

Estudo experimental de viga de concreto armado reforçada com laminados de fibra de carbono pela técnica NSM

Experimental study of reinforced concrete beam reinforced with carbon fiber laminates by the NSM technique

Ciro José Ribeiro Villela Araujo^a, Luís Henrique Bueno Pinheiro^b, Gabriela Martins Souza Brisola^b, Beliana Cavalcante Sawada de Carvalho^b, Belisa Cavalcante Sawada^b, Armando Lopes Moreno Junior^b

^a Seção de Engenharia de Estruturas, Centro Tecnológico de Obras, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Departamento de Engenharia de Estruturas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

*E-mail: ciroaraujo@ipt.br

Palavras-chave:

reforço de vigas; fibras de carbono; PRFC; reforço instalado em entalhes; NSM.

Keywords:

reinforcement beam; carbon fiber; CFRP; reinforcement installed in groove; NSM.

Resumo

Com a crescente necessidade de reforço e reabilitação de estruturas de concreto armado devido a problemas decorrentes de falhas de projeto, danos e alterações do uso das estruturas, surgiu, como alternativa aos métodos tradicionais de reforço, a aplicação de laminados de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) inseridos em entalhes no cobrimento de concreto pela técnica *Near Surface Mounted (NSM)*. Apresenta-se nesse trabalho um estudo experimental que consistiu em instrumentar e realizar ensaios em duas vigas, sendo uma de referência, sem a utilização de reforço, e outra com a inserção de reforço de laminado de PRFC no cobrimento de concreto da região tracionada. Os resultados experimentais e teóricos foram comparados entre si, podendo-se verificar o aumento da capacidade de carga e a redução de deslocamentos verticais (flechas) da viga reforçada com PRFC pela técnica NSM em relação à viga de referência.

Abstract

With the growing need for strengthening and rehabilitation of structures due to problems resulting from design flaws, damages and changes of the usage of structures, inserting Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) in concrete grooves emerged as an alternative to traditional reinforcement methods. This technique is called Near Surface Mounted (NSM). This work presents an experimental study consisted of instrumenting and performing tests on two beams, one being the reference without using reinforcement and the other with

CFRP laminate reinforcement applied on the concrete cover of the tensioned region. The experimental and theoretical results were compared showing that there is an increase of the load capacity and a reduction of vertical displacements of the CFRP strengthened beam using the NSM technical in relation to the reference beam.

1 Introdução

A necessidade de trabalhos de recuperação e reforço de estruturas está ligada a problemas decorrentes de falhas de projeto e execução, degradação das estruturas por falta de manutenção, alteração do tipo de utilização prevista em projeto, regeneração da capacidade resistente diminuída em virtude de acidentes, tais como choques de veículos, incêndios etc.

Para realização desses reforços, são necessários conhecimentos aprofundados sobre a estrutura e os materiais que a compõem e que serão aplicados, a fim de torná-la apta às condições previstas nas normas técnicas com relação aos estados limites últimos e de utilização.

A recuperação e reforço das estruturas dependem da análise das causas que motivaram a realização da intervenção e das consequências do dano na estrutura, para então definir o tipo de material, técnica e mão de obra adequada a ser utilizada. Os materiais devem apresentar resistência e rigidez compatíveis com o elemento reforçado, de tal forma que o comportamento do conjunto possa ser bem aproveitado e passível de avaliação, por análise teórica e/ou por análise experimental, e os métodos utilizados sejam eficazes, econômicos e tecnicamente viáveis para a aplicação.

Existem diversos métodos de recuperação de vigas de concreto armado, tais como aumento das áreas de armaduras longitudinais e transversais, aumento da seção transversal, protensão exterior, colagem de chapas de aço, reforço com estruturas de aço etc. Uma técnica atualmente utilizada em muitos países europeus, Estados Unidos e Japão é a aplicação de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) nos elementos de concreto armado.

Conforme Carvalho, 2010, houve uma crescente demanda nos últimos anos da aplicação do tipo de reforço unidirecional nas vigas de concreto armado. Estudos indicam que a aplicação de laminados, colados na superfície externa do elemento pela técnica *External Bonded Reinforcement (EBR)* ou inseridos no cobrimento de concreto, pela técnica *Near Surface Mounted (NSM)* são alternativas muito eficazes no aumento e na reabilitação da capacidade resistente do elemento estrutural (**Figuras 1 e 2**).



Figura 1 – Técnica *EBR*. Laminados de PRFC (setas) colados na superfície da região tracionada das vigas. Fonte: elaboração própria.



Figura 2 – Técnica *NSM*: (a) entalhes realizados no cobrimento de concreto da região tracionada da viga; (b) laminados de PRFC inseridos e colados nos entalhes realizados. Fonte: elaboração própria.

Para Carvalho (2010), a aplicação desses sistemas (*EBR* e *NSM*) é de elevada facilidade e rapidez, permitindo a intervenção mais rápida na estrutura em comparação a outras técnicas de reforço como o encamisamento ou a adição de chapas coladas.

A técnica com a colagem externa do laminado pode apresentar problemas devido ao desprendimento do reforço antes de atingir o aproveitamento máximo do material, sendo que a ruptura ocorre entre o reforço e a resina ou entre a resina e o revestimento de concreto. Já com a inserção do laminado no revestimento, há um melhor desempenho do reforço devido à dupla área de aderência entre o laminado e o concreto (ARQUEZ, 2010).

Nos ensaios realizados por Arquez (2010), as vigas reforçadas pela técnica *NSM* apresentaram um aumento da capacidade de carga de 50,2 % em relação à viga sem reforço, considerando a deformação máxima do aço mais tracionado de 10 ‰ e no laminado de PRFC de 9,38 ‰.

Os resultados obtidos por Vieira (2013), em vigas reforçadas pela técnica *NSM*, mostraram que houve um acréscimo de capacidade de carga de 9,5 % no instante em que se iniciou o escoamento da armadura tracionada e de 38,7 % na capacidade última resistente dessas vigas. A ruptura ocorreu no laminado sem o seu desprendimento do entalhe.

Em relação à técnica *EBR*, os resultados obtidos pela *NSM* são mais eficientes sob os aspectos do comportamento em serviço e de segurança em situações de ruptura, com elevada ductilidade do elemento estrutural quando atingido valores últimos dos esforços resistentes, conforme apresentado por Carvalho (2010).

Com base nos resultados expressivos observados na bibliografia, da aplicação dessa técnica de reforço, foi realizado um estudo experimental "piloto" que consistiu em ensaiar uma viga de concreto armado reforçada com laminados de PRFC, inseridos em entalhes no revestimento de concreto por meio da técnica *NSM*.

Esse ensaio piloto permitiu obter parâmetros para concepção da metodologia a ser empregada em ensaios futuros, tendo como referência os trabalhos consultados e normas específicas (ARQUEZ, 2010; CARVALHO, 2010; VIEIRA, 2013; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

Os resultados do ensaio da viga reforçada foram comparados com as análises teóricas e com os resultados experimentais de uma viga de referência, com mesmas propriedades mecânicas dos materiais e mesmas características geométricas, porém sem a aplicação de reforço, verificando o aumento da capacidade de carga e redução das flechas na viga reforçada.

2 Procedimento metodológico

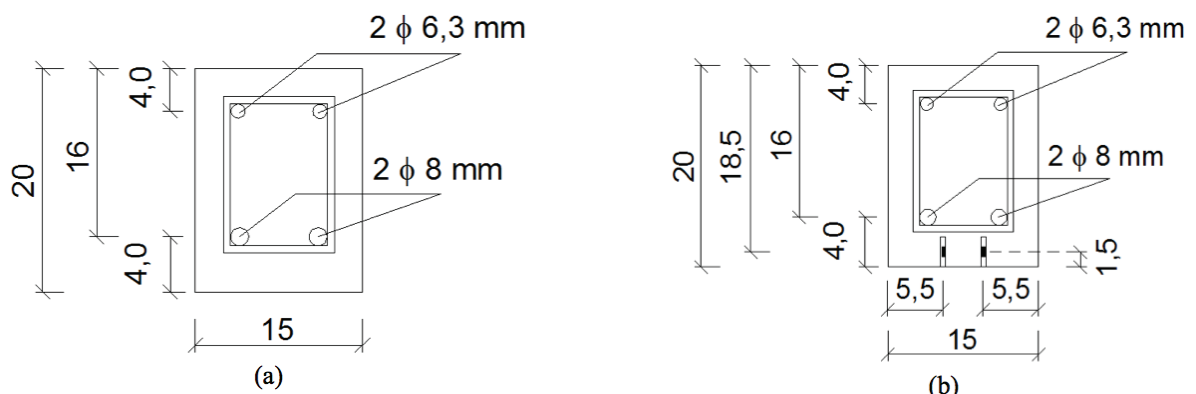
O procedimento metodológico encontra-se descrito nos subitens a seguir.

2.1 Concepção das vigas

As vigas de concreto armado foram projetadas e moldadas com seção transversal retangular de 15 cm de largura, 20 cm de altura e comprimento total de 180 cm, sendo que 150 cm se refere ao vão livre, localizado entre os apoios.

Foi realizado um pré-dimensionamento à flexão simples, de maneira que a viga reforçada atingisse a ruptura no Domínio 2, caracterizada pelo alongamento do aço tracionado com uma deformação de 10 ‰ e o concreto à compressão sem atingir a ruptura, com deformação inferior à 3,5 ‰ (NBR 6118) e 3,0 ‰ (ACI 440.2R). Essa previsão de ruptura no Domínio 2, está condicionada ao aproveitamento máximo dos elementos tracionados, no intuito de avaliar o comportamento da região reforçada da viga, sem a ocorrência do esmagamento do concreto da região comprimida (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014; AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

Para atender às condições de cálculo do pré-dimensionamento, adotou-se um concreto com resistência à compressão de 25 MPa, aço com tensão limite ao escoamento de 500 MPa, seção transversal com 16 cm de altura útil e largura de 15 cm. Foram determinadas para a região tracionada duas armaduras longitudinais com diâmetros de 8,0 mm e dois laminados de PRFC com espessura de 1,4 mm e altura de 10 mm inseridos no cobrimento de concreto. Na região comprimida, foram determinadas duas armaduras longitudinais de diâmetro de 6,3 mm (Figura 3). Com relação à capacidade resistente ao esforço cortante, foram utilizados estribos com diâmetro de 6,3 mm a cada 10 cm ao longo das vigas.



(dimensões em cm).

Figura 3 - Geometria e detalhes: (a) viga de referência e (b) viga reforçada com PRFC.

Fonte: elaboração própria.

2.2 Caracterização dos materiais

2.2.1 Aço

Foram ensaiados dois corpos de prova seguindo as recomendações de NBR 7480 e NBR 6892-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008; 2013). Os resultados obtidos da relação tensão x deformação indicaram que o aço apresentou, no regime elástico, módulo de elasticidade $E_s=179$ GPa. O início de escoamento ocorreu para uma deformação $\epsilon_{sy}=4,34$ ‰ sob uma tensão $f_{sy}=594,3$ MPa. A tensão última atingida foi de $f_{su}=758$ MPa.

2.2.2 Concreto

Foram ensaiados três corpos de prova à compressão axial para verificação da resistência à compressão do concreto, conforme ABNT NBR 5739 e dois corpos de prova para determinação do módulo de elasticidade ABNT NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007; 2008b).

Os corpos de prova possuíam formato cilíndrico, com 100 mm de diâmetro (D) e 200 mm de altura (H), com relação altura/diâmetro (H/D) igual a 2.

As vigas foram concretadas com traço em massa na proporção de 1 : 2,17 : 2,94. (Cimento CII Z32: Areia média: Brita 1) e relação água/cimento de 0,6.

A resistência média à compressão no dia do ensaio (28 dias) foi de $f_{cj}=29$ MPa e o módulo de elasticidade no dia do ensaio foi de $E_{cj}=27$ GPa.

2.2.3 Laminado

Conforme as recomendações da ASTM D 3039, foram ensaiados três corpos de prova de laminado de PRFC, fornecido pela empresa S&P-Reinforcement, para determinação da tensão de ruptura e deformação específica (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008).

Para realização dos ensaios de tração, foi necessária a colagem com resina epóxi de duas tiras do próprio laminado nas extremidades dos corpos de prova, conforme mostra a **Figura 4**. Dessa maneira, as garras da prensa mecânica conseguiram fixar os corpos de prova e tracioná-los até a ruptura. As medidas de deformação foram obtidas por extensômetros elétricos colados nas fibras e as cargas aplicadas foram obtidas por leituras diretas da prensa.

Os resultados dos ensaios indicaram comportamento elástico até a ruptura com deformação última $\epsilon_{fu}= 12,27$ ‰, tensão de ruptura $f_{fu}= 2143$ MPa e módulo de elasticidade $E_f= 175$ GPa.

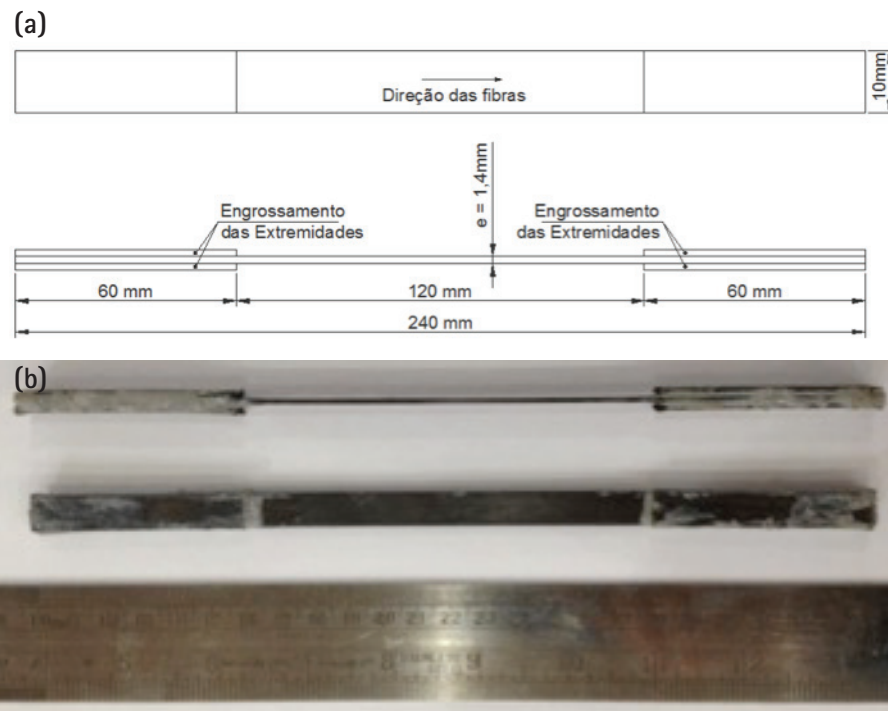


Figura 4 – Corpos de prova de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC). Dimensões do corpo de prova (a). Corpo de prova preparado para o ensaio à tração (b). Fonte: elaboração própria.

2.3 Instrumentação e concretagem

A instrumentação dos elementos para medidas de deformações específicas consistiu na colagem de extensômetros elétricos no concreto, no aço e no laminado de PRFC, conforme apresentado no trabalho de Arquez (2010).

Na viga de referência, sem reforço, foram instalados um extensômetro no concreto e quatro extensômetros nas armaduras longitudinais na região central do vão. Já na viga reforçada, além do mesmo posicionamento dos extensômetros no concreto e nas armaduras, foram instalados três extensômetros ao longo de cada laminado, distribuídos na região central dos laminados e nos trechos distantes a $1/6$ do vão contados a partir dos apoios, $L/6$ da **Figura 5**.

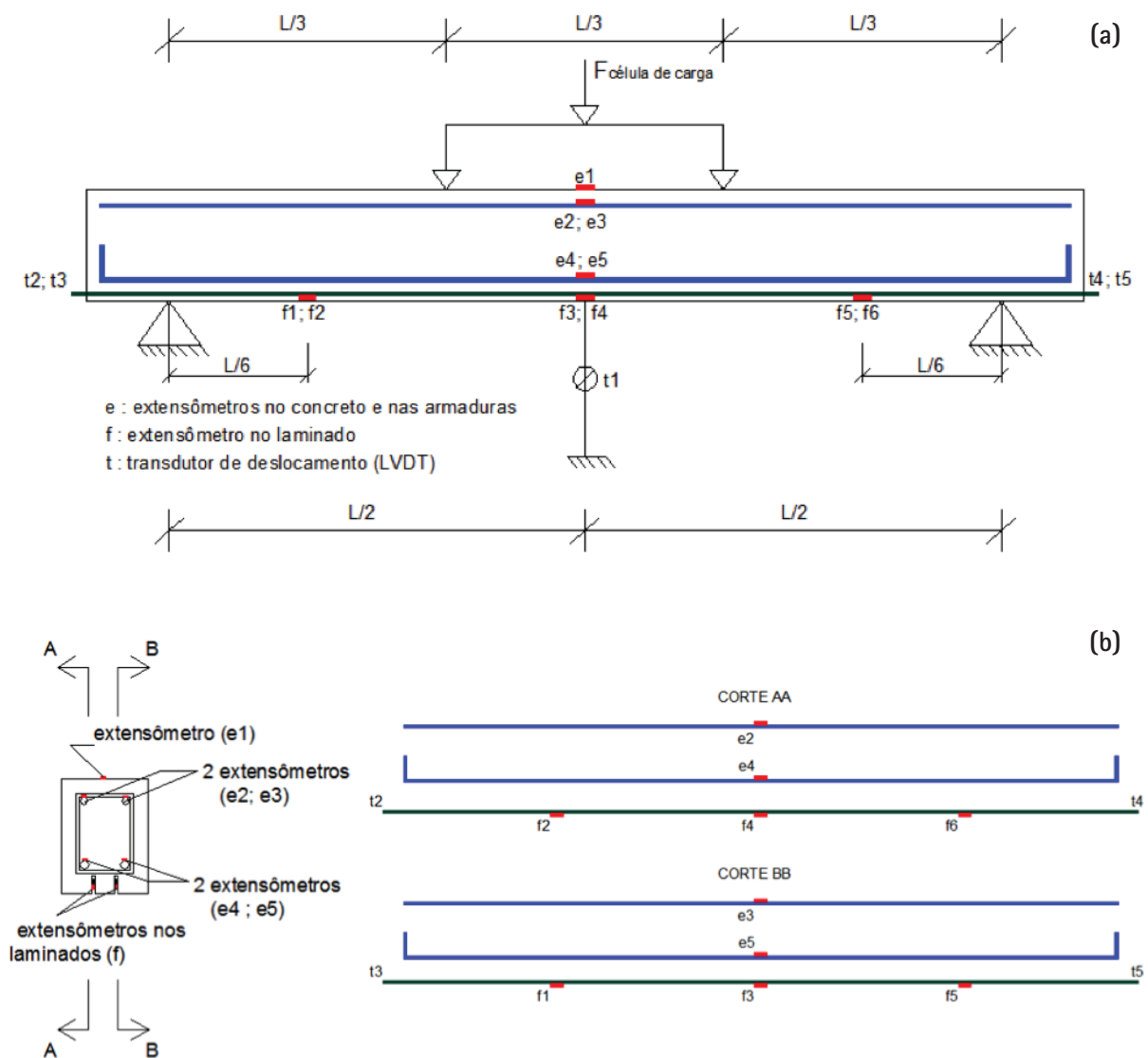


Figura 5 - Instrumentação da viga reforçada: (a) localização dos extensômetros nas armaduras, nos laminados (fibras) e no concreto, (b) localização dos transdutores de deslocamentos (LVDT's).
 Fonte: elaboração própria.

Os carregamentos aplicados nas vigas foram realizados por meio de força transmitida por uma célula de carga, com capacidade máxima de 20 kN, aplicada em dois pontos concentrados, de mesma intensidade e localizados nos terços do vão da viga, de tal maneira que a região central (entre as cargas aplicadas) estivesse submetida à flexão pura.

Após 21 dias de cura do concreto, foram realizados dois entalhes com dimensões de 5 mm de largura e 30 mm de profundidade no cobrimento de concreto da região inferior da viga, com uso de uma serra circular (Figura 6), atendendo aos critérios de ACI 440.2R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

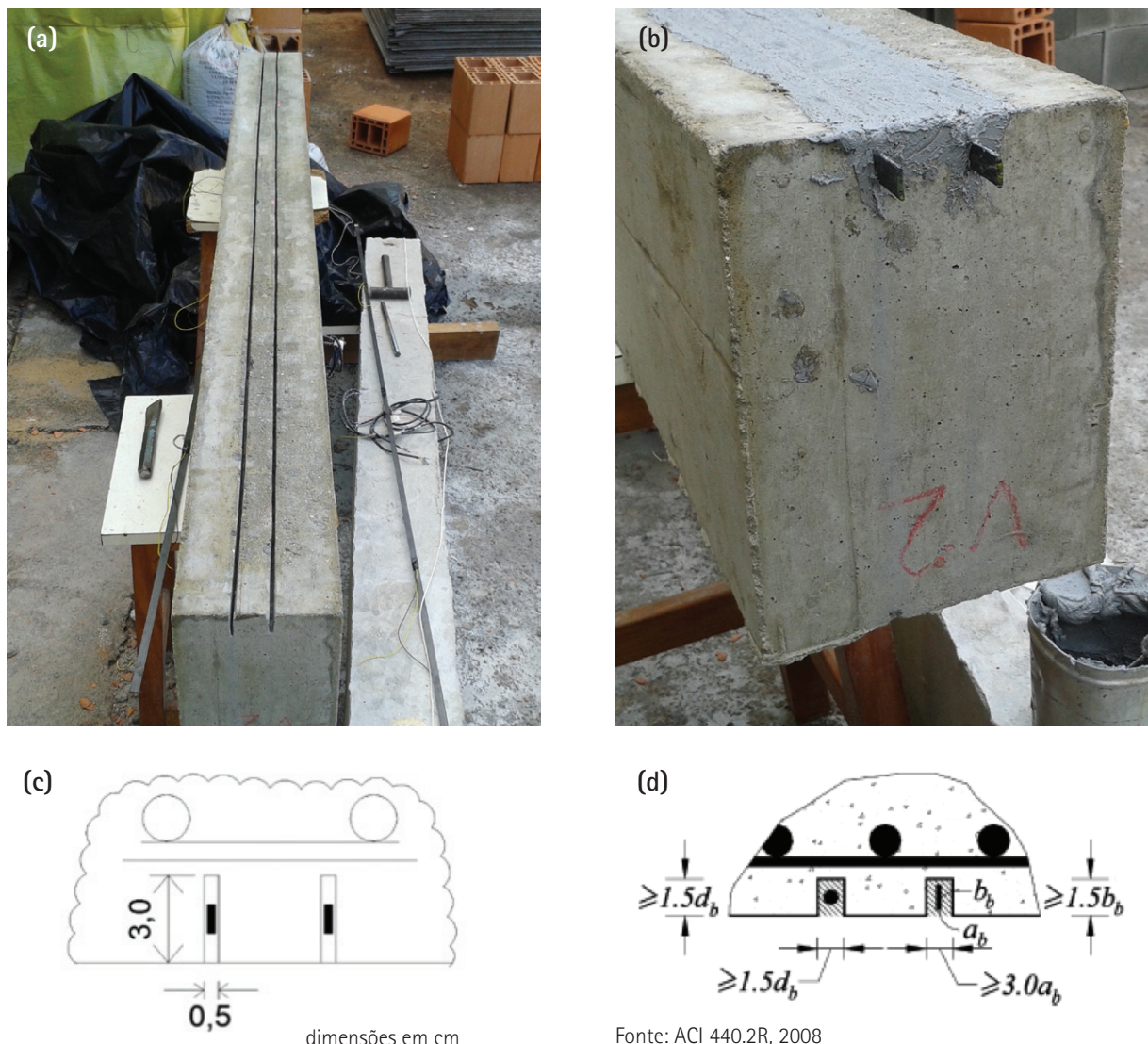


Figura 6 - Entalhes realizados na face inferior da viga (a), para introdução dos laminados (fibras); (b) laminados inseridos nos entalhes; (c) dimensões dos entalhes realizados na viga e (d) dimensões mínimas dos entalhes.

Fonte: elaboração própria.

Para a instalação dos laminados, foi realizada limpeza da região do entalhe com o uso de jateamento de ar e aplicação da resina epóxi (marca S&P 220 - Silaex Química LTDA), fornecida pela empresa S&P-Reinforcement, com o uso de espátula preenchendo todo o entalhe. Posteriormente, foi inserido o laminado e realizado acabamento da superfície com a remoção da resina expelida após a introdução da fibra.

Foram inseridos laminados com alturas de 10 mm, espessuras de 1,4 mm e comprimentos de 186 cm, com sobras de 3 cm para cada extremidade da viga, de forma a permitir a verificação de um possível deslizamento da fibra em relação ao concreto.

Para as medidas de deslocamento vertical no meio do vão foi utilizado um LVDT (transdutor de deslocamento) e, para o controle de possível escorregamento das fibras, foram utilizados quatro LVDT's instalados nas extremidades dos laminados.

O sistema de aplicação de força consistiu em uma prensa com capacidade carga de 600 kN, associado a equipamentos de controle de deslocamentos e deformações específicas dos materiais (**Figura 7**).

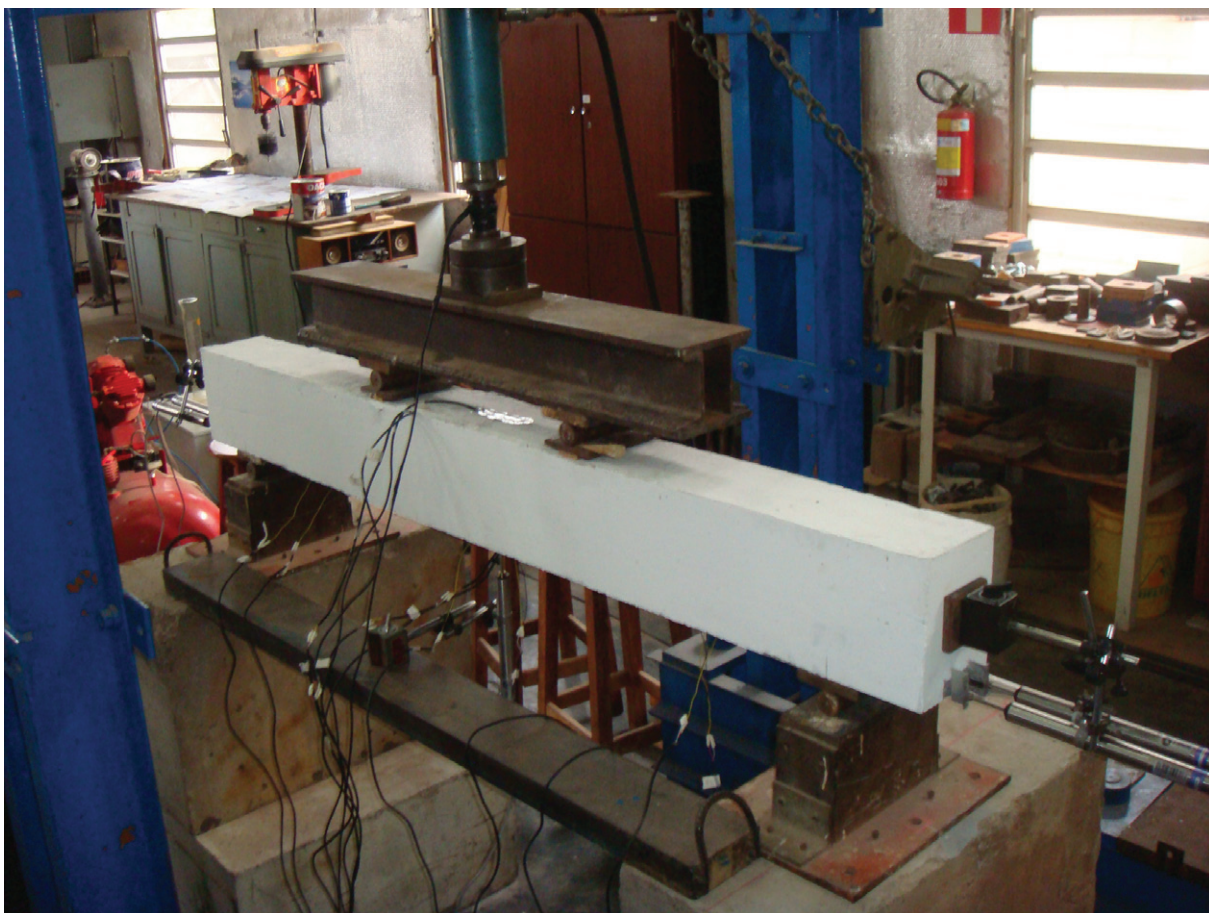


Figura 7 - Sistema de aplicação de força durante ensaio da viga reforçada com PRFC.
Fonte: elaboração própria.

2.4 Procedimento analítico

A Conforme estabelece o ACI 440.2R, na verificação da capacidade resistente última da seção retangular deve ser considerada a compatibilização entre as tensões nos materiais e as forças de equilíbrio da seção. Esse procedimento de cálculo é iterativo, assumindo uma posição de linha neutra e verificando as forças internas de equilíbrio. Quando não houver o equilíbrio das resultantes das forças internas, a posição de linha neutra deve ser revisada e uma nova verificação deve ser realizada (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

Machado e Machado (2015) considera que, no cálculo do reforço com fibras de carbono de uma viga de concreto armado submetida à flexão, se devem efetuar as seguintes verificações:

- determinação do momento fletor máximo de cálculo do reforço que atuará na viga ($M_{ref.maj.}$);
- determinação do momento fletor resistente de cálculo da viga, a partir das características geométricas da seção e das características mecânicas dos materiais constituintes ($M_{resist.}$);
- comparação ($M_{ref.maj.}$) com o ($M_{resist.}$). Se ($M_{resist.} > M_{ref.maj.}$) a viga não necessitará de reforço à flexão. Caso ($M_{resist.} < M_{ref.maj.}$) a viga necessitará de reforço.
- determinação do modo de ruptura para o reforço, conforme os domínios de deformação apresentados nas normas técnicas.

Conhecendo-se ainda o regime no qual será dimensionado o reforço, deve-se adotar o seguinte procedimento (MACHADO; MACHADO, 2015):

- arbitra-se a profundidade da linha neutra em conformidade com o modo de ruptura;
- calculam-se as deformações dos diversos materiais, admitindo-se que as seções transversais se mantêm planas após as deformações;
- calculam-se as tensões atuantes nos diversos materiais quando são conhecidas as deformações;
- fazem-se as verificações do equilíbrio a partir do conhecimento das forças. Se o momento resistente encontrado no sistema reforçado for maior que o momento solicitante máximo de cálculo ($M_{ref.maj.}$) o processo está completo.

De acordo com o ACI 440.2R, a deformação efetiva da fibra (ϵ_{fe}) deve ser igual ou inferior à deformação de cálculo, cujo valor pode variar de 0,6 a 0,9 da deformação última (ϵ_{fu}), sendo recomendado o valor de deformação de cálculo de $\epsilon_{fd} = 0,7\epsilon_{fu}$. A deformação última ($\epsilon_{fu} = CE \cdot \epsilon_{fu}^*$) é o produto do fator de redução que leva em consideração o meio ambiente em que a fibra está exposta (CE) com a deformação última à ruptura da fibra (ϵ_{fu}^*) (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008).

A deformação efetiva da fibra ϵ_{fe} é determinada pela **Equação 1**, sendo ϵ_{cu} a deformação última do concreto, d_f a distância entre a fibra e a face mais comprimida de concreto, c a posição da linha neutra e ϵ_{bi} a deformação inicial do elemento considerando todos os carregamentos atuantes na ocasião da instalação do reforço de fibra de carbono.

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{d_f-c} \right) \quad (1)$$

Para se determinar a tensão efetiva na fibra, assume-se que o comportamento tensão x deformação é elástico linear, $f_{fe} = E_f \cdot \epsilon_{fe}$.

A deformação da armadura pode ser determinada pela compatibilização de deformações da fibra e do concreto (**Equação 2**).

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{d_f-c} \right) \quad (2)$$

Quando a deformação na armadura for inferior à deformação do aço ($\epsilon_s \leq \epsilon_{sy}$) calcula-se a tensão atuante na armadura ($f_s = E_s \cdot \epsilon_s$) e caso a deformação no aço for igual à deformação no escoamento da armadura ($\epsilon_s = \epsilon_{sy}$), determina-se o estado de tensão do reforço ($f_e = E_f \cdot \epsilon_{fe}$).

A posição da linha neutra (c , na **Equação 3**) é determinada pelo equilíbrio de forças da região tracionada com a comprimida da seção. Os parâmetros α_1 e β_1 referem-se a 0,85 e 0,8 para seção retangular de concreto com distribuição não linear de tensão.

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c \beta_1 b} \quad (3)$$

3 Resultados e discussão

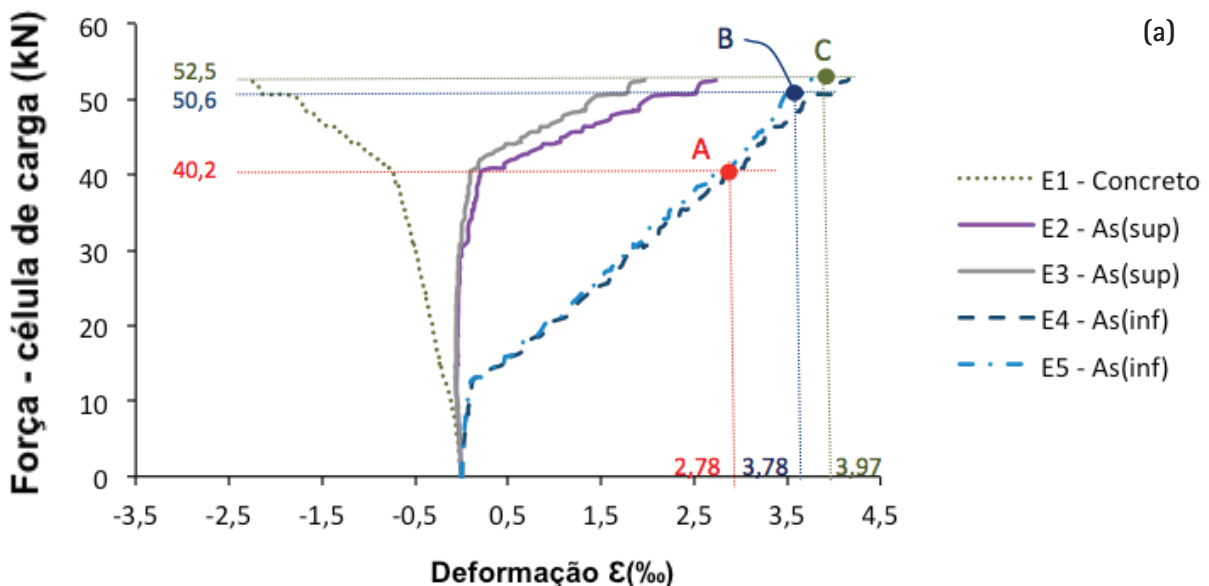
3.1 Viga de referência (sem reforço)

Os resultados dos ensaios da viga sem reforço são apresentados na **Figura 8**, sendo que os gráficos das deformações específicas (ϵ) dos materiais (concreto e aço) estão mostrados na **Figura 8a** e dos deslocamentos verticais (flechas) em relação ao carregamento total aplicado estão apresentados na **Figura 8b**.

O Ponto A, em ambos os gráficos, indica o instante em que o aço atingiu a deformação de 2,78 ‰ para uma força de 40,2 kN, correspondendo ao início de abatimento da curva força x deslocamentos (**Figura 8b**), ou seja, a partir desse ponto ocorreram aumentos significativos da flecha para pequenos

incrementos de carga. O Ponto B corresponde ao registro da última leitura de flecha realizada antes da ruptura da viga, cujo valor foi de 25,28 mm para um carregamento de 50,63 kN, aplicado na célula de carga, e o Ponto C refere-se ao instante da ruptura da viga com deformação máxima nas armaduras de 3,97 ‰, correspondente a uma a forças resultantes de tração de aproximadamente 29,50 kN em cada barra. A deformação do concreto da região comprimida foi de 2,3 ‰, inferior à máxima deformação para o concreto à flexão, cujo valor é de 3,5 ‰ e de 3,0 ‰ (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A força máxima aplicada no instante de ruptura na viga foi de 52,55 kN, ocasionada pelo cisalhamento da biela comprimida do concreto, sem que a armadura " $A_{s(inf)}$ " (**Figura 8a**) submetida à tração, atingisse o escoamento, conforme se previa teoricamente. Esse tipo de ruptura ocorreu devido ao espessamento inadequado dos estribos, não seguindo os critérios de projeto conforme preconiza a ABNT NBR 6118, salienta-se que essa situação deve ser evitada, pois a ruptura ocorre de maneira brusca, ou seja, sem aviso (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Apesar de a ruptura ter ocorrido por cisalhamento da biela de compressão do concreto, observa-se no gráfico da **Figura 8b**, no trecho de deslocamentos entre 20 mm e 25 mm, uma tendência de que as armaduras tracionadas entrariam em regime de escoamento em instante posterior à ruptura das bielas de compressão, pois, para pequenos incrementos de carga, ocorrida grandes deformações (flechas).



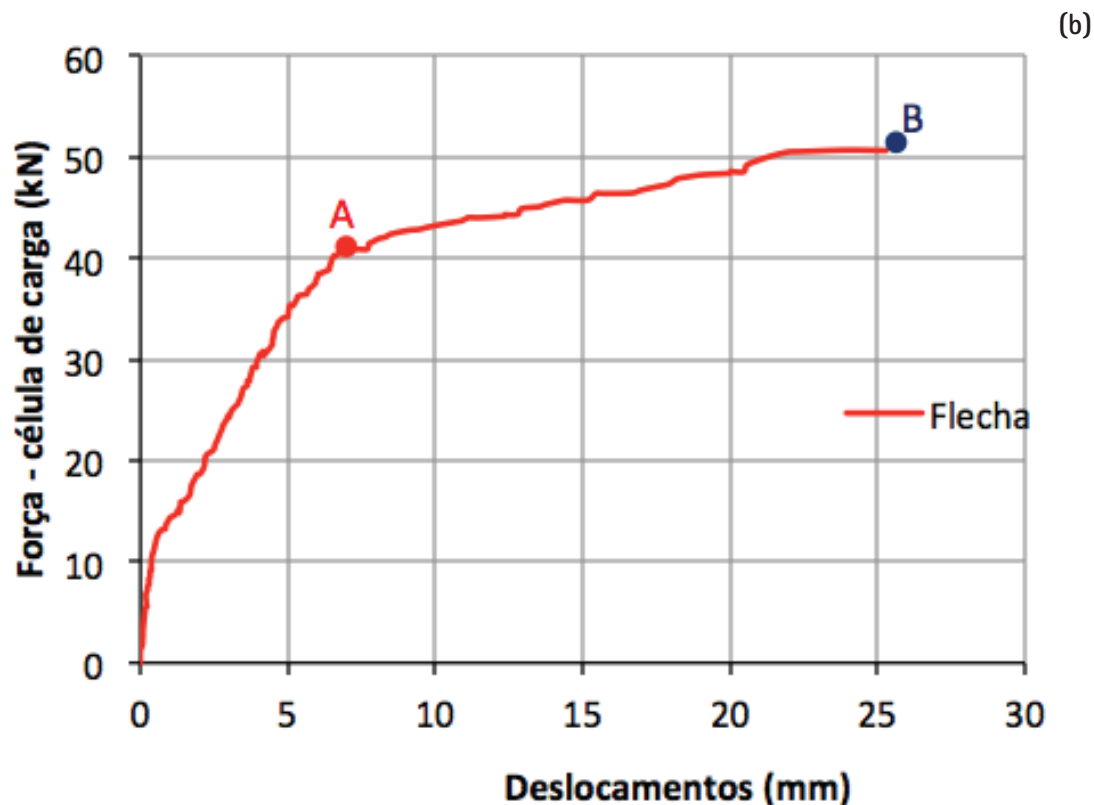


Figura 8 – Pontos de análise da viga sem reforço: (a) Gráfico da relação força-célula de carga x deformação; (b) Gráfico da relação força-célula de carga x deslocamento vertical. O ponto A indica que a partir desse instante ocorreram aumentos significativos da flecha para pequenos incrementos de carga. O ponto B corresponde à última leitura realizada de flecha antes da ruptura da viga e o ponto C corresponde à ruptura da viga.

Fonte: elaboração própria.

3.2 Viga com reforço de PRFC

O gráfico da **Figura 9** mostra as deformações específicas dos materiais (concreto, armaduras tracionadas e laminados) no meio do vão em relação aos carregamentos totais aplicados na viga. Os Pontos A', B' e C' correspondem aos mesmos valores de deformação (2,78 ‰, 3,78 ‰ e 3,97 ‰) dos pontos A, B e C obtidos no ensaio da viga de referência (sem reforço). No Ponto A', obteve-se uma força aplicada na célula de carga de 44,89 kN e, nos pontos B' e C', as forças obtidas foram 54,27 kN e 55,63 kN, respectivamente.

O ponto P1 foi considerado o valor médio de deformação das armaduras tracionadas para início de escoamento, correspondente a $\epsilon_{sy} = 4,50 \text{ ‰}$, o ponto P2 refere-se ao valor de deformação de $\epsilon_s = 10 \text{ ‰}$ nas armaduras tracionadas, que é o limite de deformação no Domínio 2 conforme estabelecido no ACI 440.2R e na ABNT NBR 6118, na condição considerada como ruptura da viga (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

O ponto P3 refere-se à deformação de cálculo da fibra correspondente a $(0,7 \epsilon_{fu})$, cujo valor obtido foi $\epsilon_{fd}=8,54 \text{ ‰}$ e o ponto P4 é a deformação última atingida pela fibra no momento de ruína da viga, cujo valor foi de $\epsilon_{fu}=11,9 \text{ ‰}$

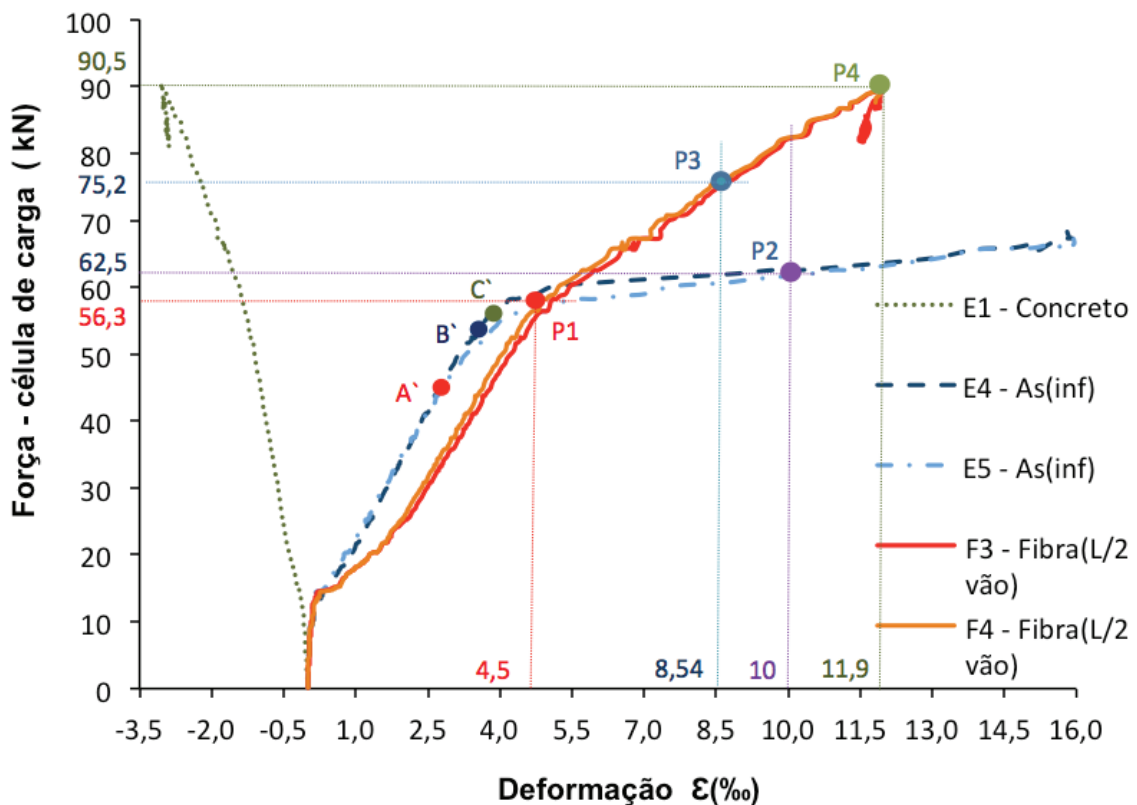


Figura 9 – Pontos de análise da viga com reforço de PRFC. Gráfico da relação força-célula de carga x deformação. Os pontos A', B' e C' correspondem aos mesmos valores de deformações obtidos na viga sem reforço. O ponto P1 refere-se ao início de escoamento das armaduras tracionadas. O ponto P2 refere-se à deformação de 10 ‰ nas armaduras tracionadas. O ponto P3 é referente ao laminado com deformação de cálculo $\epsilon_{fd} = 0,7 \cdot \epsilon_{fu}$ e o ponto P4 refere-se à fibra com deformação última ϵ_{fu} . Fonte: elaboração própria.

O gráfico da **Figura 10** mostra a relação entre às forças aplicadas na célula de carga com as forças resultantes obtidas nas armaduras tracionadas e nas fibras. A partir da deformação referente ao início de escoamento das armaduras de 4,50 ‰ (força na célula de carga de 56,3 kN), observa-se que o reforço (fibra) passou a ser responsável por absorver os carregamentos adicionais e, consequentemente, o aumento da capacidade resistente da viga.

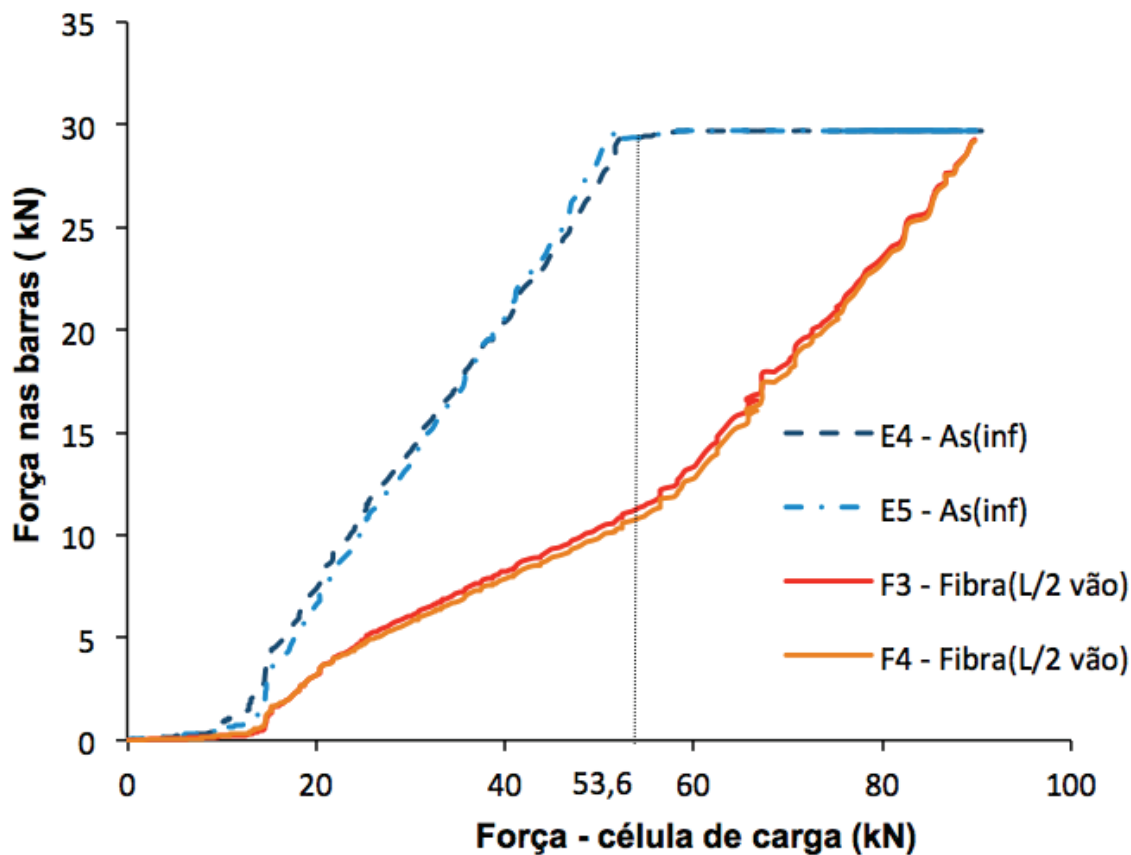


Figura 10 – Gráfico da relação força nas barras (armaduras e fibras) x força-célula de carga.
Fonte: elaboração própria.

A ruptura ocorreu no Domínio 2 com o escoamento da armadura longitudinal com deformação de 10 ‰, concreto com deformação à compressão de 1,6 ‰ e fibras com deformação média de 5,9 ‰, para uma força aplicada de 62,54 kN.

A ruína da viga reforçada ocorreu por cisalhamento da biela comprimida do concreto, com escoamento das armaduras tracionadas, cuja deformação foi superior a 15,9 ‰, deformação máxima nas fibras de 11,9 ‰ e concreto com deformação de 3,0 ‰ para máxima força aplicada de 90,54 kN.

3.3 Comparação entre os resultados dos ensaios das vigas

A Figura 11 mostra as flechas das vigas obtidas nos ensaios realizados. Observa-se a redução da flecha e o aumento da capacidade de carga para a viga reforçada. Se compararmos o deslocamento de 15 mm no meio do vão, a viga reforçada apresentou capacidade de carga de 77 kN, enquanto que na viga sem reforço o carregamento aplicado atingiu 45 kN, ou seja, um acréscimo de capacidade de carga de 58 %.

Com relação aos deslocamentos, a viga sem reforço apresentou deslocamento de 25,28 mm (última leitura registrada de flecha antes da ruína da viga) para uma carga de 50,63 kN, já a viga reforçada apresentou flecha de 6,44 mm para essa mesma carga, correspondendo a uma redução de flecha de 74,5 %. Comparando-se os resultados entre os pontos de mesma deformação das armaduras tracionadas (2,78 ‰, 3,78 ‰ e 3,97 ‰) das **Figuras 8a e 9**, a viga reforçada apresentou acréscimos de capacidade de carga não tão significativos, de 12 %, 7 % e 6 %, respectivamente. Já para deformações superiores à de escoamento da armadura $\epsilon_{sy} > 4,50 ‰$ houve acréscimo significativo de capacidade de carga da viga reforçada em comparação com a viga não reforçada, da ordem de 16 % na ruptura até 72 % na ruína.

A flecha obtida na viga reforçada na situação de ruptura foi de 9,5 mm, representando uma redução de deslocamento de 62 % em relação à flecha máxima atingida na viga sem reforço, cujo valor foi de 25,28 mm.

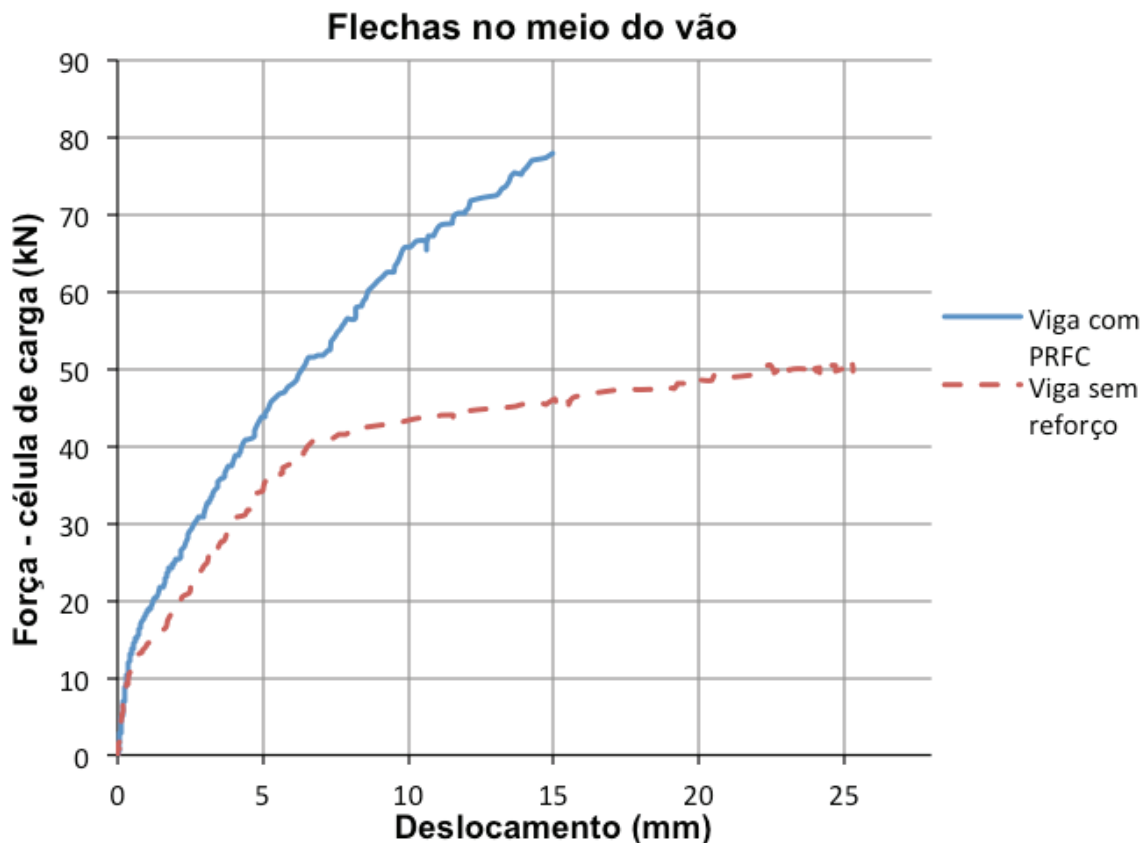


Figura 11 – Gráfico da força-célula de carga por deslocamentos verticais das vigas.
Fonte: elaboração própria.

A **Figura 12** apresenta a fissuração das vigas ensaiadas com reforço de PRFC e sem reforço após a ruína. As setas indicam o posicionamento da aplicação de carga e os triângulos representam os pontos de apoio da viga durante os ensaios. Note-se que a viga reforçada apresentou melhor distribuição de fissuras com aberturas de fissuras inferiores às da viga sem reforço.



Figura 12 – Fissuração nas vigas ensaiadas após a ruína. As setas indicam a localização dos pontos de aplicação de força durante os ensaios e os triângulos indicam os locais onde foram apoiadas as vigas. Fonte: elaboração própria.

Na região próxima ao apoio, houve o escorregamento da extremidade de um dos laminados, para uma deformação em torno de $\epsilon_u = 11,9 \text{ ‰}$, instantes antes da ruína da viga, o que não prejudicou os resultados do experimento.

A **Tabela 1** mostra os resultados experimentais das deformações nos materiais, dos carregamentos aplicados na célula de carga para os pontos analisados e das respectivas forças nas barras (armaduras e fibras) para estes carregamentos. Os valores de deformação positivos correspondem ao alongamento e negativos ao encurtamento.

Tabela 1 – Resultados experimentais das deformações específicas dos materiais para os pontos analisados e as respectivas forças nas barras (armaduras e fibras).

Vigas	Experimental												
	ϵ_s (‰)	ϵ_f (‰)	P	F (kN)	Deformações específicas nos extensômetros – ϵ (‰)						Forças (kN)		
					Armaduras inferiores		Fibras		Concreto	Força nas armaduras		Força nas Fibras	
					e4	e5	f3	f4	e1	e4	e5	-	-
Vigas sem reforço	2,78	-	A	40,22	2,8	2,7	-	-	-0,7	24,5	23,4	-	-
	3,78	-	B	50,63	3,9	3,6	-	-	-2,1	29,5	29,4	-	-
	3,97	-	C	52,55	4,2	3,8	-	-	-2,3	29,6	29,5	-	-
Vigas com reforço PRFC	2,78	-	A	44,89	2,7	2,8	3,8	3,6	-1,0	23,7	24,2	9,3	8,9
	3,78	-	B	54,27	3,7	4,1	4,7	4,5	-1,3	29,4	29,4	11,3	10,8
	3,97	-	C	55,63	3,8	4,2	4,8	4,6	-1,3	29,4	29,4	11,6	11,1
	4,50	-	P1	56,37	3,9	4,5	4,6	4,6	-1,3	29,7	29,7	11,9	11,4
	10,00	-	P2	62,54	9,8	10,4	5,7	5,7	-1,6	29,7	29,7	14,6	14,0
	-	8,54	P3	75,18	>15,9	>15,9	8,4	8,4	-2,2	29,7	29,7	21,1	20,7
	-	11,9	P4	90,54	>15,9	>15,9	11,9	11,9	-3,0	29,7	29,7	29,2	29,2

Notas:

ϵ_s : Deformação específica das armaduras tracionadas.

ϵ_f : Deformação específica do reforço de fibras de carbono.

P: Pontos de análise das curvas.

F: Força aplicada na célula de carga em kN.

e: Valores de deformação (‰) dos extensômetros instalados no concreto e nas armaduras.

F: Valores de deformação (‰) dos extensômetros instalados nos reforços de fibra de carbono.

3.4 Resultados do estudo analítico

O estudo analítico consistiu em determinar teoricamente os carregamentos aplicados na viga e as forças nos elementos tracionados, com base nas deformações das armaduras e dos laminados obtidas nos pontos dos gráficos das **Figuras 8a e 9 (Tabela 2)**.

Essa verificação seguiu os procedimentos de cálculo apresentados no item 2.4 e os critérios de verificação das normas ABNT NBR 6118 e ACI 440.2R, sendo eles: as deformações no concreto e na armadura são proporcionais às suas respectivas distâncias ao eixo da linha neutra; as seções transversais se mantêm planas após as deformações e a deformação das barras passivas aderentes em tração ou compressão são as mesmas do concreto em seu entorno; a máxima deformação no concreto comprimido é de 3 ‰ (ACI 440.2R) e 3,5 ‰ (ABNT NBR 6118); a resistência à tração do concreto é considerada nula; o diagrama tensão x deformação do laminado de fibra de carbono é considerado elástico-linear até a ruptura e é admitida a perfeita aderência entre o concreto e o laminado (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A posição de linha neutra (x) para equilíbrio da seção está expressa na **Equação 4**, onde: f_s e f_{fe} são as tensões atuantes na armadura e na fibra à tração, A_s e A_f são suas respectivas áreas, o coeficiente 0,68 corresponde ao produto de 0,85 da tensão no concreto com a altura 0,80 da região comprimida para uma seção retangular, b é a largura da seção e f_{cj} é a resistência à compressão do concreto no dia do ensaio (28 dias). As letras d e d_f da **Equação 5** referem-se às distâncias entre as forças resultantes de tração das armaduras e das fibras até a face mais comprimida da viga, para determinação do momento nominal.

$$x = \frac{f_s \cdot A_s + f_{fe} \cdot A_f}{0,68 f_{cj} \cdot b} \quad (4)$$

$$M_n = f_s \cdot A_s (d - 0,4 \cdot x) + f_{fe} \cdot A_f ((d_f) - 0,4 \cdot x) \quad (5)$$

Tabela 2 – Previsão teórica das deformações para os pontos analisados e as respectivas forças nas barras (armaduras e fibras).

Vigas	ϵ_s (‰)	ϵ_f (‰)	P	F_t (kN)	Teórico			
					Forças (kN)			
					Armaduras inferiores		Fibras	
Vigas sem reforço	2,78	-	A	28,75	23,4	23,4	-	-
	3,78	-	B	35,05	28,8	28,8	-	-
	3,97	-	C	35,17	28,9	28,9	-	-
Vigas com reforço PRFC	2,78	-	A	39,64	23,4	23,4	8,00	8,00
	3,78	-	B	49,66	28,8	28,8	10,1	10,1
	3,97	-	C	50,47	28,9	28,9	11,5	11,5
	4,50	-	P1	52,00	29,9	29,9	12,6	12,6
	10,00	-	P2	73,00	29,9	29,9	29,4	29,4
	-	8,54	P3	62,79	29,9	29,9	21,0	21,0
	-	11,9	P4	74,00	29,9	29,9	30,0	30,0

Notas:

ϵ_s : Deformação específica das armaduras tracionadas.

ϵ_f : Deformação específica do reforço de fibras de carbono.

P: Pontos de análise das curvas.

F_t : Força teórica prevista na célula de carga em kN.

Comparando-se os resultados apresentados na **Tabela 1** e **Tabela 2**, para a deformação de 10 ‰ nas armaduras, o valor da capacidade de carga (62,54 kN) da viga reforçada (ensaiada) foi inferior ao valor obtido na análise teórica (73 kN), da ordem de 13 %. Já, para as deformações de 8,54 ‰ e 11,9 ‰, houve um acréscimo da capacidade de carga da viga ensaiada em relação ao valor teórico.

A **Tabela 3** mostra as relações entre os resultados das forças aplicadas na viga (célula de carga) para todas as deformações analisadas.

Tabela 3 – Relações entre os resultados das forças aplicadas nas vigas (célula de carga) com as deformações dos pontos analisados.

Deformações ϵ (‰)	Forças aplicadas nas vigas (kN)				Relações entre as forças (%)			
	Viga teórica sem reforço	Viga ensaiada sem reforço	Viga teórica sem reforço	Viga teórica com reforço PRFC	$\frac{(4)}{(3)}$	$\frac{(2)}{(1)}$	$\frac{(4)}{(2)}$	$\frac{(3)}{(1)}$
2,78	28,75	40,28	39,64	44,89	113	140	112	138
3,78	35,05	50,63	49,66	54,27	109	144	107	142
3,97	35,17	52,55	50,47	55,63	110	149	106	144
4,50	-	-	52,00	56,37	108	-	-	-
10,00	-	-	73,00	62,54	86	-	-	-
8,54*	-	-	62,79	75,18	120	-	-	-
11,9*	-	-	74,00	90,54	122	-	-	-

Nota:

*Deformações obtidas nas fibras

Observam-se pela **Tabela 3** que as forças obtidas no ensaio da viga sem reforço, foram superiores às forças teóricas previstas, conforme a relação (2)/(1), variando de 40 % a 49 %. O acréscimo de capacidade de carga entre as análises teóricas, relativas à viga reforçada em relação à viga sem reforço, foi de 38 % a 44 %, conforme a relação (3)/(1).

4 Conclusões

A metodologia utilizada no ensaio da viga reforçada mostrou-se adequada e os resultados obtidos indicaram que o reforço com uso de laminado de PRFC inserido no cobrimento de concreto (NSM) proporcionou um aumento da capacidade de carga e uma redução de flechas da viga reforçada em comparação com a viga de referência (sem reforço).

A ruptura da viga de referência ocorreu por cisalhamento da biela de compressão devido ao espaçamento inadequado entre os estribos, sem que a armadura tracionada da região instrumentada atingisse o escoamento.

Já na viga reforçada, a ruptura ocorreu no Domínio 2 com o escoamento da armadura longitudinal com deformação de 10 ‰, concreto com deformação à compressão de 1,6 ‰ e fibras com deformação média de 5,8 ‰. O trabalho em conjuntos dos laminados e armaduras da região tracionada da viga reforçada permitiu que as armaduras tracionadas atingissem o escoamento, alterando o tipo de ruptura da viga, passando de frágil (viga sem reforço), para uma ruptura dúctil à flexão, no Domínio 2.

O acréscimo de capacidade de carga da viga reforçada em comparação com a viga sem reforço, na ruptura, foi de 16 % com uma redução de flecha de 62 % e para a ruína foi de 72 % com uma redução de flecha de 74,5 %.

Na região próxima ao apoio, houve o escorregamento da extremidade de um dos laminados, para uma deformação próxima de $\epsilon_u = 11,9$ ‰, ou seja, após a ruptura teórica, sem prejuízo aos resultados.

5 Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-08**: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills: ACI, 2008. 80 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3039/D 3039M**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken: ASTM, 2008. p. 105-116.

ARQUEZ, A. P. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2010. 242 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projetos de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço – Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado: Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2008a. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008b. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos – Ensaio de tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 70p.

CARVALHO, T. S. **Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP**. 2010. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B.A. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP**: teoria e prática. São Paulo: PINI, 2015, 517 p.

VIEIRA, A. C. C. **Influência da pré-fendilhação do betão no reforço à flexão de vigas de betão armado com laminados de CRFP inseridos**. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2013.