

Post-strengthening of reinforced concrete beams with prestressed CFRP strips. Part 1: Analysis under static loading.

Reforço de vigas de concreto armado com laminados de PRFC protendidos. Parte 1: Análise sob ação de carregamento estático



M. R. GARCEZ ^a
mrgarcez@hotmail.com

G. L. C. P. SILVA FILHO ^b
lcarlos66@gmail.com

URS MEIER ^c
mrgarcez@hotmail.com

Abstract

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 and the good results shown by the CFRP post-strengthen technique, experimental studies show that, in most cases, the failure of post-strengthened structures is premature. Aiming to better use the tensile strength of the carbon fiber strips used as post-strengthening material, the application of prestressed CFRP strips started to be investigated. The main purpose of this paper is to analyze the effects of the composite prestressing in the performance of the CFRP post strengthening technique. The experimental program was based on flexural tests on post-strengthened reinforced concrete beams subjected to static – part 1 and cyclic – part 2 loading. Experimental results allowed the analysis of the quality and shortcomings of post-strengthen system studied, which resulted in valuable considerations about the analyzed post-strengthened beams.

Keywords: prestressing, FRP, strips, carbon fiber, concrete structures, fatigue.

Resumo

Diferentes técnicas de reforço que utilizam sistemas PRF formados com fibras de carbono envolvidas em matriz epoxídica (PRFC) têm sido aplicadas em todo o mundo em estruturas que necessitam aumentar recuperar sua capacidade resistente. Apesar dos bons resultados obtidos e das vantagens associadas a estas técnicas, estudos experimentais mostram que a ruptura das estruturas reforçadas frequentemente acontece de forma prematura, sem o esgotamento da capacidade resistente do PRFC. Recentemente, a utilização de PRFC protendidos começou a ser investigada, visando a um melhor aproveitamento da resistência à tração dos laminados de fibra de carbono. Dentro deste propósito, este artigo busca analisar a eficiência da técnica de protensão de compósitos laminados, através da realização de ensaios à flexão com carregamento estático – parte 1 e cíclico – parte 2. Os resultados obtidos possibilitaram a análise das qualidades e fraquezas do sistema de reforço estudado, permitindo a obtenção de considerações relevantes sobre as estruturas reforçadas estudadas.

Palavras-chave: protensão, PRF, laminados, fibra de carbono, estruturas de concreto, fadiga.

^a Dra., Federal University of Pelotas (UFPEL), mrgarcez@hotmail.com, Engineering Center, Pelotas – RS, 96010-900, Brazil.

^b PhD., Laboratory of Testing and Structural Modeling (LEME), Department of Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, lcarlos66@gmail.com, Osvaldo Aranha 99, Centro, Porto Alegre - RS, 90035-190, Brazil.

^c Doctor Honoris Causa, EMPA, Dübendorf, Suíça.

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 à face externa dos elementos estruturais.

De acordo com Täljsten [2], a técnica de reforçar estruturas através da colagem de elementos externos foi primeiramente aplicada na França, nos anos 60, quando L'Hermitte (1967) e Bresson (1971) testaram vigas reforçadas com chapas de aço coladas. Esta técnica de reforço também foi aplicada por Dussek (1974) na África do Sul e nos dois casos as estruturas reforçadas tiveram sua capacidade de carga aumentada. Estes primeiros trabalhos na França e África do Sul estimularam futuras pesquisas na Suíça (1974), Alemanha (1980), Reino Unido (1980), Japão (1981) and Bélgica (1982). Desde então a técnica de reforçar estruturas com chapas de aço se tornou viável e se consolidou com o desenvolvimento de adesivos a base de resinas epóxi, que são adequadas para garantir a adesão do elemento de concreto armado com a chapa de aço, proporcionando resistência química a muitos agentes agressivos.

Visando prevenir a deterioração por corrosão 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 (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) diz respeito, justamente, ao custo das fibras de carbono, que, no Brasil, pode chegar a US\$ 50,00/m², dependendo do sistema utilizado.

Meier, em 2001 [3], 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.

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 para possibilitar uma melhor utilização da capacidade de resistência à tração dos sistemas PRFC empregados no reforço à flexão de estruturas de concreto armado, através da realização de ensaios à flexão com carregamento estático – parte 1 e cíclico – parte 2.

2. Considerações sobre a aplicação de laminados de PRF protendidos no reforço de vigas de concreto armado

Os objetivos de se protender vigas de concreto armado podem ser, segundo Garden e Mays [4], tanto aumentar as condições de serviço do sistema estrutural como estender o seu estado limite último. Segundo El-Hacha [5], 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.

Atualmente, são comercializados diversos sistemas de protensão que utilizam barras, cordoalhas e cabos de PRF. Entretanto, existe também a possibilidade de se utilizar sistemas de reforço colados externamente, como os sistemas curados in situ e os laminados, como elementos de protensão. Segundo o Bulletin 14 do *fib* [6], 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.

Em compensação, o custo dos sistemas PRF protendidos é mais elevado que o dos sistemas PRF não-protendidos, devido aos equipamentos utilizados para aplicar a protensão e à maior complexidade da operação de aplicação do reforço.

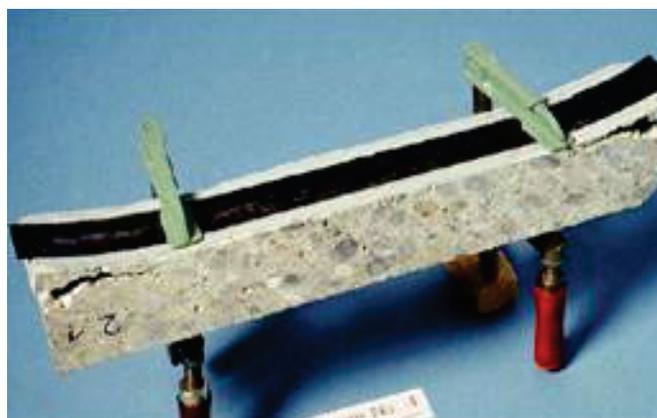
2.1 Perdas da força de protensão

Como em qualquer tipo de protensão, os sistemas PRF colados ex-

Figura 1 - (a) Ruptura prematura devido à falta de ancoragem nas extremidades do PRFC; (b) Ação do sistema de ancoragem nas extremidades do PRFC (Triantafillou et al. (8))



A



B

ternamente às estruturas também estão sujeitos a perdas ou diminuição da força de protensão que, neste caso, podem ser imediatas, por encurtamento elástico do concreto, ou progressivas, por retração e deformação lenta ou fluência do concreto e por relaxação do PRF. As perdas imediatas por encurtamento elástico do concreto, que variam de 2% a 3%, segundo o documento Bulletin 14 do *fib* [6], ocorrem quando a força de protensão é transferida do PRF para o elemento de concreto. Se a protensão é realizada pela reação direta com a viga que receberá o reforço, as perdas por encurtamento elástico do concreto podem ser desprezadas. Isto acontece porque, se o equipamento de protensão é fixado no elemento estrutural que receberá o reforço, à medida que o PRF vai sendo traçado, o concreto vai sendo comprimido, ocorrendo assim uma compensação na força aplicada para protender o laminado. Entretanto, em ambos os casos, quando se utiliza mais de um laminado de PRF, a deformação no concreto provocada pelo laminado que está sendo traçado pode também acarretar a perda de tensão nos laminados já ancorados, sendo necessário, nesse caso, a determinação da perda média de tensão por laminado.

As perdas progressivas, por retração e deformação lenta ou fluência do concreto, segundo o documento Bulletin 14 do *fib* [6], podem variar de 10 a 20% e ocorrem da mesma forma que nas estruturas de concreto protendido com aço.

As perdas que ocorrem por relaxação em um PRF dependem, segundo o ACI 440.4R-04 [7], do tipo de fibra e polímero utilizados para formar o compósito e do alinhamento das fibras. O mesmo documento informa que as perdas por relaxação podem ser desprezadas quando são utilizadas fibras de carbono, já que a relaxação nesse material é muito pequena, podendo ser considerada insignificante. Perdas de 0,6 a 1,2% também devem ser consideradas pela relaxação do polímero formador do compósito quando da transferência de forças para as fibras, e perdas de 1 a 2% devem ser consideradas devido ao fator alinhamento das fibras. Estudos de Triantafillou et al. [8] indicaram que, quando se utilizam sistemas PRFC pré-fabricados, perdas de 10% da força de protensão devem ser consideradas, devido às perdas imediatas

e progressivas no concreto e no adesivo e à relaxação do PRFC. Garden e Mays [4] consideram que os sistemas PRF protendidos também sofrem perdas da força de protensão devido à transferência de tensões de cisalhamento do adesivo para o concreto, originadas pela tração no PRF. Esta ação é suficiente para fraturar o concreto, mesmo quando os níveis de protensão são baixos, tornando obrigatória a instalação de sistemas de ancoragem nas extremidades do PRF.

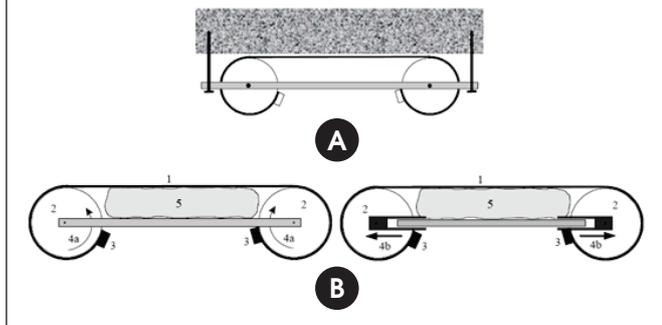
2.2 Máxima força de protensão

A Figura [01] (a), apresentada por Triantafillou et al. [8], mostra a ruptura prematura de uma viga reforçada com um laminado de PRFC, sem ancoragem, imediatamente após o alívio da força aplicada para protender o laminado. O arrancamento do laminado inicia nas extremidades da viga e ocorre devido às altas concentrações de tensões de cisalhamento e à conseqüente ruptura do concreto. Como mostra a Figura [01] (b), este tipo de ruptura pode ser prevenida com a instalação de sistemas de ancoragem nas extremidades dos laminados. Segundo os autores, a máxima força de protensão, que evita a necessidade de ancoragem, proporciona níveis de protensão muito baixos no PRF, em torno de 15 a 20%, dependendo da seção transversal de laminado utilizada. A instalação de sistemas de ancoragem nas extremidades dos PRF, reduz as deformações que surgem na camada de resina ou adesivo quando a força utilizada para aplicar a protensão é aliviada, minimizando as tensões de cisalhamento transferidas para a base da seção de concreto. Dessa forma, os sistemas de ancoragem eliminam a possibilidade de ocorrência deste tipo de ruptura prematura (El-Hacha [5]).

Segundo El-Hacha et al. [9], é consenso que níveis de protensão de, pelo menos, 25% da resistência à tração do PRF são necessários para que os incrementos de rigidez e capacidade de carga sejam significativos.

Meier [10] sugere que níveis de protensão de 50% da resistência à tração do laminado retardam rupturas prematuras, aumentan-

Figura 2 – Equipamento de protensão desenvolvido por Stoecklin & Meier (12): (a) Posicionamento do equipamento na viga; (b) Formas de protender o PRF



do a capacidade última dos elementos reforçados. Deuring [11] mostrou, através de resultados experimentais, que níveis de protensão de 50% a 75% da resistência à tração do PRF reduzem a resistência das vigas reforçadas, uma vez que provocam rupturas prematuras no PRF devido à reduzida capacidade de deformação que resta aos PRF após a aplicação da protensão.

Cabe lembrar que, quando os reforços são protendidos, o módulo de elasticidade do PRF é de fundamental importância, já que esses laminados precisam ser mais rígidos para suportar uma quantidade significativa de carga que antes era suportada somente pela armadura interna (El-Hacha, [5]).

2.3 Método de protensão desenvolvido por Stoecklin e Meier [12]

Stoecklin e Meier [12] desenvolveram um método de protensão para laminados de PRF, desenvolvido no EMPA, na Suíça, que foi patenteado. 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,

Figura 3 – Nova versão do equipamento de protensão desenvolvido por Stoecklin & Meier (12)

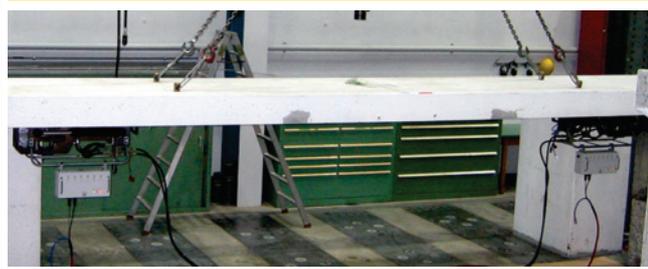
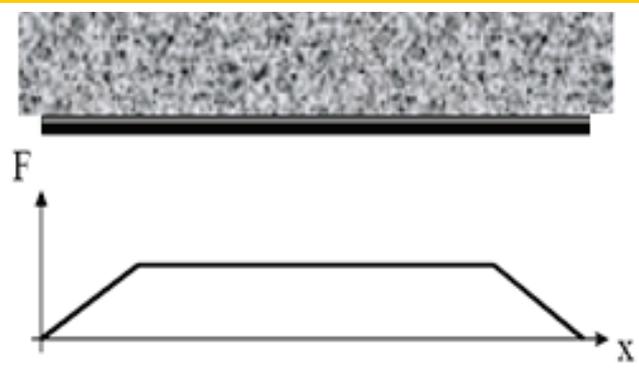


Figura 4 – Sistema de ancoragem gradual (Stoecklin & Meier (12))



mostrado esquematicamente na Figura [02], 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 [02] (a).

O laminado (1) é enrolado nas rodas metálicas (2) e preso nas duas extremidades (3), como mostra a Figura [02] (b). O laminado pode ser protendido pela rotação (4a) ou pelo afastamento (4b) das rodas metálicas. Como pode ser observado na Figura [02] (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 [12]).

Em uma nova versão do equipamento, desenvolvida recentemente por Stoecklin e Meier [12], 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 [03]. Neste caso, a protensão é realizada por reação contra a viga que receberá o reforço.

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. [13], 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 [04]. 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.

No processo para aplicação de laminados protendidos desenvolvido por Stoecklin e Meier [12] os laminados são protendidos an-

Figura 5 - Ruptura do PRF devido a movimentações diferenciais nas bordas de fissuras de flexão



Tabela 1 - Matriz experimental

Denominação das vigas	Tipo de reforço	Nível de protensão aplicado ao laminado
VT	-	-
VFC_NP_01	2 laminados de PRFC	-
VFC_PE_01	2 laminados de PRFC	35% da ϵ_{fu} do laminado

2.4 Rupturas em vigas forçadas com laminados de PRF protendidos quando submetidas a carregamento estático

tes 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 [12], 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 subsequentes 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.

Segundo Hollaway [14], a anisotropia dos materiais compósitos causa um complexo mecanismo de ruptura, que pode se caracterizar por extensivos danos nos compósitos quando submetidos a carregamentos estáticos ou cíclicos. Os níveis de danos causados, entretanto, dependem das propriedades dos materiais formadores dos compósitos e do tipo de carregamento aplicado.

Modos de ruptura clássicos em estruturas de concreto reforçadas com PRF incluem a ruptura por esmagamento do concreto à compressão, escoamento do aço ou esgotamento da resistência à tração do PRF.

Recentes estudos de Teng et al. [15] relacionam outros possíveis modos de ruptura prematuros: descolamento interfacial no extremo do reforço, descolamento interfacial induzido por fissuras de flexão intermediárias e descolamento interfacial induzido por fissuras de cisalhamento/flexão intermediárias. Segundo os autores, as rupturas prematuras podem estar associadas a dois fatores:

- As altas tensões de interface que surgem nas zonas próximas à extremidade do reforço e ocasionam o chamado peeling-off.

Figura 6 - Detalhamento das vigas ensaiadas

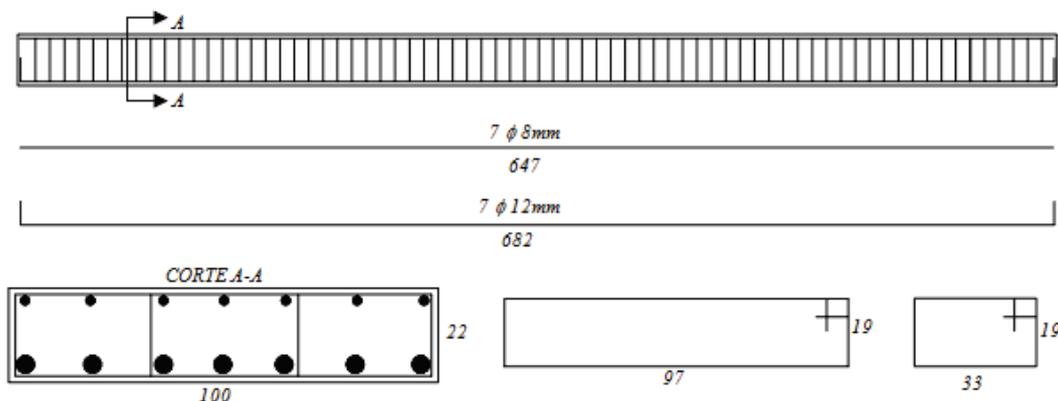


Tabela 2 – Características dos sistemas de reforço utilizados

		Laminado Carbodur S 512
Espessura (mm)		1,2
Largura (mm)		50
Resistência à tração (MPa)		2.800
Deformação última (%)		17
Módulo de elasticidade (MPa)		165.000

Componentes	Resina Sikadur®-30 3ParteA:1Parte B	Resina Sikadur®-30LP 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

- As fissuras de flexão ou flexão-cisalhamento fora da extremidade do reforço, como mostra a Figura [05].

Estruturas reforçadas com sistemas PRF protendidos colados externamente também podem apresentar as rupturas prematuras como as descritas por Teng et al. [15]. 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.

Segundo Garden e Mays [4], 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.

3. Programa experimental

3.1 Matriz experimental

Para o desenvolvimento da primeira parte do programa experimen-

Figura 7 – (a) Aplicação do adesivo; (b) e (c) Engate do laminado no equipamento de protensão

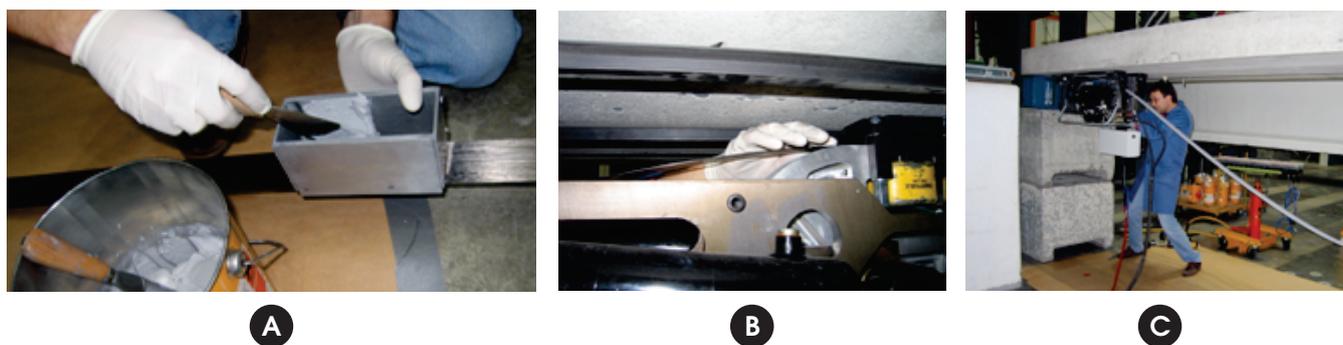
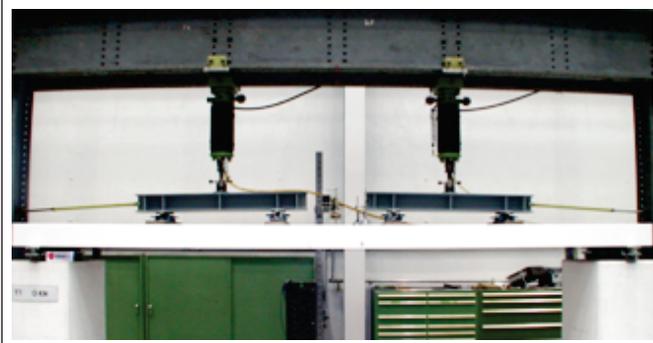


Figura 8 - Esquema de ensaio das vigas



tal, que visa analisar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com laminados de PRFC protendidos sob ação de carregamento estático, foram ensaiadas as vigas descritas na Tabela [01].

3.2 Vigas de concreto armado

As vigas ensaiadas apresentavam seção transversal de 1000x220mm e comprimento de 6500mm. Foram utilizadas, como armadura longitudinal, 7 barras de f 12mm, que correspondem a uma taxa de armadura longitudinal $r = 0,0041$. Como armadura transversal foram utilizados estribos de f 8mm a cada 90mm, que corresponde a uma taxa de armadura transversal de $11,17\text{cm}^2/\text{m}$. A Figura [06] mostra o detalhamento das vigas.

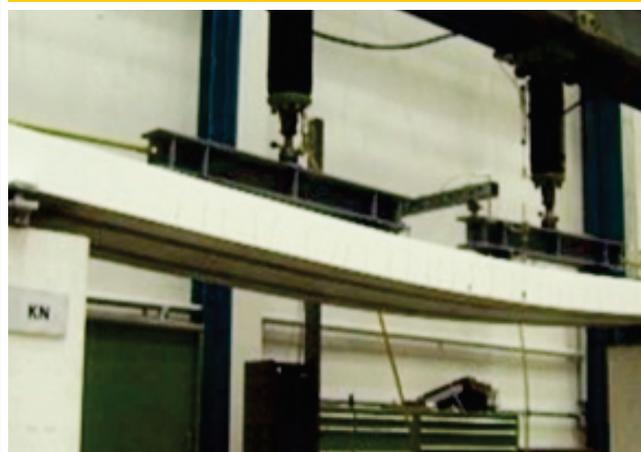
Para a produção do concreto utilizado nas vigas de concreto armado, foram utilizados agregados (areia e seixo rolado) disponíveis no EMPA e cimento do tipo CEM I 42,5, resultando em um concreto com resistência à compressão de 44MPa.

Os valores médios de ensaio de escoamento, deformação no escoamento, tensão de ruptura e módulo de elasticidade para as barras de aço de diâmetro 8mm são 554MPa, $2,51\%$, 662MPa e 220GPa. Para as barras de 12mm estes valores são 436MPa, $1,98\%$, 688MPa e 215Gpa.

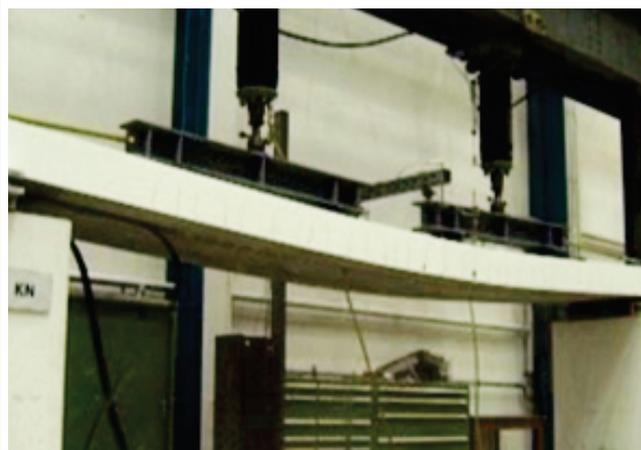
3.3 Sistema de reforço

O sistema de reforço utilizado nos reforços foi o sistema Sika $\text{\textcircled{O}}$ Carbodur, cujas características encontram-se na Tabela [02]. Os

Figura 9 - Viga VFC_NP_01: (a) Durante o ensaio; (b) Após a ruptura prematura do reforço



A



B

laminados protendidos foram colados com o adesivo Sikadur $\text{\textcircled{O}}$ -30LP, que apresenta um *pot life* mais longo que a formulação original do sistema Carbodur.

Tabela 3 - Cargas e modos de ruptura das vigas ensaiadas com carregamento estático

Viga	Tipo de Reforço	Carga de Ruptura	Modo de Ruptura
VT	-	100,14kN	Escoamento do aço seguido de ruptura do concreto à compressão
VFC_NP_01	2 laminados 1,2mm x 50mm não-protendidos	127,25kN	Prematura do tipo peeling-off
VFC_PE_01	2 laminados de 1,2mm x 50mm protendidos	162,41kN	Prematura do tipo peeling-off

3.4 Execução dos reforços

A aplicação do sistema de reforço nos laminados protendidos requer, primeiramente, a preparação da superfície de concreto e a limpeza do laminado.

Para a aplicação dos laminados protendidos, primeiramente foi aplicado o adesivo sobre a superfície do laminado. 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. 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 [07] mostra detalhes da aplicação do adesivo em um laminado e do procedimento de engate do laminado no equipamento de protensão fixado à viga.

Foi empregado um sistema de ancoragem gradual, como descrito no item 2, que prevê que a tensão aplicada ao laminado diminua gradualmente, a partir da região central da viga, chegando a zero nas extremidades. Neste sistema de ancoragem, 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.

A força máxima aplicada nos laminados foi de 60kN no centro do vão, diminuindo, gradualmente, para 48kN, 36kN, 24kN, 12kN e, finalmente, zero nas extremidades.

3.5 Procedimento de ensaio

Foi empregado um esquema de ensaio de flexão em seis pontos, com carga aplicada em quatro pontos, dispostos em intervalos de 1200mm ao longo do vão livre de 6000mm.

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. O esquema de ensaio pode ser observado na Figura [08].

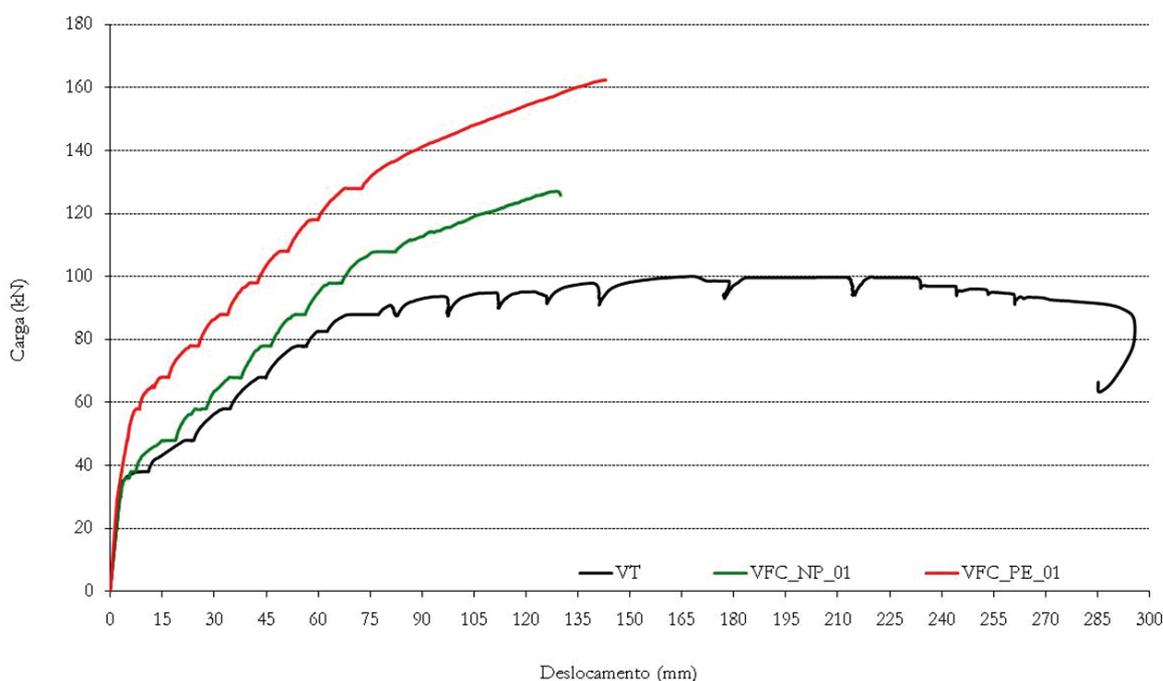
4. Resultados e discussões

4.1 Cargas e modos de ruptura

Observa-se, na Tabela [03], 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%. 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 diferença nos resultados apresentados pelas vigas que receberam laminados protendidos ou não-protendidos, 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

Figura 10 – Deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas ensaiadas com carregamento estático



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. As rupturas prematuras do tipo peeling-off geralmente ocorrem de forma catastrófica e sem aviso prévio. A Figura [09] (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.

4.2 Deslocamentos verticais no centro do vão

O gráfico da Figura [10] 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, a viga reforçada com laminados protendidos apresentou rigidez bem superior a da viga testemunho e da 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.

Pode-se observar 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 na viga VFC_PE_01 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 a viga VFC_PE_01, em relação à VT.

4.3 Sistema de ancoragem dos laminados

O sistema de ancoragem gradual utilizado nas vigas reforçadas com laminados protendidos funcionou de forma adequada, garantindo a ruptura das vigas reforçadas com 83% 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.

5. Conclusões

Os resultados obtidos permitiram que fossem investigadas as alterações no comportamento dos elementos reforçados, em função da variação do tipo de reforço aplicado, com ou sem protensão.

O incremento de carga da viga reforçada com laminados protendidos, superior ao da viga reforçada com laminados não-protendidos, evidencia a eficiência da protensão dos laminados no aumento de capacidade de carga dos elementos reforçados.

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, a viga reforçada com laminados protendidos, apresentou comportamento mais rígido que a viga reforçada com laminados não-protendidos.

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 da viga reforçada com 83% de aproveitamento da resistência à tração dos laminados.

Embora a eficiência da protensão dos laminados tenha sido comprovada através dos ensaios à flexão com carregamento estático, torna-se necessário verificar o comportamento das vigas reforçadas com laminados protendidos quando submetidas a carregamento cíclico permitindo assim que sejam investigadas possíveis alterações no comportamento dos laminados protendidos e no sistema de ancoragem utilizado, tópico que será abordado na parte 2 deste artigo.

6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e à Capes pelo auxílio financeiro para a realização da pesquisa. Da mesma forma, agradecem à equipe de pesquisadores do EMPA pela disponibilidade e auxílio durante a realização dos ensaios naquele laboratório.

7. Referências bibliográficas

- [01] 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.
- [02] TÄLJSTEN, B. Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics. Lulea: Lulea University, 1994. 190p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Lulea University, 1994.
- [03] 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]

- [04] 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.
- [05] 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.
- [06] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures - Bulletin 14. Lausanne: FIB, 2001. Technical Report – Fédération Internationale du Béton, 2001.
- [07] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons: ACI 440.4R-04. Farmington Hills, 2004. 35p.
- [08] TRIANTAFILLOU, T. C., DESKOVIC, N., DEURING, M. Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets. ACI structural Journal, volume 89, número 3, maio/junho, 1992. p. 235-244.
- [09] EL-HACHA, R., WIGHT, G., GREEN, M. F. Prestressed carbon fiber reinforced polymer sheets for strengthening concrete beams at room and low temperatures. Journal of Composites for Construction, janeiro/fevereiro, 2004. p. 3-13.
- [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] DEURING, M. Verstärken von Stahlbeton mit gestpannten Faserverbund-Werkstoffen. Dübendorf: EMPA, 1993. 276p. Report 224 – Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 1993.
- [12] 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]
- [13] 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]
- [14] HOLLAWAY, L. Polymer Composites for Civil and Structural Engineering. Hong Kong: Blackie Academic and Professional, 1993. 253p.
- [15] 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.