

Post-strengthening of reinforced concrete beams with prestressed CFRP strips Part 2: Analysis under cyclic loading

Reforço de vigas de concreto armado com laminados de PRFC protendidos Parte 2: Análise sob ação de carregamento cíclico



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

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

URS MEIER ^c
urs.meier@empa.ch

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 structure, 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

Este trabalho é parte dos estudos relacionados à aplicação de PRFC no reforço de estruturas de concreto desenvolvidos nos últimos anos pelo LEME-UFRGS, em conjunto com o EMPA. Dando continuidade à parte 1 deste artigo, que tratava sobre a aplicação de laminados de PRFC protendidos em elementos reforçados submetidos a carregamento estático, esta segunda parte pretende analisar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com laminados de PRFC protendidos quando submetidas à ação de carregamento cíclico.

2. Considerações elementos reforçados com PRFC submetidas a carregamento cíclico

A fadiga pode ser definida como um dano estrutural progressivo e permanente proveniente da ação de tensões e deformações flutuantes no tempo. Após um determinado número de ciclos de carregamento este dano pode culminar em microfissuras, que se acumulam formando danos macroscópicos, que terminam por levar à fratura completa do componente. O termo fadiga foi estabelecido pelos primeiros investigadores deste fenômeno em função de sua natureza: um processo de dano gradual causado por tensões cíclicas, de difícil observação e que provoca mudanças na capacidade resistente do material [Menehetti et al. [1]].

Quando a estrutura reforçada com PRFC está submetida a carregamentos cíclicos, os modos de ruptura observados sob carregamentos estáticos, aparentemente, passam a ser secundários, pois a falha da estrutura passa a ser definida, preferencialmente, pela ruptura prematura, por fadiga das barras de aço da armadura longitudinal de tração.

Meier U. [2] demonstrou que as barras aço da armadura longitudinal de tração de vigas de concreto armado geralmente rompem antes que o reforço, conforme pode ser observado na Figura [01], que mostra as barras de aço rompidas em uma viga de concreto armado que foi inspecionada após a ruptura em um teste de fadiga. O autor não descarta, todavia, a possibilidade de que carregamentos cíclicos sejam, potencialmente, capazes de gerar rupturas prematuras na resina ou no adesivo, trazendo efeitos negativos nas interfaces concreto-adesivo e adesivo-PRF.

Segundo Ferrier et al. [3], o desempenho e a durabilidade de uma estrutura reforçada com PRF, quando submetida a carregamentos cíclicos, dependem não só do comportamento à fadiga do PRF, mas

Figura 1 – Resultado de inspeção em viga de concreto armado após ruptura em teste de fadiga



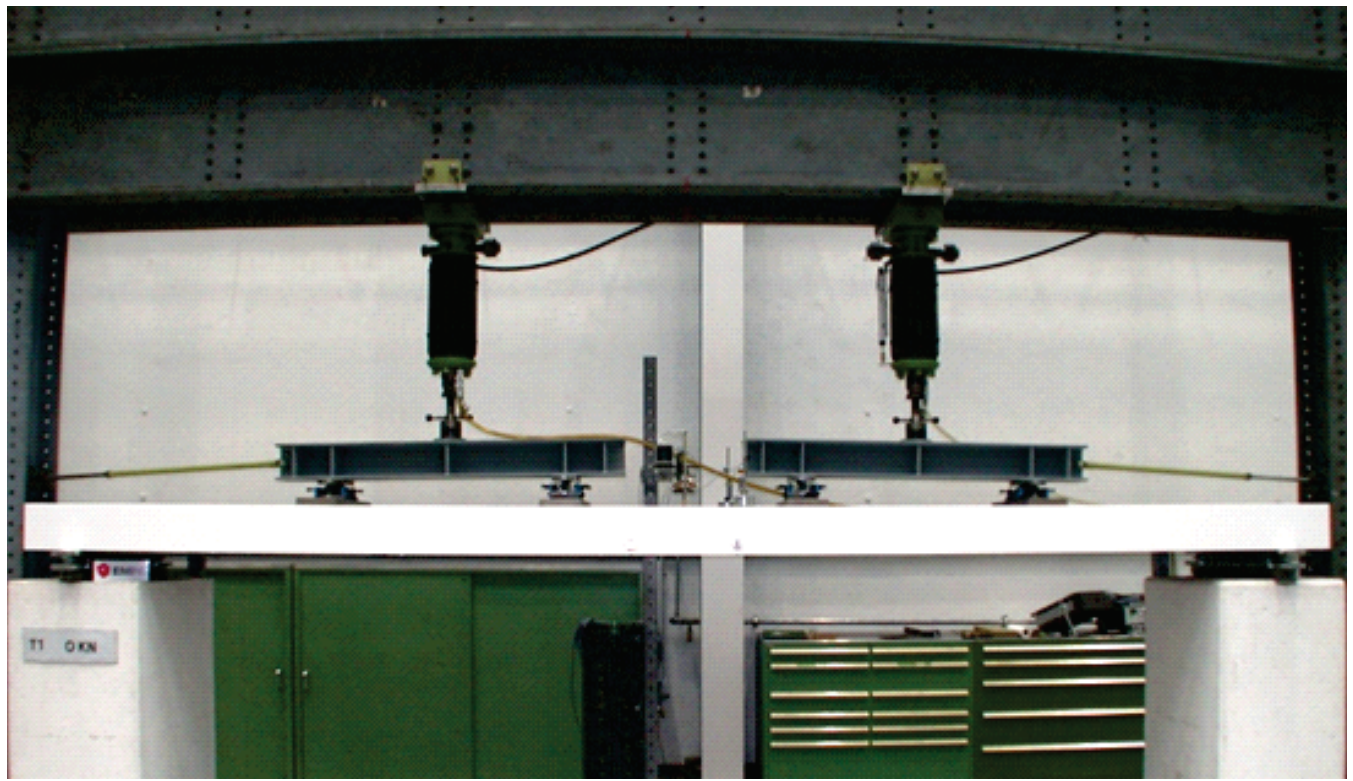
também do comportamento da interface concreto-adesivo e adesivo-PRF. O autor reforça a importância da análise destes materiais quando submetidos a carregamentos cíclicos, salientando que o tabuleiro de uma ponte de concreto localizada em uma auto-estrada experimenta, no mínimo, 58×10^8 ciclos de carga, com intensidades variadas, durante uma vida útil de 40 anos.

Tabela 1 – Matriz experimental

Denominação das vigas	Tipo de reforço	Tipo de ensaio	Nível de protensão aplicado ao laminado	Nível de tensão aplicado nos ensaios de fadiga*
VFC_PE_01	Dois laminados de PRFC protendidos	Flexão com carga estática	35% da ϵ_{fu}	-
VFC_PC_01		Flexão com carga cíclica		50% e 80%
VFC_PC_02				50% e 60%

* Percentagens relativas à carga correspondente ao escoamento do aço da armadura da viga VFC_PE_01.

Figura 2 – Esquema de ensaio das vigas da segunda etapa da pesquisa



3. Programa experimental

3.1 Matriz Experimental

Para analisar o comportamento das vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de PRFC protendidos sob carregamento cíclico foram testadas três vigas: uma foi ensaiada à flexão com carregamento estático (VFC_PE_01) e duas foram ensaiadas à flexão com carregamento cíclico (VFC_PC_01 e VFC_PC_02). As características das vigas de concreto armado, os materiais utilizados, o sistema de reforço e o sistema de ancoragem utilizados, bem como a execução dos reforços com laminados protendidos, estão descritos no item 3 da parte 1 deste artigo. O escopo da matriz experimental pode ser observado na Tabela [01]. A viga VFC_PC_01 foi ensaiada com níveis de tensão que podem ser considerados elevados, de 50% e 80% da carga em que ocorreu o escoamento do aço da viga VFC_PE_01, ensaiada com carregamento estático. Os níveis de tensão aplicados à viga VFC_PC_02, entretanto, foram mais razoáveis, de 50% e 60% da carga em que ocorreu o escoamento do aço da viga VFC_PE_01.

3.2 Procedimento de ensaio

Os ensaios foram realizados no EMPA, na Suíça. Foi empregado um esquema de ensaio de flexão em seis pontos: a viga foi posicionada sobre apoios de primeira e segunda ordem e a carga foi

Figura 3 – Viga VFC_PC_01 após a ruptura

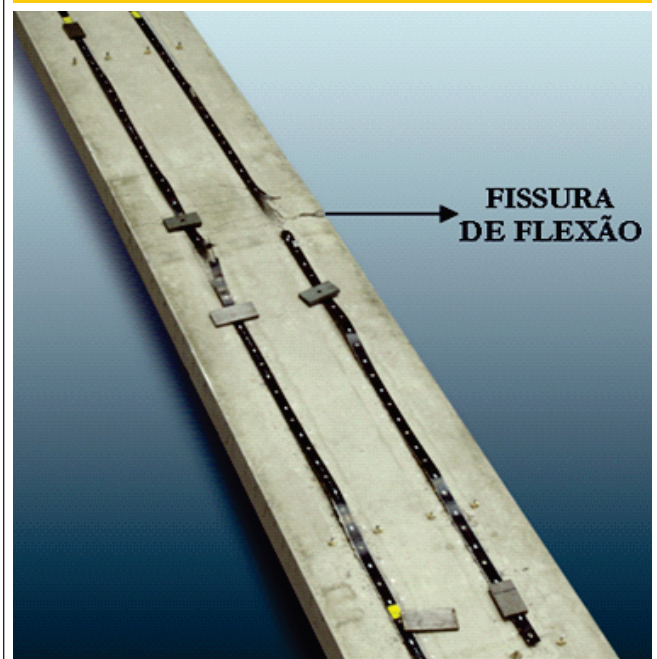
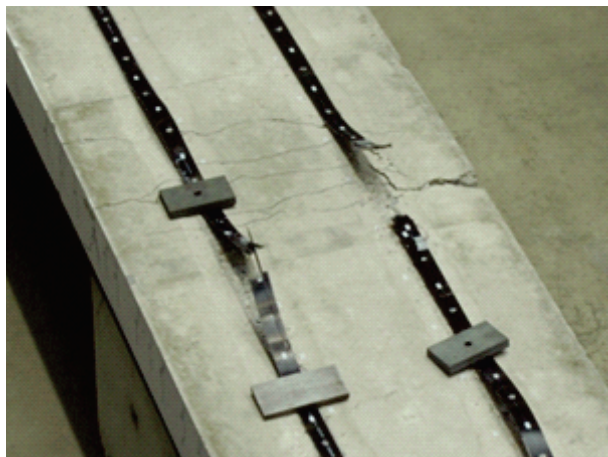
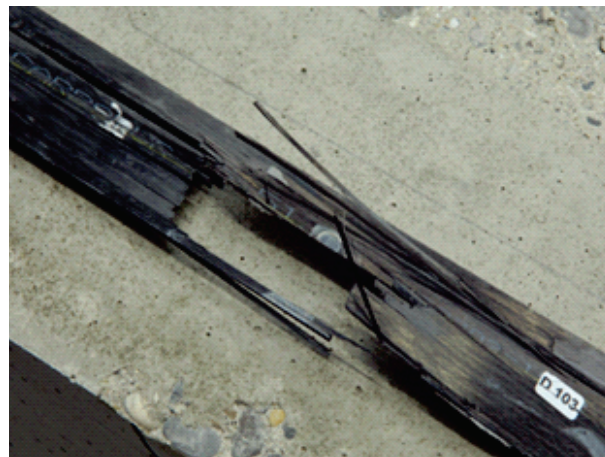


Figura 4 – Detalhes da ruptura do reforço: (a) Laminados rompidos próximo à fissura de flexão; (b) Detalhe da ruptura do laminado mais afastado da fissura



A



B

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 [02].

4. Resultados e discussões

4.1 Resultados da Viga VFC_PC_01

A viga VFC_PC_01 foi ensaiada a níveis de tensão mínima e má-

xima de 50% e 80% da carga em que ocorreu o escoamento do aço da viga VFC_PE_01, ensaiada com carregamento estático. Para produzir os níveis de tensão descritos acima foram aplicados à viga carregamentos máximo e mínimo de 40kN e 80kN que, somados ao peso próprio das vigas, de 28kN, totalizam 68kN e 108kN. Os carregamentos mínimo e máximo representam 42% e 66% da carga de ruptura da viga VFC_PE_01.

A viga VFC_PC_01 recebeu, primeiramente, um pré-carregamento de valor igual à carga máxima do ensaio de carregamento cíclico para a produção das primeiras fissuras e teste dos equipamentos. Após o pré-carregamento, iniciou-se a aplicação do carregamento cíclico com frequência de 4Hz.

Quando 282.000 ciclos foram atingidos, observou-se na viga uma fissura com abertura de 2,2mm, cuja profundidade atingia, aproximadamente, 90% da profundidade da seção. Aos 331.300 ciclos, a prensa parou automaticamente, após atingir os limites de des-

Figura 5 – Barras da armadura interna rompidas por fadiga

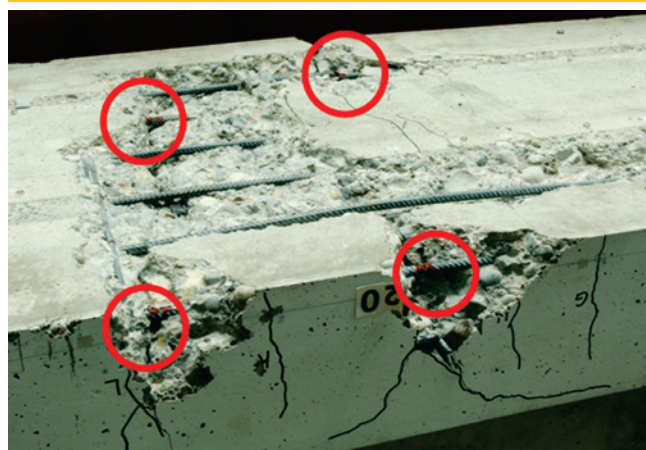


Figura 6 – Deformações específicas nas lâminas de PRFC e no concreto da viga VFC_PC_01 com um carregamento de 108kN durante o pré-carregamento

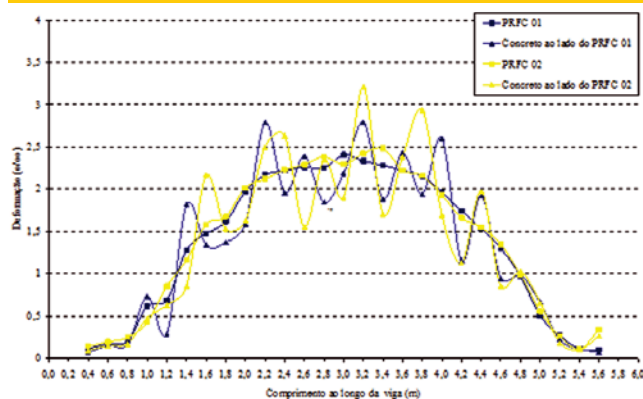
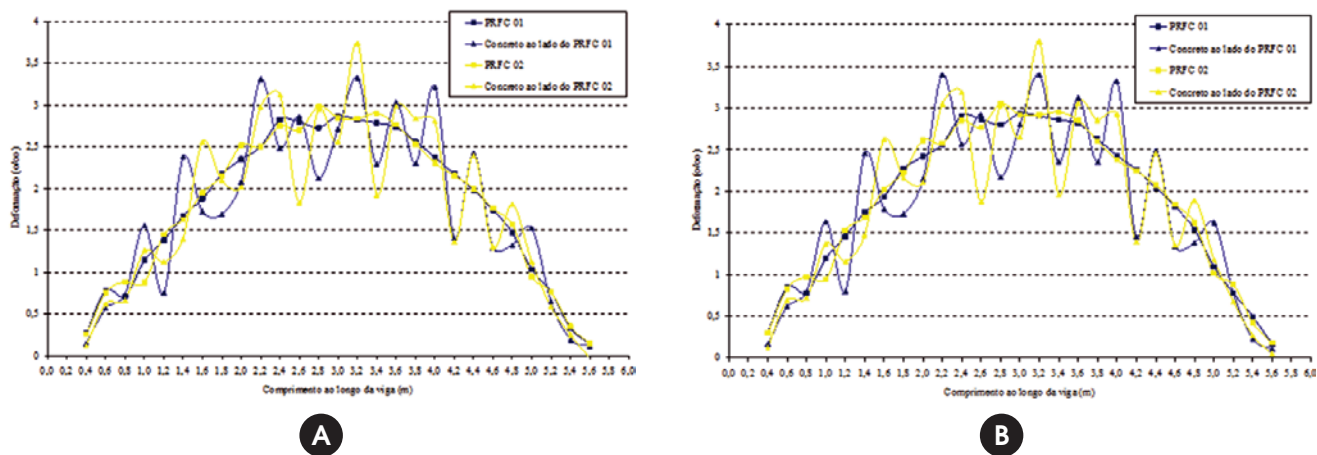


Figura 7 – Deformações específicas nas lâminas de PRFC e no concreto da viga VFC_PC_01 com um carregamento de 108kN aos (a) 30.000 ciclos e (b) aos 100.000 ciclos



locamentos pré-definidos. Observou-se que as extremidades dos laminados não apresentavam nenhum sinal de ruptura aparente. Foram, então, definidos novos limites de deslocamento, e o ensaio foi reiniciado. Pode-se, desta forma, observar a ruptura do reforço, que ocorreu de forma súbita, antes que o carregamento máximo fosse atingido, aos 331.300 ciclos. No momento em que o primeiro laminado se desprende da viga, partindo de um ponto de concentração de tensões representado por uma borda de fissura de flexão, os esforços de compressão oriundos do movimento de retorno dos laminados que estavam tracionados provocaram uma ruptura secundária por compressão nos laminados, como mostra a Figura [03].

A ocorrência da ruptura secundária, por esforços de compressão no laminado, ocorreu em uma região que, provavelmente, já estava danificada devido à presença da fissura de flexão mostrada

na Figura [03], que atingia, praticamente, 90% da profundidade da viga. A Figura [04 (b)] mostra, em detalhe, um dos dois laminados de PRFC após a ruptura da viga reforçada, onde se pode observar o aspecto visual do laminado após a ruptura.

Após a ruptura do reforço, mesmo sem abrir a viga para investigar a armadura interna, se pôde observar, através da fissura mostrada na Figura [03], que uma das barras de aço da armadura estava rompida por fadiga. Decidiu-se, então, verificar as outras barras, através da retirada do cobrimento de concreto da face inferior da viga, nesta região. A Figura [05] mostra que várias das barras da armadura interna se encontravam rompidas por fadiga.

Nas Figuras [06] e [07] podem ser observadas as deformações específicas no concreto e nos laminados de PRFC, obtidas através de elongômetros que foram posicionados ao longo da viga. As medições foram realizadas durante o pré-carregamento, aos 30.000

Figura 8 – Deformações específicas nas lâminas de PRFC 01 (a) e 02 (b) da viga VFC_PC_01 durante a aplicação do carregamento cíclico

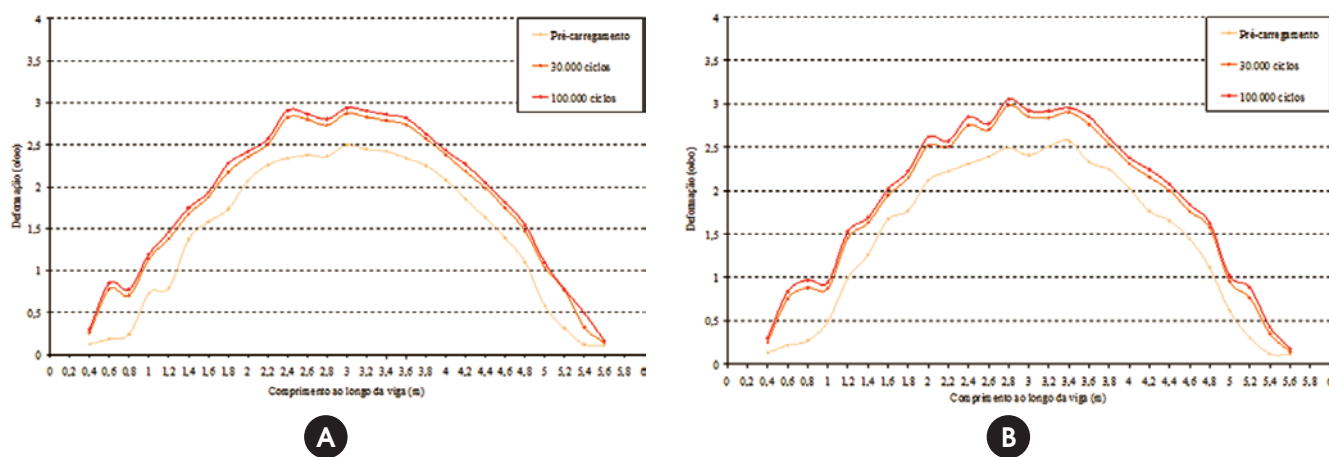
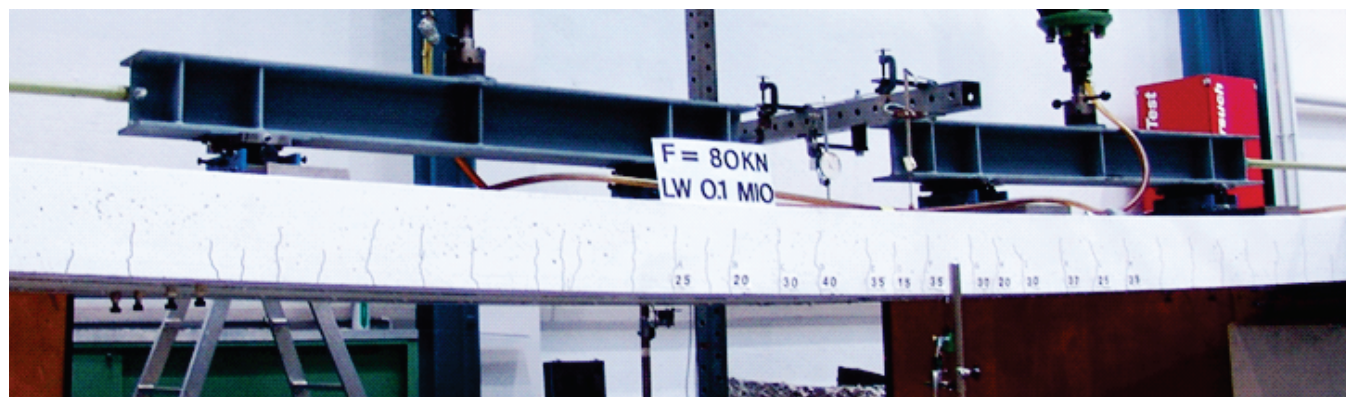


Figura 9 – Fissuras no centro do vão da viga VFC_PC_01 aos 100.000 ciclos



ciclos e aos 100.000 ciclos, com a viga submetida à carga máxima aplicada durante ensaio com carregamento cíclico (108kN).

Observa-se, nas Figuras [06] e [07], uma considerável regularidade nas medidas obtidas ao longo dos laminados de PRFC, o que permite a geração de uma curva bem definida. Entretanto, essa mesma regularidade não é observada nas medições ao longo do concreto, já que haviam fissuras posicionadas entre as bases utilizadas nas medições. De qualquer forma, as medições seguem, de forma geral, o padrão esperado.

Os gráficos mostram que as deformações específicas nos laminados de PRFC, no vão central da viga, medidas na fase de pré-carregamento, ficaram entre $2,00‰$ e $2,50‰$. Ao final de 30.000 ciclos, essas deformações subiram um pouco e ficaram entre $2,50‰$ e $3,00‰$. No intervalo de 30.000 a 100.000 ciclos não houve variação significativa nas deformações, que continuaram variando

de $2,50‰$ e $3,00‰$, embora com valores levemente mais elevados que no intervalo anterior.

Os valores encontrados, somados à deformação inicial de $5,95‰$, aplicada para protender os laminados, resultam em valores totais de deformação de $8,45‰$ e $8,95‰$.

Observa-se, também, que, principalmente na região central da viga, onde se verifica a maior parte das fissuras, as deformações no concreto e no laminado diferem de forma significativa. Essa variação indica que os dois laminados funcionam como uma cinta, impedindo a abertura das fissuras existentes no concreto dessa região. Existem, portanto, ao longo da viga, locais onde os materiais se deformam de forma diferente, indicando pontos de fragilidade, que podem, eventualmente, provocar o descolamento ou ruptura prematura do reforço.

As deformações a uma distância de 1,2m a partir das extremi-

Figura 10 – Fissuras no centro do vão da viga VFC_PC_01 aos 100.000 ciclos

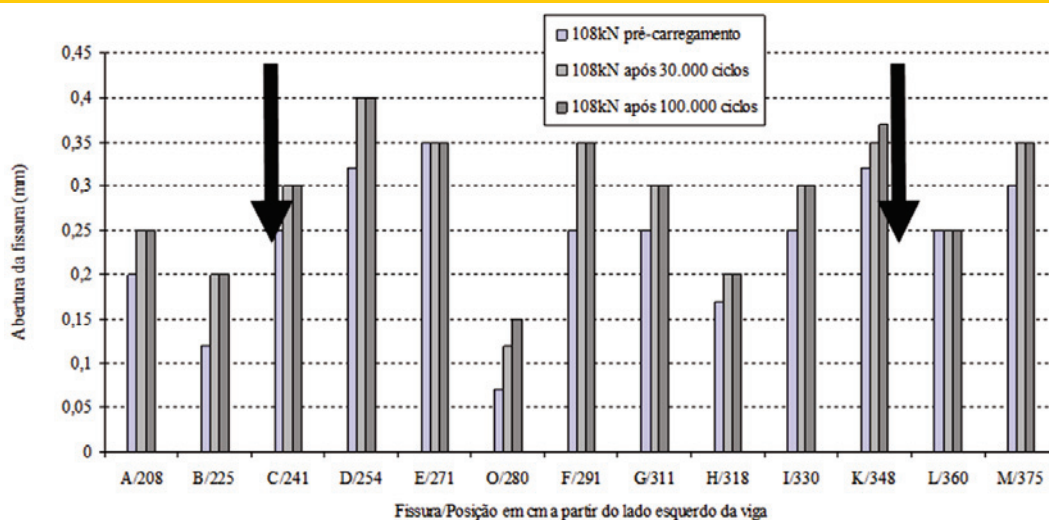
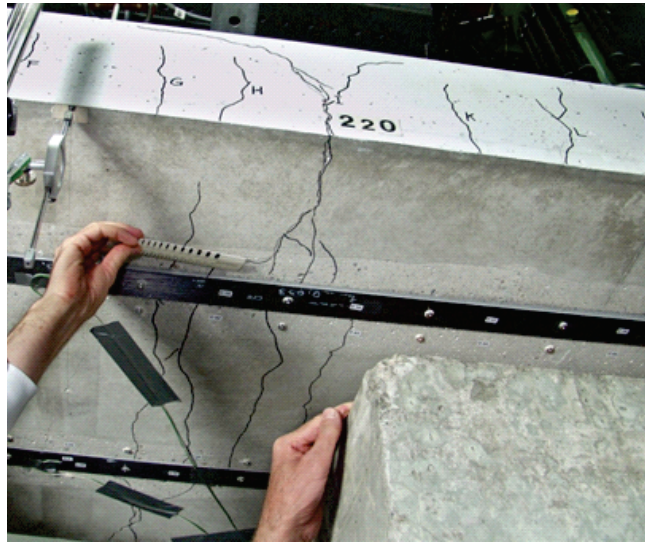


Figura 11 - Fissura de 2,2mm no centro do vão da viga VFC_PC_01 após a ruptura do reforço



dades da viga, ponto onde está localizado o primeiro dos quatro pontos de aplicação de carga ao longo da viga, não são superiores a $1,50\%$, entretanto, esses valores aumentaram cerca de 100% do pré-carregamento aos 100.000 ciclos.

Os gráficos da Figura [08] mostram o perfil das deformações específicas dos dois laminados de PRFC ao longo da viga, medidas durante o pré-carregamento, aos 30.000 ciclos e aos 100.000 ciclos. Os gráficos mostram que não houve variação significativa nas deformações específicas, e, conseqüentemente, na tensão imposta aos laminados dos 30.000 ciclos aos 100.000 ciclos. Entretanto, do pré-carregamento aos 100.000 ciclos a deformação variou, aproximadamente, $0,50\%$.

A Figura [08] mostra, ainda, que o perfil de deformações é similar

nos dois laminados até os 100.000 ciclos, indicando que, até esse ponto, os laminados se comportaram praticamente da mesma forma. Observa-se, entretanto, pequenas variações nas deformações específicas entre dois trechos consecutivos, principalmente no vão central da viga, que estava mais comprometido pela presença de fissuras, do pré-carregamento aos 100.000 ciclos.

A Figura [09] mostra a estratégia para acompanhamento da evolução das fissuras no centro do vão na viga VFC_PC_01 do pré-carregamento até as medições realizadas ao final dos 100.000 ciclos, cujos resultados podem ser observados na Figura [10]. No gráfico, o eixo das abscissas mostra a denominação das fissuras e sua posição a partir da extremidade esquerda da viga, enquanto o eixo das ordenadas mostra a abertura das fissuras em mm.

Observa-se, na Figura [10], que a maior concentração de fissuras ocorreu na região entre os quatro pontos de aplicação de carga. São mostradas as aberturas das fissuras na região submetida aos maiores momentos fletores, entre os dois pontos de aplicação de carga no vão central da viga, que são localizados no gráfico por meio de duas setas verticais. Cabe ressaltar que, até 100.000 ciclos, a abertura das fissuras próximas às duas extremidades da viga não ultrapassou 0,05mm.

Observa-se que a fissura com maior abertura, ao final dos 100.000 ciclos, era a fissura denominada D, que media 0,4mm e estava localizada a 254cm da extremidade esquerda da viga. Entretanto, a fissura de 2,2mm, que, aparentemente, provocou a ruptura do reforço da viga, aos 331.300 ciclos, foi a denominada I, que, aos 100.000 ciclos, media, apenas, 0,3mm. A Figura [11] mostra, em detalhe, a fissura I referenciada acima.

A decisão pela utilização de um elevado diferencial de tensão nos ensaios com carregamento cíclico da viga VFC_PC_01 resultou na ruptura da viga com um número de ciclos baixo, muito inferior a 5.000.000 de ciclos, estipulado como o critério para interrupção do ensaio por vida infinita. Os níveis de tensão aplicados à viga VFC_PC_02, entretanto, são mais compatíveis com os níveis de tensão atuantes em estruturas reais e permitirão uma análise mais

Figura 12 - Vigas VFC_PC_01 e VFC_PC_02: (a) Deslocamentos verticais vs número de ciclos (b) Deformações específicas vs número de ciclos para o concreto e o PRFC

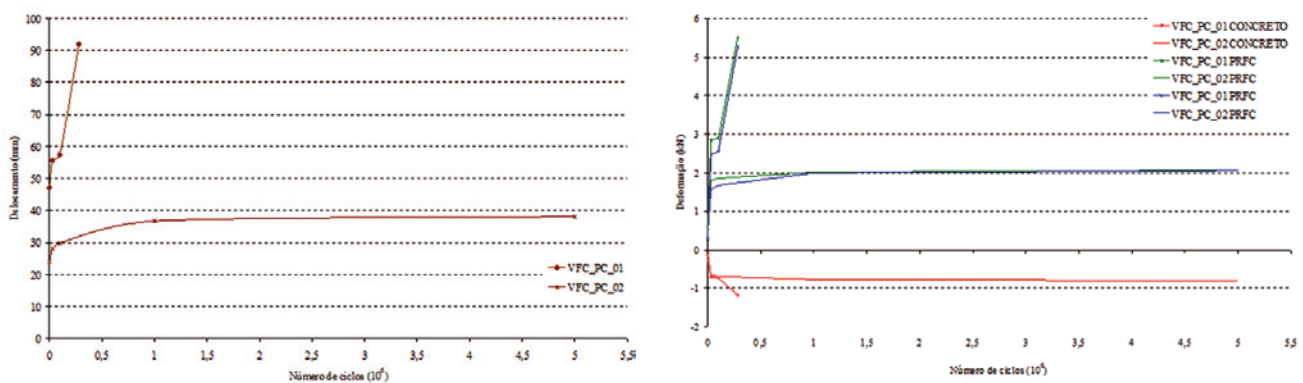
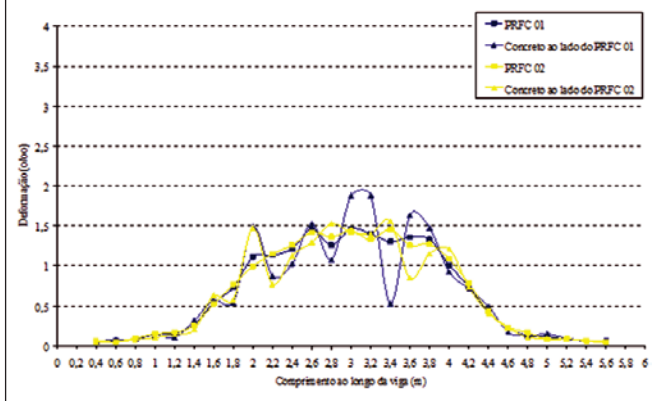


Figura 13 - Deformações específicas nas lâminas de PRFC e no concreto da viga VFC_PC_02 com um carregamento de 78kN durante o pré-carregamento



detalhada dos efeitos da aplicação do carregamento cíclico sobre a viga reforçada com a técnica utilizada para protender e ancorar os laminados.

4.2 Resultados da Viga VFC_PC_02

A viga VFC_PC_02 foi ensaiada a níveis de tensão mínima e máxima equivalentes a 50% e 60% da carga em que ocorreu o escoamento do aço da viga VFC_PE_01, ensaiada com carregamento estático. Para produzir os níveis de tensão descritos acima, foram aplicados à viga carregamentos máximo e mínimo de 50kN e 40kN que, somados ao peso próprio das vigas, de 28kN, totalizam 78kN e 68kN. Os carregamentos máximo e mínimo representam 48% e 42% da carga de ruptura da viga

Primeiramente, a viga VFC_PC_02 recebeu um pré-carregamento de valor igual à carga máxima do ensaio de carregamento cíclico, para a produção das primeiras fissuras e teste dos equipamentos.

Após o pré-carregamento, iniciou-se a aplicação do carregamento cíclico com frequência de 4Hz.

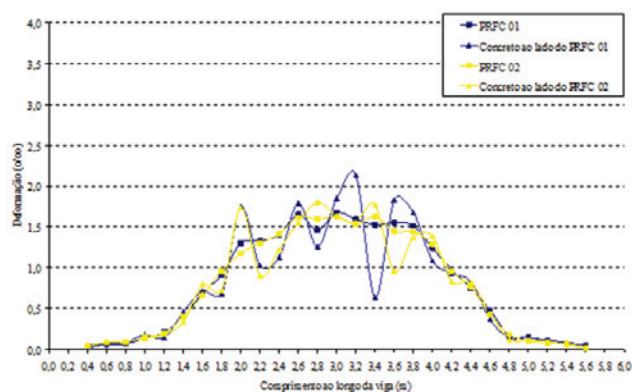
Observa-se, no gráfico da Figura [12 (a)], que os deslocamentos verticais no centro do vão da viga VFC_PC_02, para 78kN, variaram 12,70mm do pré-carregamento até 1.000.000 de ciclos. A partir desse ponto, os deslocamentos verticais variaram apenas 1,49mm até o final do ensaio, o que indica uma tendência à estabilização. Os dados da viga VFC_PC_01, para 108kN aplicados como carga máxima, mostram que, após os 100.000 ciclos, houve um incremento significativo nos deslocamentos no centro do vão, provavelmente provocado pela ruptura das barras de aço da armadura interna.

A Figura [12 (b)] mostra que o comportamento das deformações específicas no concreto e no PRFC é similar ao comportamento do deslocamento no centro do vão, onde as maiores alterações ocorreram até 1.000.000 de ciclos, tendendo a se estabilizar após os 5.000.000 de ciclos. Da mesma forma, as deformações específicas no concreto e nos laminados de PRFC da viga VFV_PC_01 também apresentam comportamento similar ao dos deslocamentos no centro do vão, entretanto, com incremento significativo de deformações após 100.000 ciclos, provavelmente provocado pela ruptura das barras de aço da armadura interna.

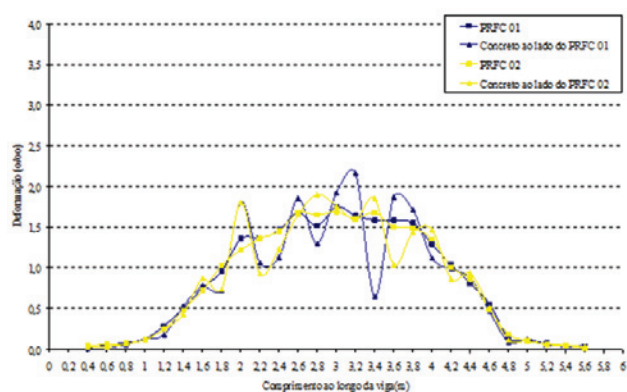
As Figuras [13] a [15] mostram as deformações específicas no concreto e nos laminados de PRFC, obtidas através de elongômetros posicionados ao longo da viga. As medições foram realizadas durante o segundo pré-carregamento, aos 30.000, 100.000, 1.000.000 e 5.000.000 de ciclos, com a viga submetida a 78kN, que corresponde à carga máxima aplicada durante ensaio com carregamento cíclico.

Observa-se, nas figuras, que as medidas das deformações específicas obtidas ao longo dos laminados de PRFC da viga VFC_PC_02 são regulares e variam de forma mais acentuada até 1.000.000 de ciclos, tendendo a se estabilizar após 5.000.000 de ciclos. Os trechos localizados entre os pontos de aplicação de carga, que se situam de 1,2m a 4,8m, mostram, claramente, a presença de fissuras no concreto, posicionadas entre as bases utilizadas nas medições.

Figura 14 - Deformações específicas nas lâminas de PRFC e no concreto da viga VFC_PC_02 com um carregamento de 78kN: (a) aos 30.000 ciclos e (b) aos 100.000 ciclos



A



B

Figura 15 - Deformações específicas nas lâminas de PRFC e no concreto da viga VFC_PC_02 com um carregamento de 78kN (a) aos 1.000.000 ciclos e (b) aos 5.000.000 ciclos

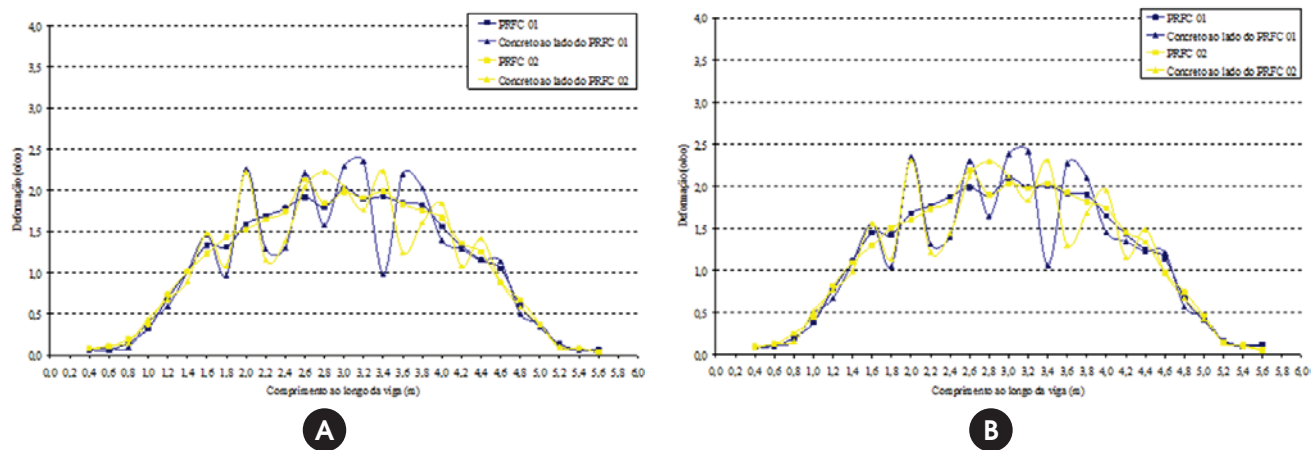
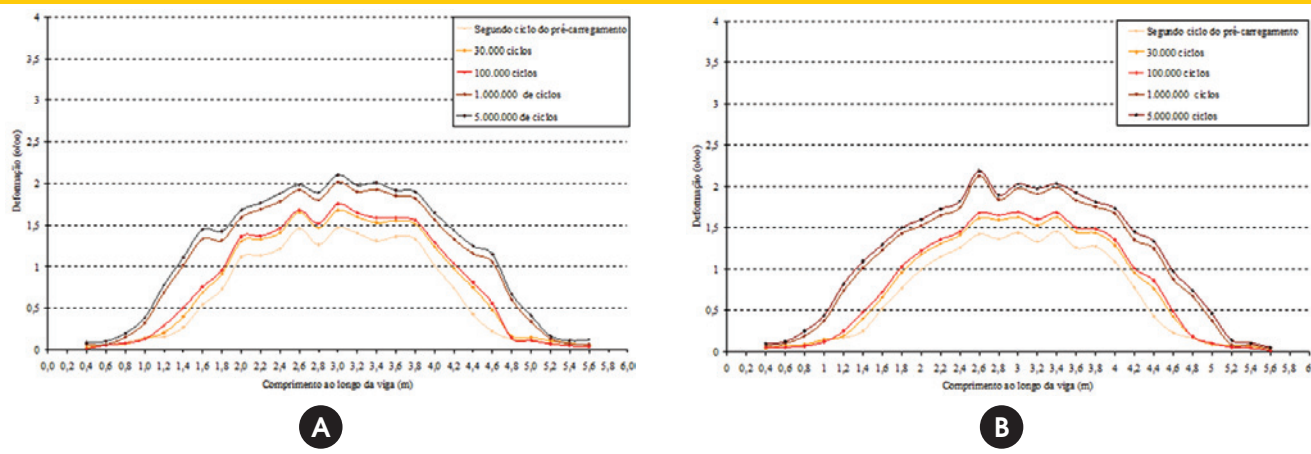


Figura 16 - Deformações específicas na lâmina de PRFC 01 (a) e 02 (b) da viga VFC_PC_02 durante a aplicação do carregamento cíclico



Observa-se, ainda, que, durante o pré-carregamento, os trechos de ancoragem, localizados a 1,2m de distância das extremidades, praticamente não apresentavam deformação, fato que se repetiu aos 30.000 ciclos. A partir dos 100.000 ciclos, as deformações começaram a aumentar nos trechos de ancoragem, sendo que, ao final dos 5.000.000 de ciclos, somente os primeiros 0,6m dos dois trechos de ancoragem permaneciam com o mesmo nível de deformação do início do ensaio. Em comparação, a ancoragem da viga VFC_PC_01 foi mais solicitada desde o pré-carregamento da viga, como mostram as Figuras [13] a [15].

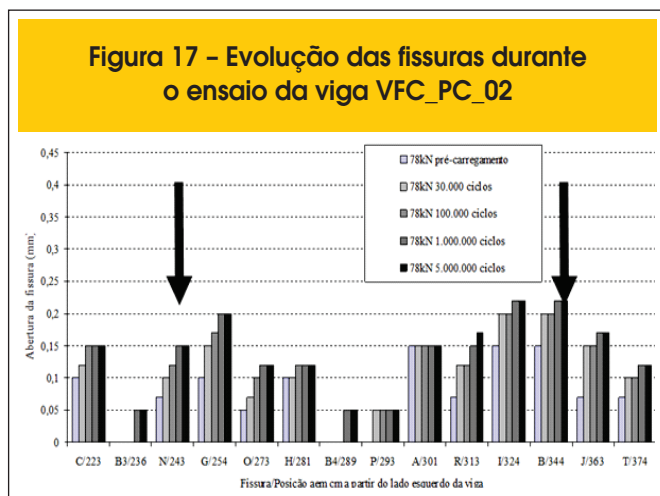
Os dados das Figuras [13] a [15] mostram que as deformações específicas nos laminados de PRFC, nos trechos localizados entre os dois pontos centrais de aplicação de carga, entre 2,4m e 3,6m, medidas na fase de pré-carregamento, variaram de 1,00 a 1,50‰. Ao final de 30.000 ciclos, essas deformações aumentaram um pouco, variando de 1,50 a 2,00‰. No intervalo de 30.000 a

100.000 ciclos, não houve variação significativa nas deformações, que continuaram variando no mesmo intervalo. As medições realizadas com 1.000.000 e 5.000.000 de ciclos mostraram que as deformações não variaram de forma significativa nesse intervalo, sendo que o valor máximo aos 5.000.000 de ciclos foi 2,11‰. Essa deformação, somada aos 5,95‰, aplicados para protender os laminados, resulta em uma deformação total de 8,06‰.

As deformações específicas nos laminados, ao longo da viga VFC_PC_02, foram bem inferiores às apresentadas pela viga VFC_PC_01, já que a carga máxima e o diferencial de carga aplicado também eram inferiores. Os resultados apresentados pela viga VFC_PC_02 até os 5.000.00 de ciclos indicam que as deformações específicas nos laminados, devido à aplicação do carregamento cíclico, foram razoáveis, não sinalizando a ocorrência de danos no reforço até o final do teste.

A Figura [16 (a)] mostra o perfil das deformações específicas dos

Figura 17 – Evolução das fissuras durante o ensaio da viga VFC_PC_02



dois laminados de PRFC ao longo da viga, do pré-carregamento até os 5.000.000 de ciclos. Os gráficos mostram que as maiores variações ocorreram nos intervalos do pré-carregamento até 30.000 ciclos e dos 100.000 até 1.000.000 de ciclos. A deformação nos dois laminados, no vão entre os dois pontos centrais de aplicação de carga, variou apenas 0,85‰ ao longo dos 5.000.000 de ciclos. Observam-se pequenas variações nas deformações específicas entre dois trechos consecutivos para os dois laminados, principalmente no vão central da viga, comprometido pela presença de fissuras. Os pontos localizados a 1,8m, 2,8m e 4,6m, no laminado da Figura [16 (a)], e a 2,6m, no laminado da Figura [16 (b)], em especial, mostram diferenças mais acentuadas nas deformações dos laminados.

É interessante notar que existe um certo efeito de deformação progressiva das regiões de ancoragem, o que, talvez, poderia gerar problemas de aderência em casos de fadiga de longa duração. Seria interessante investigar em maior profundidade esse efeito, mas o longo prazo demandado por ensaios de fadiga de longa duração dificulta essa iniciativa.

A evolução das fissuras no centro do vão, na viga VFC_PC_02, pode ser observada no gráfico da Figura [17], que mostra as medições realizadas do pré-carregamento até 5.000.000 de ciclos. No gráfico, o eixo das abscissas mostra a denominação das fissuras e sua posição a partir da extremidade esquerda da viga, enquanto o eixo das ordenadas mostra a abertura das fissuras em mm. Embora a maior concentração de fissuras tenha ocorrido na região entre os quatro pontos de aplicação de carga, são mostradas as aberturas das fissuras somente na região submetida aos maiores momentos fletores, entre os dois pontos de aplicação de carga no vão central da viga, que são localizados no gráfico por meio de duas setas verticais.

As primeiras fissuras no centro do vão surgiram durante o pré-carregamento, com aberturas não superiores a 0,15mm. Do pré-carregamento até 100.000 ciclos, ocorreu o aumento na abertura de algumas fissuras; entretanto, nenhuma delas ultrapassou um valor de abertura de 0,20mm. O aumento na abertura de algumas fissuras se repetiu no intervalo de 100.000 ciclos até 1.000.000 de ciclos, sendo que a maior abertura medida ao final de 1.000.000 de ciclos foi de 0,22mm. Desse ponto até as medições realizadas ao final de 5.000.000 de ciclos, não houve variação na abertura das fissuras.

As fissuras localizadas a 1,2m das duas extremidades apareceram somente nas medições realizadas aos 100.000 ciclos, com abertura máxima de 0,05mm. A variação na abertura dessas fissuras no intervalo de 100.000 ciclos até 5.000.000 foi pequena, sendo que a abertura máxima ao final do ensaio foi de 0,10mm.

Devido à diferença no carregamento máximo aplicado nos ensaios de carregamento cíclico das vigas VFC_PC_01 e VFC_PC_02, não se pôde comparar diretamente os valores de abertura de fissuras para as duas vigas. Como o carregamento máximo aplicado na viga VFC_PC_01 (108kN) foi maior que o aplicado na viga VFC_PC_02 (78kN), as fissuras nessa viga apresentaram maiores aberturas desde o pré-carregamento, onde já atingiam 0,35mm. Embora aos 100.000 ciclos a maior abertura de fissura na viga VFC_PC_01 tenha sido 0,4mm, aos 282.000 ciclos, uma fissura de 2,2mm foi identificada.

5. Conclusões

Os resultados das duas vigas ensaiadas sob carregamento cíclico mostraram que a ocorrência de danos nas estruturas reforçadas com PRFC protendidos, quando submetidas a carregamentos cíclicos, está relacionada primariamente ao nível de tensão atuante no aço. Os resultados experimentais mostraram que o acúmulo de danos que levaram à ruptura das barras de aço da armadura interna foi consequência do nível de tensão atuante no aço da armadura interna, e não do tipo de reforço aplicado às vigas.

Os ensaios mostraram que um incremento de 20% na tensão máxima aplicada, reduziu a vida útil de fadiga significativamente, reduzindo o número de ciclos admissível em mais de quinze vezes. Isso salienta a importância do monitoramento de estruturas submetidas a carregamentos cíclicos, tais como pontes ferroviárias e rodoviárias, que podem ter sido calculadas para cargas menores que as cargas características do tráfego atual. O uso dos reforços, nesse caso, pode auxiliar a incrementar de forma significativa a vida útil das estruturas ao reduzir o nível de tensões nas armaduras.

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] MENEGHETTI, L. C. ; GARCEZ, M. R. ; SILVA FILHO, L. C. P. ; GASTAL, F. P. S. L. Fatigue life regression model of reinforced concrete beams strengthened with FRP. Magazine of Concrete Research, volume 63, 2011. p. 539-549.
- [02] MEIER, U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. Construction and Building Materials, volume 9, número 6, 1995. p. 341-351.
- [03] FERRIER, E.; BIGAUD, D.; HAMELIN, P.; BIZINDAVYI, L.; NEALE, K. W. Fatigue of CFRPs externally bonded to concrete. Materials and Structures, volume 38, número 1, 2005. p. 39-46.