade de carga aumentada em cerca de 25% (CFB_01 e AFB_01) e 45% (CFB_02, AFB_02 e GFB_02). Todas as vigas reforçadas mostraram um comportamento mais rígido que o da viga testemunho, após a fissuração do concreto. A capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas foi significativamente aumentada, principalmente nas vigas projetadas para ter a capacidade de carga aumentada em 45%, sendo de 83,26% para a viga CFB_02, 49,43% para AFB_02 e 77,90% para GFB_02. Todas as vigas reforçadas romperam bruscamente em altos níveis de carga e baixos valores de deslocamentos no meio do vão, quando comparadas com a viga testemunho. Além disso, em todos os casos, as cargas últimas das vigas foram maiores do que as calculadas teoricamente.

A ancoragem adicional retardou as rupturas por descolamento do PRF nas extremidades das vigas, ajudando efetivamente no aumento da capacidade, principalmente nas vigas projetadas para um incremento de carga de 45%. O descolamento iniciou na região compreendida entre os pontos de aplicação de carga, área que concentrava a maior parte das fissuras de flexão, confirmando que os laços de ancoragem localizados na região de momento máximo foram mais solicitados que aqueles localizados nas extremidades das vigas. Os dados discutidos neste trabalho mostraram também que, quando são utilizadas mais de uma camada de fibras e ancoragens adicionais, os fatores de segurança utilizados no dimensionamento do reforço, são bastante conservativos.

A utilização dos sistemas de reforço com PRF de carbono aramida e vidro melhorou o desempenho estrutural de todas as vigas testadas, entretanto, o efeito das diferentes fibras não foi significativo, uma vez que os três sistemas de reforço apresentaram desempenho estrutural adequado.

Os resultados experimentais sugerem que os três PRF podem ser utilizados no reforço de estruturas de concreto, no entanto, é também importante considerar as condições ambientais, custos e nível de reforço necessário antes da seleção do sistema compósito.

REFERÊNCIAS

- AL-SULAIMANI, G. J., SHARIF, A., BASUNBUL, I. A., BALUCH, M., GHALEB, B. N. "Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding." ACI Structural Journal, 91(3), 458-464, 1994.
- ANANIA, L., BADALÀ, A., FAILLA, G. "Increasing the flexural performance of RC beams strengthened with CFRP materials." Construction and Building Materials, 19, 55-61, 2005.
- ARAÚJO, C. C. R., BITTENCOURT, T. N. "Procedimentos recomendados pelo ACI, FIB e JSCE para o reforço de vigas de concreto armado com compósitos de PRF." Proc. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003, CD-ROM.
- BEBER, A. J. "Reforço de estruturas de concreto com compósitos de fibra de carbono." Dissertação de Mestrado.

- Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1999.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (DIBt). Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Auflaminieren von unidirektionalen Kohlenstofffaserlaminaten (CFK-Laminate), Berlin, DE, 1999.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (DIBt). Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Einkleben von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen in Schlitze im Beton, Berlin, DE, 2001a.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (DIBt). Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Aufkleben von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen, Berlin, DE, 2001b.
- EL-MIHILMY, M.; TEDESCO, J. W. "Analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates." *Journal of Structural Engineering*, 126(6), 684-691, 2000.
- FAM, A., RIZKALLA, S. "Large scale testing and analysis of hybrid concrete/composites tubes for circular beam-column applications." *Construction and Building Materials*, 17, 507-516, 2003.
- FENG, P., YE, L., ZHAO, H., ZHUANG, J. "Review and new proposals for performance indices of flexural members." Proc. The Eighth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, Xi'an, 2004, CD-ROM.
- FIGUEIRAS, J. A., JUVANDES, L. F. P. "Reforço de estruturas de betão por colagem de sistemas FRP." Proc., Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, REPAR, Lisboa, 491-499, 2000.
- FORTES, A. S., PADARATZ, I. S., LORIGGIO, D. D. "Vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono." Proc., XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, JSIE, Montevideo, 2000, CD-ROM.
- GARCEZ, M. R. "Comportamento de vigas de concreto armado sob carregamento com mantas de fibra de carbono." Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2002.
- GRACE, N. F., SOLIMAN, A. K., ABDEL-SAYED, G., SALEK, K. R. "Behavior and ductility of simple continuous FRP reinforced beams." *Journal of Composites for Construction*, 2(4), 186-194, 1998.
- HOLLAWAY, L. C. "The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure." *Construction and Building Materials*, 17, 365-378, 2003.
- KUMAR, P., CHANDRASHEKHARA, K., NANNI, A. "Structural performance of a FRP bridge deck." *Construction and Building Materials*, 18, 35-47, 2004.
- MEIER, U. "Bridge repair with high performance composite materials." *Material und Technik*, 15, 125-128, 1987.
- MEIER, U. "Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites." *Construction and Building Materials*, 9(6), 341-351, 1995.
- MEIER, U. "Design and rehabilitation of concrete structures using advanced composite materials." Proc., Pré-Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, Porto Alegre, 2005, CD-ROM.
- MUFTI, A. A. "FRPs and FOSs lead to innovation in Canadian civil engineering structures." *Construction and Building Materials*, 17, 379-387, 2003.
- NANNI, A. "Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement." *Concrete International*. June, 22-26, 1995.
- SAADATMANESH, H., EHSANI, M. R. "Fiber composite plates can strengthen beams." *Concrete International*, 12(3), 65-71, 1990.
- SALLES NETO, M., MELO, G. A. S. A. "Vigas T de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono." Proc., XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, JSIE, Montevideo, 2000, CD-ROM.
- SÁNCHEZ, E., VELASCO, M. S. L., ARAÚJO, A. C. N., LOPES, M. T. A. "Reforço de vigas de concreto armado com materiais compósitos: análise da ductilidade à flexão e dimensionamento à força cortante." Proc. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003, CD-ROM.
- SILVA FILHO, J. N. "Análise experimental de vigas T em concreto armado reforçadas à flexão com FRP submetidas a carregamentos pseudo-estáticos e cíclicos." Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2005.
- TANN, D. B., DELPAK, R., ANDREOU, E. "Ductility and deformability of fibre composites strengthened reinforced concrete beams." Proc. International Conference on Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction, Southampton, p. 117-124, 2002.