

APLICAÇÃO DE LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO PROTENDIDOS NO REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Dra. Mônica Regina Garcez

Professora UNIPAMPA – Alegrete – Brasil

Dra. Leila Cristina Meneghetti

Professora UNIOESTE – Cascavel – Brasil

PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Professor UFRGS - Porto Alegre - Brasil

PhD. Urs Meier

Pesquisador EMPA – Dübendorf - Suíça

Resumo

A utilização de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) 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 de reforço estrutural. Com o passar dos anos, diferentes técnicas de reforço que utilizam sistemas PRF formados com fibras de carbono envolvidas em matriz epoxídica (PRFC) têm sido aplicadas. Apesar dos bons resultados obtidos, estudos experimentais mostram que a ruptura das estruturas reforçadas frequentemente acontece prematuramente, sem o esgotamento da capacidade resistente do PRFC. Sendo assim, decidiu-se estudar a potencialidade de emprego da técnica de reforço por colagem de PRFC, com análise utilização da técnica de protensão, visando um melhor aproveitamento da resistência à tração dos laminados de fibra de carbono. O programa experimental foi desenvolvido através de ensaios à flexão com carregamento estático em vigas de concreto armado reforçadas. Os resultados experimentais mostraram que dependendo da configuração de reforço utilizada, pode-se chegar à utilização plena da capacidade resistente dos laminados, o que dificilmente seria conseguido sem a protensão. Os dados obtidos são parte de um estudo sobre a viabilidade de expansão do Viaduto Felsenau, na Suíça, com a criação de duas vias adicionais de tráfego.

Palavras Chaves: fibra de carbono, reforço estrutural, protensão.

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 reinforced concrete structures. Different FRP post-strengthening techniques have been developed and applied in existing structures aiming to increase their load capacity. Most of the FRP systems used nowadays consist of carbon fibers embedded in epoxy matrices (CFRP). Regardless of the advantages shown by the CFRP post-strengthen technique, experimental studies show that, in most cases, the failure is premature. The main purpose of this paper is to analyze the effects of the composite prestressing in the performance of the FRP post strengthening technique. The experimental program was based on flexural tests on post-strengthened reinforced concrete beams subjected to static loading. Experimental results showed that depending on the post-strengthening configuration, the ultimate flexural capacity of the strips can be reached, which would not be possible without the prestressing technique. Experimental data are being used in a project that studies the viability of expanding the Felsenau Viaduct, in Switzerland, and the creation of two additional traffic lines.

Key words: carbon fiber, post-strengthening, prestressing.

1 Introdução

Intervenções em estruturas de concreto armado podem ser necessárias para restabelecer ou aumentar a capacidade de carga original destas estruturas. Segundo Garden & Hollaway ¹, a opção por reforçar ou reconstruir é baseada em fatores específicos que dependem de cada caso. Entretanto, certos pontos podem ser levados em consideração em todas as análises: período de tempo em que a estrutura ficará interditada ou com capacidade limitada, custos globais, considerando a interrupção do uso da estrutura e custos com projetos, materiais e mão de obra.

Diversas técnicas de reforço estrutural foram desenvolvidas nas últimas décadas procurando aumentar a capacidade de carga de estruturas de concreto armado. Estas técnicas consistem basicamente na adição de elementos estruturais, na sua maioria de aço, à face externa dos elementos estruturais. Visando prevenir a deterioração por corrosão, muito comum em reforços executados com elementos de aço, e promover a construção de novas e duráveis estruturas, materiais não corrosivos, de alta resistência e baixo peso começaram a ser desenvolvidos e aplicados na engenharia civil nas últimas décadas. Estes materiais, denominados Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) começaram a ser discutidos e utilizados na década de 80 no EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research) na Suíça. Naquela época, a fibra de carbono foi eleita como a mais adequada para aplicações em reforço estrutural, graças a sua não susceptibilidade à corrosão, seu baixo peso, sua alta resistência à tração e módulo de elasticidade. Desde então, numerosas aplicações foram feitas no Japão, Europa, Canadá e Estados Unidos e hoje em dia o este número vem crescendo em todo o mundo.

A grande maioria dos PRF aplicados na construção civil é fabricada com fibras de carbono, que apresentam elevados valores de módulo de elasticidade e resistência à tração. Pode-se admitir que um dos principais impedimentos para uma utilização em grande escala dos sistemas PRFC diz respeito, justamente, ao custo das fibras de carbono, que, no Brasil, pode chegar a US\$ 50,00/m². Meier, em 2001 ², argumentou que a funcionalidade e as propriedades mecânicas oferecidas pelos PRFC deveriam ser mais bem aproveitadas, já que estes materiais possuem custo relativamente alto, ressaltando que não se pode aceitar que a utilização da resistência à tração dos PRFC se restrinja a somente 10-15% de sua capacidade, como no caso de alguns sistemas colados externamente. De fato, em situações reais, o reforço é muitas vezes aplicado em estruturas já deformadas, das quais não é possível retirar todo o carregamento e que provavelmente já estão fissuradas. Nestas condições, é comum que o PRFC seja aplicado, mas não seja colocado em carga.

Com o intuito de contribuir para a evolução da técnica de reforço com PRFC, pretende-se, neste estudo, avaliar a protensão de laminados de PRFC como alternativa possibilitar uma melhor utilização da capacidade de resistência à tração dos sistemas PRFC empregados no reforço à flexão de estruturas de concreto armado. O programa experimental descrito neste artigo faz parte de um amplo projeto desenvolvido no EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research) e coordenado pelo Professor Urs Meier, que estuda a viabilidade de expansão do Viaduto Felsenau (Figura 1), em Bern, na Suíça, com a criação de duas vias adicionais de tráfego. Neste projeto, são ensaiadas em laboratório vigas

com os mesmos níveis de deformações previstos para a estrutura real, sob carregamento estático e cíclico. O projeto prevê o estudo de diferentes técnicas de reforço, com variação dos materiais formadores do compósito de reforço e variação de temperatura durante a realização dos ensaios de carregamento cíclico.

2 Reforço com laminados de PRF protendidos

Os objetivos de se protender vigas de concreto armado podem ser, segundo Garden e Mays ³, tanto aumentar as condições de serviço do sistema estrutural como estender o seu estado limite último.

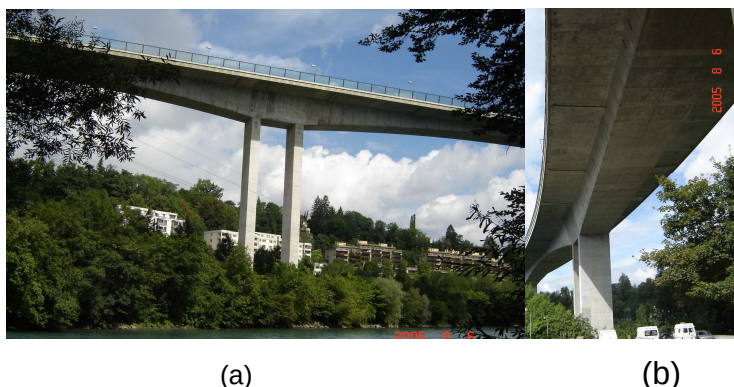


Figura 1 – Viaduto Falsenau, em Bern, na Suíça: (a) Vista lateral; (b) vista inferior.

Segundo El-Hacha ⁴, como os PRF possuem uma alta taxa resistência-peso, estes materiais podem fornecer altas forças de protensão, sem aumentar o peso próprio da estrutura. a técnica de protensão pode, ainda, retardar o aparecimento de fissuras e aumentar as condições de serviço das estruturas. Nos sistemas PRF protendidos, apenas uma porção da capacidade de deformação é utilizada para protender o PRF, ficando o restante disponível para deformações oriundas dos esforços de flexão e para uma possível reserva de segurança contra ruptura.

Nas primeiras aplicações de sistemas PRF protendidos em estruturas de concreto armado os sistemas utilizados eram compostos por cabos ou cordoalhas fabricadas com PRF. Atualmente, são comercializados diversos sistemas de protensão que utilizam barras, cordoalhas e cabos de PRF. Entretanto, existe também a possibilidade de se utilizar laminados ou sistemas curados *in situ* como elementos de protensão.

Segundo o Bulletin 14 do fib ⁵, os sistemas PRF protendidos colados externamente possuem as seguintes vantagens:

- Quando se aplicam PRF protendidos colados externamente às estruturas de concreto armado, uma grande porção de concreto permanece comprimido nos estágios iniciais de carregamento, contribuindo, assim, na resistência da estrutura. Nestes casos, o posicionamento da linha neutra indica uma grande eficiência estrutural. Isso significa que uma estrutura reforçada com PRF protendido apresenta um comportamento mais rígido em relação à mesma estrutura reforçada com PRF não protendido.
- Os sistemas PRF retardam a formação de fissuras que, quando aparecem, são mais distribuídas e possuem aberturas menores. Desta forma, a funcionalidade da estrutura reforçada é aumentada, devido à redução da fissuração.

- Os sistemas PRF protendidos atingem as mesmas taxas de reforço de sistemas PRF não-protendidos, com menos área de PRF.
- Quando comparados com os sistemas PRF não-protendidos, os sistemas PRF protendidos aumentam significativamente a carga em que ocorre o escoamento da armadura.

Além disso, em comparação com os PRF não-protendidos, a protensão proporciona os mesmos níveis de resistência com áreas bem menores de PRF, o que significa uma economia significativa de materiais, já que a resistência à tração do PRF é mais bem utilizada.

Por outro lado, o custo dos sistemas PRF protendidos é mais elevado que o dos sistemas PRF não-protendidos, devido aos sofisticados equipamentos utilizados e à maior complexidade da operação de aplicação do reforço.

Os benefícios dos sistemas PRF protendidos em termos de ductilidade, comportamento à fadiga e possível eliminação de rupturas prematuras são questões que atualmente impulsionam as pesquisas relativas ao tema.

3 Método de protensão desenvolvido por Stoecklin e Meier ⁶

Diversas formas de aplicar os sistemas PRF protendidos colados às estruturas têm sido propostas e experimentadas por pesquisadores em todo o mundo. Os diferentes métodos são baseados na aplicação da força de protensão de forma direta ou indireta, antes ou após a colagem do PRF à estrutura.

Stoecklin e Meier ⁶ introduziram um novo conceito de protensão para laminados de PRF, desenvolvido no EMPA, na Suíça. Neste método, a protensão no laminado é aplicada por um equipamento, desenvolvido pelos autores, que é fixado na própria viga. Primeiro, é realizada a protensão do laminado e, em seguida, o laminado é posicionado na viga que receberá o reforço. Como as operações para prender e protender os laminados são relativamente complicadas, devido à anisotropia do PRFC, um equipamento especial para realização da protensão do laminado, mostrado esquematicamente na Figura 2, foi desenvolvido. O equipamento de protensão consiste de duas rodas metálicas que são conectadas por uma barra de comprimento adequado à execução do reforço, como mostra a Figura 2 (a).

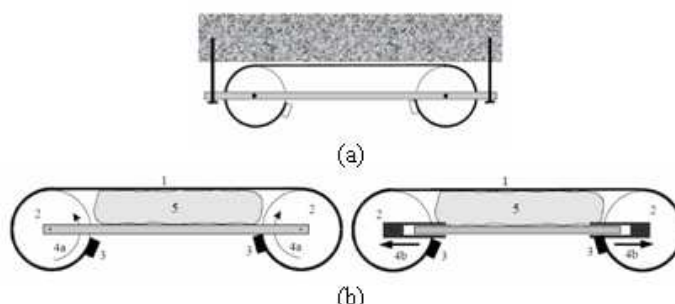


Figura 2 – Equipamento de protensão desenvolvido por Stoecklin & Meier ⁶:
(a) Posicionamento do equipamento na viga; (b) Formas de protender o PRF.

O laminado (1) é enrolado nas rodas metálicas (2) e preso nas duas extremidades (3), como mostra a Figura 2 (b). O laminado pode ser protendido pela rotação (4a) ou pelo afastamento (4b) das rodas metálicas. Como pode ser observado na Figura 2 (a), o equipamento de protensão fica fixado à viga até a cura completa do adesivo. Durante a cura do adesivo, o laminado é mantido em contato com a viga através de

um colchão de ar (5) posicionado entre o laminado e a barra metálica que une as duas rodas metálicas do equipamento de protensão (Stoecklin e Meier ⁶).

Em uma nova versão do equipamento, desenvolvida recentemente por Stoecklin e Meier ⁶, a barra de conexão entre as duas rodas foi retirada e decidiu-se que o equipamento que contém as rodas metálicas seria fixado diretamente ao elemento a ser reforçado, como pode ser observado na Figura 3. Neste caso, a protensão é realizada por reação contra a viga que receberá o reforço.



Figura 3 – Nova versão do equipamento de protensão desenvolvido por Stoecklin & Meier ⁶.

Para solucionar problemas de ancoragem nas extremidades do PRF, os autores sugerem que a força de protensão pode ser reduzida gradualmente, a partir do centro do vão, alcançando valores mínimos nas duas extremidades da viga.

Como descrito por Meier et al. ⁷, o sistema de ancoragem gradual é obtido, primeiramente, pela colagem do PRF, protendido ao seu nível máximo, na região central do vão da viga. Desta forma, após a cura do PRF da parte central da viga, a força de protensão é ligeiramente aliviada e mais duas seções de PRF são coladas, uma de cada lado do PRF colado anteriormente, com um nível de protensão menor.

Este processo é repetido até que todo o PRF esteja colado na viga. Assim, nas extremidades do PRF, o nível de protensão aplicado é muito baixo ou próximo de zero, como mostra a Figura 4. Em todas as etapas, a cura do adesivo é acelerada com o auxílio de um sistema de aquecimento. Como comprovado pelos autores, a aplicação do sistema de ancoragem gradual pode, eventualmente, dispensar outros sistemas de ancoragem.

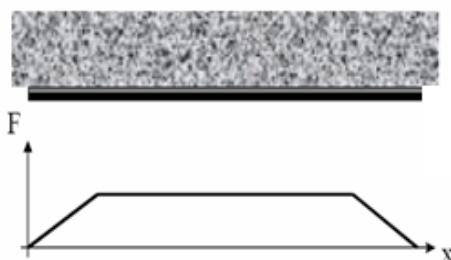


Figura 4 – Sistema de ancoragem gradual [Stoecklin & Meier ⁶].

Resultados apresentados por Stoecklin e Meier ⁶ mostraram que vigas de concreto armado reforçadas com PRFC protendidos apresentaram incrementos consideráveis na carga de ruptura, com valores até três vezes mais altos que em vigas não reforçadas. Além disso, apresentaram um menor nível de fissuração, com as primeiras fissuras aparecendo em cargas bem mais elevadas que nas vigas não reforçadas. Para as mesmas vigas, quando PRF não-protendidos foram aplicados, a

carga de fissuração foi levemente mais elevada que nas vigas não reforçadas. Devido ao retardamento no aparecimento das fissuras, as vigas reforçadas com PRFC protendidos também se mostraram mais rígidas que as não reforçadas ou reforçadas com PRFC não-protendidos.

No processo para aplicação de laminados protendidos desenvolvido por Stoecklin e Meier ⁶ os laminados são protendidos antes da aplicação na viga que receberá o reforço e, neste caso, a protensão é realizada por reação contra a viga que receberá o reforço, já que o equipamento que aplica a tensão nos laminados é fixado diretamente na viga.

Com referência às perdas imediatas por encurtamento elástico do concreto no momento em que a força de protensão é aliviada, essas poderiam ser desprezadas quando somente um laminado for protendido pelo processo desenvolvido por Stoecklin e Meier ⁶, já que o aparelho usado para protender o laminado é preso na própria viga e, portanto, a protensão é realizada por reação contra a viga que receberá o reforço. Entretanto, quando são aplicados laminados de forma sucessiva, as subseqüentes deformações sofridas pelo concreto para aplicação dos demais laminados causarão perdas por encurtamento elástico do concreto nos laminados já ancorados. Efetivamente, todas as vezes que o concreto encurtar, os laminados que já estão aplicados também encurtarão e, assim, perderão uma parte da deformação inicial aplicada.

4 Ruptura dos elementos protendidos

Estruturas reforçadas com sistemas PRF protendidos colados externamente também podem apresentar os mesmos tipos de rupturas prematuras apresentadas por sistemas convencionais de reforço com PRF, como os descritos por Teng et al. ⁸

Entretanto, nos sistemas protendidos, as altas resistências dos PRF utilizados no reforço de estruturas são mais bem aproveitadas. Dependendo da configuração do reforço, os sistemas protendidos permitem que a capacidade última do laminado seja atingida.

Garden e Hollaway ¹ apresentaram, em 1998, um estudo específico sobre os modos de falha de vigas de concreto armado reforçadas com sistemas PRF protendidos em diferentes níveis. Os autores observaram que elevados níveis de protensão são necessários para que a capacidade última à flexão do elemento estrutural reforçado seja atingida. A ruptura da maior parte das vigas reforçadas pelos autores ocorreu no PRF, que, após a primeira fratura, atingia a ruptura de forma progressiva. Na maior parte das vigas, a ruptura do PRF ocorreu antes ou após o esmagamento do concreto, sendo que, em algumas delas, o PRF rompeu sem que ocorresse o esmagamento do concreto.

Os benefícios dos sistemas protendidos podem ser ainda maiores se a ação do PRF puder ser mantida após o escoamento do aço, em níveis de carregamento próximos ao da resistência última do elemento reforçado. A aplicação da protensão no PRF antes da sua colagem na viga pode afetar os modos de ruptura deste elemento estrutural, uma vez que reduz as fissuras de cisalhamento responsáveis por eventuais rupturas prematuras. Além disso, dentro de certos limites, quanto mais elevado é o nível de protensão aplicado ao PRF, maior é o efeito de confinamento da viga, que tem como resultados a diminuição da fissuração por

cisalhamento e o conseqüente aumento na carga de ruptura da viga, quando outros modos de ruptura prematura não influem.

Segundo Garden e Mays ³, o nível de protensão aplicado é limitado pela resistência à tração do laminado. A ruptura do laminado não deve preceder o escoamento do aço da armadura interna e o esmagamento do concreto, garantido, assim, uma adequada ductilidade ao elemento reforçado. Resultados encontrados pelos autores sugerem que o nível de protensão do PRF também deve ser limitado em virtude da resistência das ancoragens, da resistência das camadas de concretos próximas à interface e da resistência ao cisalhamento na interface adesivo-PRF.

5 Programa Experimental

O programa experimental foi desenvolvido com base na aplicação de laminados protendidos de PRFC em vigas de concreto armado em escala real, e faz parte de um amplo projeto desenvolvido no EMPA e coordenado pelo Professor Urs Meier, que estuda a viabilidade de expansão do Viaduto Felsenau, em Bern, na Suíça, com a criação de duas vias adicionais de tráfego.

5.1 Matriz experimental

Foram ensaiadas a flexão quatro vigas de concreto armado: uma viga sem reforço (testemunho), uma viga reforçada com laminados de PRFC não-protendidos e duas vigas reforçadas com laminados de PRFC protendidos. Uma das duas vigas reforçadas com laminados de PRFC protendidos foi reforçada com dois laminados protendidos de seção transversal 50x1,2mm, enquanto a outra foi reforçada com quatro laminados protendidos de seção transversal 50x0,6mm. Desta forma, foram reforçadas vigas com a mesma área de reforço, porém, com diferentes distribuições, o que permitiu investigar possíveis alterações no comportamento dos elementos reforçados em função da variação do número e espessura dos laminados. O nível de protensão aplicado aos laminados foi de 35% da σ_{fu} , para a viga que recebeu dois laminados e 43% da σ_{fu} , para a viga que recebeu quatro laminados. A tensão aplicada nos laminados, compatível com o aparelho de protensão disponível, foi de 960MPa nos laminados de seção transversal 50x1,2mm e 980MPa nos laminados de seção transversal 50x0,6mm. O escopo da matriz experimental e a denominação das vigas ensaiadas podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz experimental.

Denominação das vigas	Tipo de reforço	Tipo de ensaio	Nível de protensão aplicado ao laminado
VT	Sem reforço	Flexão com carga estática	-
VFC_NP_01	Dois laminados de PRFC não protendidos		-
VFC_PE_01	Dois laminados de PRFC protendidos		35% da ε_{fu}
VFC_PE_02	Quatro laminados de PRFC protendidos		43% da ε_{fu}

5.2 Dimensionamento das vigas

As vigas ensaiadas apresentavam seção transversal de 1000x220mm e comprimento de 6500mm. Elas foram dimensionadas no Domínio 2 de deformações, sem ruptura à compressão do concreto e com o máximo alongamento

permitido para a armadura. Foram utilizadas, como armadura longitudinal, 7 barras de ϕ 12mm, que correspondem a uma taxa de armadura longitudinal $\rho = 0,0041$. Com o intuito de evitar a ocorrência de rupturas por cisalhamento devido aos incrementos de momento fletor e esforço cortante que ocorrem nas vigas reforçadas, as vigas foram dimensionadas com armadura transversal ϕ 8mm a cada 90mm, que corresponde a uma taxa de armadura transversal de $11,17\text{cm}^2/\text{m}$. A Figura 6 mostra o detalhamento das vigas.

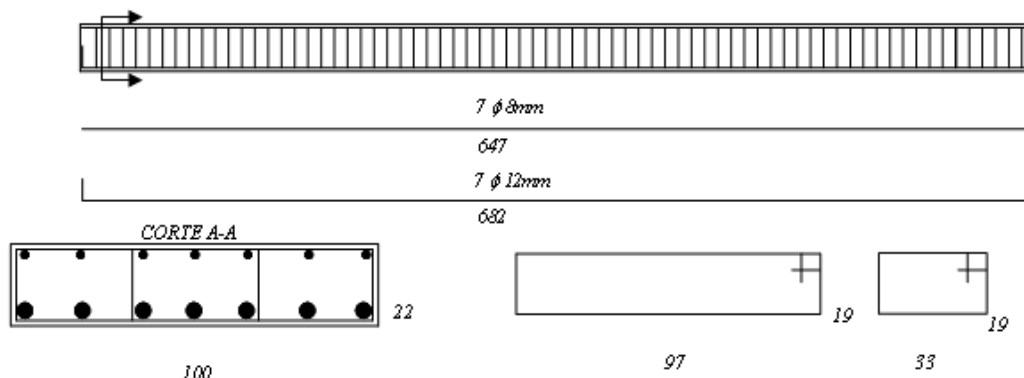


Figura 6 – Detalhamento das vigas ensaiadas.

O reforço à flexão da viga VFC_NP_01 foi dimensionado pelo Design Guide Line for S&P FRP Systems (S&P, 2006), baseado nas recomendações do Eurocode 2 e do documento German General Approval (2003). O reforço foi dimensionado para proporcionar um incremento de carga de, aproximadamente, 45% na capacidade resistente das vigas. Neste nível, a seção de concreto existente seria suficiente para resistir aos esforços de compressão, evitando, assim, o esmagamento do concreto sem a plena utilização da capacidade resistente especificada para o reforço. Para obter tal incremento na capacidade resistente das vigas, foram utilizados dois laminados de fibra de carbono de 50mm de largura e 1,2mm de espessura, colados na face inferior das vigas. Como a espessura dos laminados é bastante superior à espessura usual dos tecidos, deve-se observar que sua utilização implica em grandes limitações na sua deformação última. Como o Design Guide Line for S&P FRP Systems (S&P, 2006), seguindo as indicações do German General Approval (2003), dispensa a utilização do reforço ao cisalhamento mínimo quando o concreto sozinho resistir ao incremento de esforço cortante, tal reforço não foi utilizado. Devido à falta de norma específica para o dimensionamento de elementos de concreto armado reforçados com laminados protendidos, a verificação da capacidade resistente das vigas VFC_PE_01 e VFC_PE_02 foi realizada através de um procedimento analítico, desenvolvido por Garcez⁹.

5.3 Concreto

O concreto foi produzido no EMPA, na Suíça. Para a produção do concreto utilizado nas vigas de concreto armado, foram utilizados agregados disponíveis no EMPA e cimento do tipo CEM I 42,5. O concreto foi produzido em um misturador automático. O adensamento do concreto foi realizado de forma mecânica, através da utilização de um vibrador de imersão tipo agulha. Durante a cura do concreto, as vigas foram cobertas com lonas plásticas, até a desmoldagem, que ocorreu sete dias após a concretagem. Para caracterizar as propriedades do concreto, foram moldados dois corpos-de-prova cúbicos de 200mm de lado, de acordo com

as especificações da EN 206-1. Os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão, fornecendo valor médio de resistência à compressão de 44MPa.

5.4 Aço

Para caracterizar o comportamento à tração da armadura longitudinal, foram ensaiadas duas amostras com 500mm de comprimento para cada diâmetro de barra utilizado, de acordo com as recomendações da EN 10002-1. Os valores médios da tensão de escoamento, deformação no escoamento, tensão de ruptura e módulo de elasticidade foram, para as barras de diâmetro 8mm, 554MPa, 2,51‰, 662MPa e 220GPa. Para as barras de 12mm estes valores foram 436MPa, 1,98‰, 688MPa e 215GPa.

5.5 Sistemas de reforço

O sistema de reforço utilizado foi o sistema Sika® Carbodur e uma modificação deste sistema, com metade da espessura original do laminado. As características do sistema Sika® Carbodur, composto pelo laminado de fibra de carbono Carbodur S512 e pelo adesivo Sikadur®-30, assim como as características do laminado Carbodur S512 modificado e do adesivo Sikadur®-30LP, encontram-se na Tabela 2. A caracterização dos laminados de espessura 0,6mm foi efetuada, de forma experimental, com base nas recomendações da ISO/FDIS 527-5. Os laminados protendidos foram colados com o adesivo Sikadur®-30LP, que apresenta um pot life mais longo que a formulação original do sistema Carbodur.

Tabela 2 – Características dos sistemas de reforço utilizados.

	Laminado Carbodur S 512	Laminado Carbodur S512 modificado
Espessura (mm)	1,2	0,60
Largura (mm)	50	50
Resistência à tração (Mpa)	2.800	2.235
Deformação última (‰)	17	15
Módulo de elasticidade (MPa)	165.000	149.000
	Resina Sikadur®-30	Resina Sikadur®-30LP
Componentes	3ParteA:1Parte B	2ParteA:1Parte B
Pot life a 25°C (min)	-	60
Pot life a 35°C (min)	40	-
Pot life a 55°C (min)	-	30
Tg (°C)	62	107
Módulo de elasticidade (MPa)	12.800	10.000

5.6 Execução dos reforços

A aplicação do sistema de reforço nos laminados protendidos requer, primeiramente, a preparação da superfície de concreto. Além da preparação da superfície, se torna necessária a limpeza do laminado. A Figura 7 mostra, esquematicamente, o equipamento utilizado para protender os laminados.

O equipamento mostrado na Figura 7 permite a aplicação de somente um laminado por operação. Entretanto, existe a previsão de construção de um equipamento que permita a aplicação simultânea de até quatro laminados. Para a aplicação dos laminados protendidos, primeiramente foi aplicado o adesivo sobre a superfície do

laminado, previamente cortado nas dimensões desejadas para o reforço. Após a aplicação do adesivo, foi realizado o engate do laminado no equipamento que realiza a protensão, que já se encontrava fixado à viga que receberia o reforço.

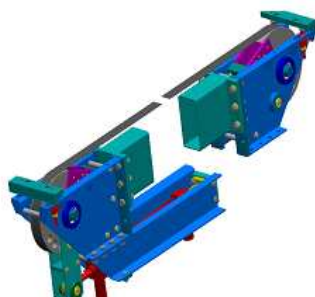


Figura 7 - Desenho esquemático do equipamento de protensão do laminado (Meier ¹⁰).

Em seguida aplicaram-se, ao longo do laminado, os termopares que servem para controlar a temperatura imposta para acelerar a cura do adesivo. A Figura 8 mostra detalhes da aplicação do adesivo em um laminado e do procedimento de engate do laminado no equipamento de protensão fixado à viga.



(a)



(b)



(c)

Figura 8 – (a) Aplicação do adesivo no laminado; (b) e (c) Engate do laminado no equipamento de protensão.

Foi empregado um sistema de ancoragem gradual, como descrito no item 2. Este sistema de ancoragem prevê que a tensão aplicada ao laminado diminua gradualmente, a partir da região central da viga, chegando a zero nas extremidades. Desta forma, o equipamento que realiza a protensão aplica a força máxima requerida na região central da viga e estimula a cura com aplicação de calor. Após a cura do adesivo da parte central da viga, a força de protensão é ligeiramente aliviada e mais duas porções de adesivo são termoestimuladas, de cada lado do trecho de PRF já curado, gerando um nível de protensão levemente inferior nessas áreas. Esse processo é repetido até que todo o PRF esteja colado na viga. Com as reduções graduais nas extremidades do PRF, o nível de protensão aplicado é muito baixo ou próximo de zero, dispensando sistemas de ancoragem adicionais. No presente estudo, independentemente do nível de protensão máxima, a termoativação foi realizada em seis etapas, gerando seis gradientes de protensão. Para os laminados de seção transversal de 50x1,2mm, com nível de protensão de

35%, a força máxima aplicada foi de 60kN no centro do vão, diminuindo, gradualmente, para 48kN, 36kN, 24kN, 12kN e, finalmente, zero nas extremidades. Para os laminados de seção transversal 50x0,6mm, com nível de protensão de 43%, a força máxima aplicada foi de 30kN no centro do vão, diminuindo, gradualmente, para 24kN, 18kN, 12kN, 6kN e, finalmente, zero nas extremidades.

5.7 Procedimento de ensaio

Noss ensaios foi empregado um esquema de ensaio de flexão em seis pontos. A viga foi colocada sobre apoios de primeira e segunda ordem, de forma a gerar uma situação estaticamente bem determinada. A carga foi aplicada em quatro pontos, dispostos em intervalos de 1200mm ao longo do vão livre de 6000mm. Esta configuração de carga permite a análise dos mecanismos de ruptura à flexão simples do concreto armado, possibilitando a obtenção de um trecho de flexão pura e quatro trechos de flexão simples. A aplicação da carga foi realizada por dois cilindros de carga, com capacidade máxima de 100kN cada um, sendo a carga transmitida à viga com auxílio de dois perfis metálicos. A cada incremento de carga foram armazenados no sistema de aquisição de dados os valores dos deslocamentos verticais no centro do vão e das deformações específicas nos materiais. Nas vigas VFC_PC_03 e VFC_PC_04, a cada incremento de carga foram armazenados também os valores obtidos através das leituras manuais do alongômetro digital, que foram transmitidos para o computador via cabo USB. O esquema de ensaio pode ser observado na Figura 9.



Figura 9 - Esquema de ensaio das vigas da segunda etapa da pesquisa.

6 Análise dos Resultados

6.1 Cargas e modos de ruptura

A Tabela 3 mostra as quatro vigas ensaiadas à flexão, o tipo de reforço aplicado, a carga e o modo de ruptura experimentados por cada viga.

Observa-se, pelas cargas de ruptura apresentadas na tabela, que o reforço com dois laminados de PRFC não-protendidos, executado na viga VFC_NP_01, aumentou a capacidade de carga da viga testemunho em apenas 27%. Os momentos resistentes determinados através dos procedimentos utilizados no dimensionamento das vigas VT e VFC_NP_01, mostrados na Tabela 6.1, aplicados em um esquema de flexão em seis pontos, representam cargas de ruptura de 70,88kN e 103,66kN. Sendo assim, as vigas VT e VFC_NP_01 romperam com cargas 41,08% e 22,52% superiores às determinadas através do dimensionamento.

O reforço da viga VFC_PE_01, que foi executado com dois laminados de PRFC protendidos, aumentou a capacidade de carga da viga testemunho em 62,41%. A viga VFC_PE_02, reforçada com quatro laminados de PRFC protendidos, porém,

com mesma área de reforço das anteriores, apresentou o melhor resultado quanto à carga de ruptura, superando a carga última da viga testemunho em 64,68%.

Tabela 3 – Cargas e modos de ruptura das vigas.

Viga	Tipo de Reforço	Carga de Ruptura	Modo de Ruptura
VT	Sem reforço	100,14kN	Escoamento do aço seguido de ruptura do concreto à compressão
VFC_NP_01	Dois laminados de seção transversal 1,2mm x 50mm não-protendidos	127,25kN	Prematura do tipo <i>peeling-off</i>
VFC_PE_01	Dois laminados de seção transversal 1,2mm x 50mm protendidos	162,41kN	Prematura do tipo <i>peeling-off</i>
VFC_PE_02	Quatro laminados de seção transversal 0,6mm x 50mm protendidos	164,68kN	Esgotamento da resistência à tração do laminado de PRFC

A diferença de cerca de 28% nos resultados apresentados pelas vigas que receberam laminados protendidos, em relação à viga que recebeu laminado não-protendido, pode ser explicada pelo próprio princípio da protensão. Quando a força de protensão aplicada aos laminados de PRFC é aliviada, são induzidas tensões de compressão no concreto. Essas tensões de compressão tendem a combater as tensões de tração atuantes no elemento estrutural reforçado durante o carregamento, retardando a fissuração do concreto e o escoamento da armadura de aço interna. Dessa forma, a capacidade de carga do elemento reforçado é aumentada.

As rupturas prematuras do tipo *peeling-off*, que caracterizaram as vigas VFC_NP_01 e VFC_PE_01, ocorreram devido às elevadas tensões de interface nas zonas próximas à extremidade do reforço. Entretanto, devido à aplicação da protensão no laminado de PRFC, a viga VFC_PE_01 rompeu com um carregamento 29,41% superior ao da viga VFC_NP_01.

A ruptura da viga VFC_PE_02, reforçada com quatro laminados de PRFC protendidos, ocorreu por esgotamento da capacidade resistente do elemento de reforço. Esse tipo de ruptura foi possível devido à combinação de dois fatores: a aplicação de quatro laminados, ao invés de dois, e a aplicação da protensão nos laminados. Observa-se, portanto, que ao aplicar a mesma área de reforço das vigas anteriores, porém, de forma mais distribuída, as tensões nas extremidades dos laminados são mais bem distribuídas para o concreto do elemento reforçado. Essa melhor condição de ancoragem, aliada com o efeito da força de protensão aplicada aos laminados, permite que se atinja a plena utilização da capacidade de carga do reforço.

Nas Figuras 10 e 11, pode-se observar os dois tipos de ruptura ocorridos nas vigas reforçadas: *peeling-off*, nas vigas VFC_NP_01 e VFC_PE_01, e ruptura por esgotamento da capacidade resistente do laminado de fibra de carbono, na viga VFC_PE_02.



Figura 10 – Viga VFC_NP_01: (a) Durante o ensaio; (b) Após a ruptura prematura do reforço.



Figura 11 – Viga VFC_PE_02: Durante o ensaio; (b) Após a ruptura do reforço por esgotamento da capacidade resistente do laminado de fibra de carbono.

As rupturas prematuras do tipo *peeling-off* geralmente ocorrem de forma catastrófica e sem aviso prévio. A Figura 10 (b) mostra os dois laminados de PRFC no momento em que se desprenderam da extremidade direita da viga VFC_NP_01. Pode-se observar que os dois laminados se desprendem totalmente da viga sem que ocorra qualquer dano no laminado, já que a ruptura ocorre na região de interface adesivo-concreto.

Quando a ruptura ocorre por esgotamento da capacidade resistente do laminado, como mostra a Figura 11 (b), a ruptura ocorre nos filamentos individuais de fibra de carbono do laminado, que continua fixo à viga e rompe de forma mais gradual.

6.2 Deslocamentos verticais no centro do vão

A Figura 12 mostra os deslocamentos verticais no centro do vão para as quatro vigas ensaiadas. Na Tabela 4, pode-se observar as cargas e os deslocamentos verticais no centro do vão que caracterizam as três fases do diagrama carga versus deslocamento da Figura 12.

O gráfico da Figura 12 mostra que todas as vigas reforçadas apresentaram comportamento similar quanto à rigidez, até a fissuração do concreto, indicando que o reforço começa a atuar no elemento estrutural somente quando o concreto já está fissurado.

A viga reforçada com laminados não-protendidos apresentou pequena variação quanto à rigidez, quando comparada com a viga testemunho. Entretanto, as vigas reforçadas com laminados protendidos apresentaram rigidez bem maior que a viga testemunho e a viga reforçada com laminados não-protendidos, devido ao aumento

da carga de fissuração do concreto e ao escoamento mais tardio do aço da armadura interna.

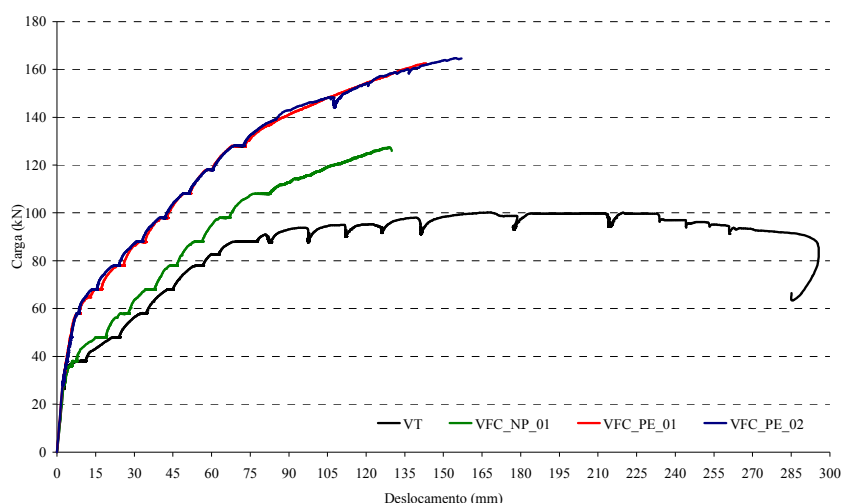


Figura 12 – Deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas ensaiadas com carregamento estático.

Os deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas VFC_PE_01 e VFC_PE_02 são, praticamente, iguais desde o início do carregamento, indicando que a aplicação de dois laminados de 1,2mm de espessura ou quatro laminados de 0,6mm não altera de forma significativa a rigidez da viga reforçada.

Tabela 4 –Valores característicos das fases do diagrama carga versus deslocamento.

Viga	Fissuração do Concreto	Escoamento do Aço	Ruptura da Viga
VT	37 kN 3,44 mm	88 kN 71,38 mm	100 kN* 219,91 mm*
VFC_NP_01	37 kN 3,44 mm	108 kN 76,93 mm	127 kN 129,48 mm
VFC_PE_01	58 kN 7,68 mm	128 kN 70,87 mm	162 kN 144,07 mm
VFC_PE_02	58 kN 7,68 mm	128 kN 70,87 mm	165 kN 157,00 mm

* Valor considerado após o escoamento do aço quando a carga atinge seu valor máximo

Pode-se observar, através dos valores apresentados na Tabela 6.3, que a viga testemunho, VT, e a viga VFC_NP_01, reforçada com laminados de PRFC não-protendidos, apresentam valores parecidos para carga e deslocamento vertical no centro do vão no momento em que ocorre a fissuração do concreto. Esse comportamento se explica pelo fato do reforço, quando não-protendido, começar a atuar no elemento estrutural reforçado somente após a fissuração do concreto.

Já a fissuração do concreto nas vigas VFC_PE_01 e VFC_PE_02, ocorreu com um carregamento 57% superior ao da fissuração do concreto nas vigas VT e VFC_NP_01. Essa diferença de comportamento, na primeira fase do diagrama carga versus deslocamento, ocorre porque a protensão dos laminados origina o desenvolvimento de tensões de compressão na face inferior da viga, região onde o concreto, normalmente, já está tracionado no início do carregamento. Sendo assim,

a quantidade de carga necessária para provocar a deformação que resulta na ruptura à tração do concreto da face inferior da viga é maior.

As diferenças nas cargas de escoamento do aço da armadura interna também foram significativas. Os acréscimos foram de 22% para a viga VFC_NP_01 e 45 % para as vigas VFC_PE_01 e VFC_PE_02, em relação à VT.

6.3 Deformações específicas nos materiais

As deformações específicas dos laminados de PRFC medidas durante a aplicação da protensão e do carregamento estático podem ser observadas na Tabela 5. Nas vigas VFC_NP_01 e VFC_PE_01, foram utilizados dois strain gauges, um em cada laminado de PRF, localizados no centro do vão da viga. A viga VFC_PE_02, reforçada com quatro laminados de PRFC, também foi instrumentada com dois strain gauges, que foram posicionados em dois laminados, de forma intercalada.

Tabela 5 – Deformações nos laminados de PRFC.

Viga	Deformação inicial devido à protensão ($\epsilon_{fp} - \text{‰}$)	Deformação na ruptura da viga ($\epsilon_f - \text{‰}$)	Deformação total no laminado ($\epsilon_{tot} = \epsilon_{fp} + \epsilon_f - \text{‰}$)	$\epsilon_{tot} / \epsilon_u$
VFC_NP_01	0,00	5,46*	5,46*	0,32
	0,00	5,46*	5,46*	0,32
VFC_PE_01	5,95	8,27	14,22	0,83
	5,95	8,31	14,26	0,83
VFC_PE_02	6,45	9,42	15,87	0,93
	6,45	9,84	16,29	0,96

* Resultados experimentais mostram que os dois *strain gauges* descolaram antes do final do ensaio.

A última deformação específica medida nos laminados de PRFC não-protendidos representa apenas 32% da capacidade de deformação desse material. Entretanto, como os strain gauges possivelmente descolaram antes do término do ensaio, a deformação do laminado provavelmente foi superior a 5,46‰.

Os laminados protendidos das vigas VFC_PE_01 e VFC_PE_02 apresentaram, na ruptura, deformações mais compatíveis com as deformações últimas dos PRFC empregados.

A utilização de quatro laminados de PRFC protendidos na viga VFC_PE_02 permitiu que a capacidade última do material fosse atingida, com, aproximadamente, 100% de aproveitamento de sua capacidade de deformação. A ruptura dos laminados da viga VFC_PE_02, que se deu por esgotamento de sua capacidade resistente à tração, ocorreu com uma deformação levemente inferior a 17‰ devido, provavelmente, ao lixamento que estes laminados sofreram para a obtenção dos 0,6mm de espessura.

Esse desempenho foi superior ao alcançado com o uso de dois laminados, na viga VFC_PE_01. Isso mostra a importância da ancoragem, pois, embora ambas as vigas tenham recebido a mesma área de reforço, a viga VFC_PE_01 apresentou ruptura prematura do tipo *peeling-off*.

6.4 Considerações sobre as perdas da força de protensão

As perdas da força de protensão nos sistemas protendidos podem ser imediatas, por encurtamento elástico do concreto, ou progressivas, por retração e deformação lenta ou fluência do concreto e por relaxação do PRF.

Como a aplicação da protensão nos laminados foi executada por reação contra a viga de concreto armado que recebeu o reforço, pois o aparelho usado para protender os laminados é preso na própria viga, as perdas imediatas por encurtamento elástico do concreto no momento que a força de protensão é aliviada poderiam ser desprezadas. Entretanto, a protensão dos laminados foi executada em duas etapas, na viga VFC_PE_01, e, em quatro etapas na viga VFC_PE_02. Portanto, após a aplicação do primeiro laminado, as subseqüentes deformações sofridas pelo concreto para aplicação dos demais laminados causarão perdas por encurtamento elástico do concreto nos laminados já ancorados.

Na viga VFC_PE_01 não houve perda por encurtamento elástico do concreto durante a aplicação do primeiro laminado, somente durante a aplicação do segundo laminado. Sendo assim, calculando-se a perda de tensão no primeiro laminado durante a aplicação do segundo laminado chega-se a um valor de 0,51MPa, o que equivale a 0,51% da tensão aplicada para protender os laminados.

Na viga VFC_PE_02, que recebeu quatro laminados de PRFC protendidos, a perda média de tensão nos laminados foi de 3,39MPa. Esse valor é superior ao da viga VFC_PE_01, já que o primeiro laminado experimenta por três vezes o encurtamento, o segundo laminado duas vezes, e o terceiro laminado uma vez. Nesse caso, a perda chega a representar 3,39% da tensão aplicada para protender os laminados.

Como os ensaios foram realizados poucos dias após a aplicação dos reforços, não houve a necessidade de determinação das perdas progressivas por retração e deformação lenta ou fluência do concreto e relaxação do PRF.

Sabe-se que as perdas progressivas por retração e deformação lenta ou fluência do concreto têm a mesma magnitude das que ocorreriam em uma viga de concreto protendido com aço. As perdas progressivas por relaxação, entretanto, são muito menores, devido às características do PRF utilizado, composto por fibras de carbono. Nesse caso, como a relaxação na fibra de carbono pode ser desprezada, considera-se, de acordo com o ACI 440.4R-04 ¹¹, 0,6 a 1,2% de perda por relaxação do polímero formador do PRF e 1 a 2% de perda pelo fator de alinhamento das fibras. As perdas progressivas por retração e deformação lenta ou fluência do concreto, que ocorrerão ao longo de 10000 dias, ficarão em torno de 3,93MPa, ou 3,93% da tensão aplicada para protender os laminados.

Somando-se as perdas imediatas e progressivas, pode-se chegar a um total de 7,64MPa para a viga VFC_PE_01 e 10,52MPa para a viga VFC_PE_02. Esses valores representam, respectivamente, 7,64% e 10,52% da tensão aplicada para protender os laminados. Esses valores têm ordem de magnitude adequada, visto que, em vigas protendidas com aço, o somatório das perdas atinge, em geral, 15 a 20% da tensão aplicada para protender o aço.

6.5 Considerações sobre o sistema de ancoragem dos laminados

A verificação do comprimento de ancoragem necessário para ancorar os laminados não-protendidos da viga VFC_NP_01 foi executada de acordo com critério o

proposto por Teng et al. ⁸, utilizando as propriedades mecânicas de cada material, sem coeficientes de redução. Os resultados numéricos mostram que o comprimento de ancoragem efetivo disponível no elemento reforçado é inferior ao comprimento necessário para a transferência das tensões de tração do laminado para o concreto. Dessa forma, a máxima tensão que pode ser transmitida do laminado para o concreto fica limitada a 1.334 MPa, valor que representa apenas 54% da resistência à tração do laminado, equivalente a uma deformação específica de 8,1‰. Os resultados experimentais da viga VFC_NP_01 mostram que a deformação máxima dos laminados no momento da ruptura do elemento reforçado foi de mais de 5,46‰. A comparação com os dados experimentais dos dois strain gauges aplicados nos laminados ficou prejudicada, porque os sensores, provavelmente, romperam antes do final do ensaio. O dimensionamento da viga VFC_NP_01, entretanto, não indicou a necessidade de utilização de ancoragem adicional, uma vez que o Design Guide Line for S&P FRP Systems (S&P, 2006), utilizado no dimensionamento, sugere que a deformação do reforço seja restringida a 7,5‰.

Na prática são aplicados sistemas de ancoragem adicionais nas extremidades dos laminados para prevenir rupturas prematuras do tipo *peeling-off*, permitindo, assim, uma melhor utilização da sua resistência à tração. Um exemplo de ancoragem adicional são os parabolts fabricados em aço ou PRF, que são, freqüentemente, empregados nas extremidades dos laminados para auxiliar na transferência das tensões para o concreto. Podem, entretanto, surgir problemas relativos à inserção dos parabolts em zonas com grande densidade de armadura. Além disso, se forem feitos furos no laminado para passagem dos parabolts, a redução de seção afetará sua capacidade de carga. Sistemas mais complexos de ancoragem adicional, empregando chapas, podem ser utilizados para contornar esses problemas. A solução mais simples, em estruturas não protendidas, é utilizar o próprio tecido de reforço para aumentar a área de ancoragem. O problema é que o tempo de endurecimento necessário para a colagem destas faixas adicionais não se harmoniza com a aplicação da protensão.

O sistema de ancoragem gradual utilizado nas vigas reforçadas com laminados protendidos funcionou de forma adequada, garantindo a ruptura das vigas reforçadas com 83% (VFC_PE_01) e 96% (VFC_PE_02) de aproveitamento da resistência à tração dos laminados. Diferentemente dos sistemas de ancoragem tradicionais, a aplicação do sistema de ancoragem gradual não exige nenhum dispositivo extra além daquele utilizado para protender o laminado, eliminando a necessidade de ancoragem externa.

7 Conclusões

Os incrementos de carga das vigas reforçadas com laminados protendidos, superiores ao da viga reforçada com laminados não-protendidos, evidenciam a eficiência da protensão dos laminados no aumento de capacidade de carga dos elementos reforçados.

Quanto aos modos de ruptura experimentados pelas vigas, pode-se concluir a aplicação do reforço de forma mais distribuída, com laminados de menor espessura, permitiu que as tensões nas extremidades dos laminados fossem mais bem distribuídas para o concreto, o que, aliado com a força de protensão aplicada inicialmente aos laminados, permitiu a plena utilização da sua resistência à tração.

Todas as vigas reforçadas apresentaram deslocamentos verticais no centro do vão inferiores aos da viga testemunho. Entretanto, o comportamento mais rígido apresentado pelas vigas reforçadas foi evidenciado somente após a fissuração do concreto. Devido ao aumento da carga de fissuração do concreto e ao escoamento mais tardio do aço da armadura interna, as vigas reforçadas com laminados protendidos, apresentaram comportamento mais rígido que a viga reforçada com laminados não-protendidos.

As perdas da força de protensão nos sistemas PRFC protendidos são inferiores às perdas que ocorrem em sistemas que utilizam aço protendido. As perdas foram maiores na viga reforçada com quatro laminados porque após a aplicação do primeiro laminado, as subseqüentes deformações sofridas pelo concreto para aplicação dos demais laminados causaram perdas por encurtamento elástico do concreto nos laminados já aplicados.

O sistema de ancoragem gradual utilizado nos sistemas PRF protendidos não exigiu a utilização de nenhum dispositivo extra além daquele utilizado para protender os laminados e funcionou de forma adequada, garantindo a ruptura das vigas reforçadas com 83% e 100% de aproveitamento da resistência à tração dos laminados.

8 Referências Bibliográficas

- 1 GARDEN, H. N. & HOLLAWAY, L. C. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. Composites Part B, volume 29B, 1998. p. 411-424.
- 2 MEIER, U. Polyfunctional use of advanced composite materials with concrete. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS, 2001, Vancouver. Anais... Vancouver: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS, 2001. [CD-Rom]
- 3 GARDEN, H. N., MAYS, G. C. Strengthening of Reinforced Concrete Structures Using Externally bonded FRP Composites in Structural and Civil Structures. Cambridge: CRC Press, 1999. 327p.
- 4 EL-HACHA, R. M. A. Prestressed CFRP for strengthening concrete beams at room and low temperatures. Kingston: Queen's University, 2000. 511p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Queen's University, 2000.
- 5 FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures - Bulletin 14. Lausanne: FIB, 2001. Technical Report – Fédération Internationale du Béton, 2001.
- 6 STÖCKLIN, I., MEIER, U. Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP. In: SIXTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRP REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES, 2003, Singapore. Anais... FRPRCS-6. 2003. [CD-Rom]
- 7 MEIER, U., STÖCKLIN, I., TERRASI, G. P. Making better use of the strength of advanced materials in structural engineering. In: FRP COMPOSITES IN CIVIL ENGINEERING, 2001, Hong Kong. Anais... Hong Kong: FRP COMPOSITES IN CIVIL ENGINEERING, 2001. [CD-Rom]
- 8 TENG, J. G., SMITH, S. T., YAO, J. e CHEN, J. F. Intermediate crack-induced in RC beams and slabs. Construction and Building Materials, volume 17, 2003, p 447 – 462.

- 9 GARCEZ, M. R. 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, Porto Alegre, 2007, 242p.
- 10 MEIER, U. Design and rehabilitation of concrete structures using advanced composite materials. In: PRE CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, 2005, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: PRECONPAT, 2005. [CD-Rom]
- 11 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons: ACI 440.4R-04. Farmington Hills, 2004. 35p.