

# ANÁLISE ESTATÍSTICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM PRFC

## STATISTICAL ANALYSIS OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH PRFC

Carla Simone de Albuquerque<sup>1</sup>

Francisco Tadeu Sousa<sup>2</sup>

Francisco Eudázio Suriano da Silva Júnior<sup>3</sup>

Ricardo José Carvalho Silva<sup>4</sup>

**Resumo:** O presente trabalho consiste na análise estatística do comportamento estrutural de vigas reforçadas com PRFC (Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono). Essa técnica é uma opção para reforço de elementos de concreto, já que os materiais compostos de fibras de carbono são flexíveis, altamente resistentes e podem substituir com vantagens, em alguns casos, os materiais e técnicas tradicionais. Foram verificados ensaios de sete vigas biapoíadas. Uma das vigas ensaiadas não foi reforçada e foi utilizada como viga de referência. As demais vigas foram reforçadas com PRFC nas regiões de máximos momentos positivos. Inicialmente, as vigas foram ensaiadas pelo método de Stuttgart juntamente com a viga referencial. Em seguida, analisando estatisticamente os resultados, quantificou-se o efeito do uso do PRFC e do adesivo estrutural utilizados no reforço, através da comparação com a viga referencial. Quando se faz a opção por recuperar uma estrutura de concreto, deve-se procurar empregar técnicas e materiais que proporcionem as propriedades mecânicas desejadas e o maior período de vida útil possível. Por esse motivo, o uso do concreto reforçado com compósitos de fibras de carbono tem se mostrado uma alternativa interessante. O uso de PRFC se mostrou bastante eficiente para o reforço de vigas, entretanto, ainda existem alguns problemas, principalmente sobre como ancorar essas fibras de maneira que os esforços de cisalhamento da viga não arranquem as fibras antes do Estado Limite Último.

**Palavras-chave:** Análise. Vigas. Fibra de carbono. Reforço.

**Abstract:** The present work consists of the statistical analysis of the structural behavior of reinforced beams with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers). This technique is an option for strengthening of concrete elements, since carbon fibers composite materials are flexible, highly resistant and can replace with some advantages, in some cases, traditional materials and techniques. Tests of seven bi-supported beams were verified. One of the beams tested was not strengthened and was used as reference beam. The other beams were strengthened with CFRP in the regions of maximum positive moments. Initially, the beams were tested by the Stuttgart method along with the reference beam. Then, statistically analyzing the results, the

<sup>1</sup> Engenheira Civil e Matemática, Universidade Estadual Vale do Acaraú/Grupo de Pesquisa GEM, carla19matematica@gmail.com

<sup>2</sup> Matemático, Universidade Estadual Vale do Acaraú/Grupo de Pesquisa GEM, tadeu1205@gmail.com

<sup>3</sup> Engenheiro Civil mestrando em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande - FURG/Grupo de Pesquisa GEM, jrsuri@outlook.com

<sup>4</sup> Professor doutor do curso Engenharia Civil, Universidade Estadual Vale do Acaraú/Grupo de Pesquisa GEM, ricardo.carvalho222@gmail.com

effect of the use of the CFRP and the structural adhesive used in the strengthening was quantified through the comparison with the reference beam. When making the choice to recover a concrete structure, one must seek to employ techniques and materials that provide the desired mechanical properties and the longest possible useful life. For this reason, the use of concrete strengthened with carbon fiber composites has proved to be an interesting alternative. The use of CFRP has shown to be quite efficient for the strengthening of beams, however, there are still some problems, especially on how to anchor these fibers so that the shear stresses of the beam do not pull the fibers before the Ultimate Limit State.

**Keywords:** Analysis. Beams. Carbon fiber. Strengthening.

# 1 INTRODUÇÃO

Nesses últimos anos, a cidade de Sobral - CE tem crescido bastante. O processo de verticalização é notório, com o aparecimento de diversos edifícios. Porém, essas edificações precisam de manutenção e reabilitação estrutural na medida em que vão envelhecendo. Uma das técnicas mais usadas de reabilitação de estruturas de concreto armado é o reforço estrutural. Esse problema motivou a concepção de um projeto de pesquisa que se proponha a estudar a aplicação de Polímeros Reforçados de Fibras de Carbono (PRFC) como reforço estrutural para vigas de concreto armado. O reforço de PRFC é uma técnica relativamente nova vinda da Europa e dos EUA que vem se desenvolvendo bastante nessa última década e, hoje em dia, vem se popularizando no Brasil.

O Polímero Reforçado por Fibras – PRFC é um material compósito que, além de ser usado como reforço de estruturas já existentes, tem sido também empregado como armadura de concreto, em vez da tradicional armadura de aço de acordo com, LOU; LOPES; LOPES (2015).

O limitado número de pesquisas na área, a omissão da norma brasileira sobre o assunto e o crescente número de construções em Sobral - CE com necessidade de reabilitação, além de justificarem a pesquisa, também tornam essa investigação de suma relevância para a engenharia estrutural regional.

O objetivo desse trabalho é analisar o comportamento estrutural, quanto a eficiência do reforço de vigas através da aplicação de PRFC considerando a resistência mecânica, aderência e segurança, aprofundando-se no estudo dessa técnica de reabilitação, apresentando algumas peculiaridades.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A norma brasileira NBR 6118 (2014) estabelece como exigências de durabilidade que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto, e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua

segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante um período mínimo de 50 anos, sem exigir medidas extras de manutenção e reparo.

De acordo com Albuquerque e Silva (2014), as patologias apresentadas por algumas estruturas e a necessidade de aumento da capacidade de carga de outras fizeram com que diversas técnicas fossem desenvolvidas para o reforço de vigas de concreto armado. Inúmeros estudos têm demonstrado que atualmente existe uma enorme quantidade de estruturas de concreto armado inadequadas ao uso.

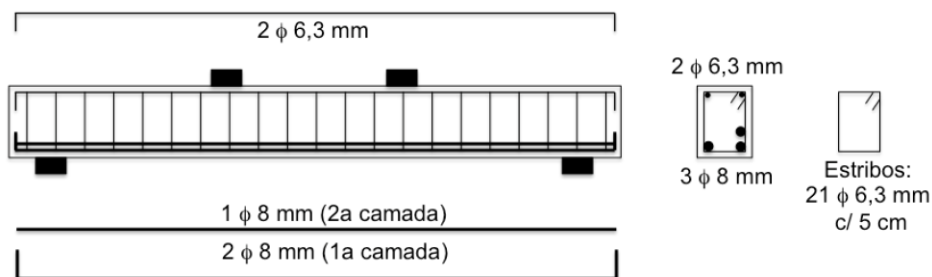
Foram confeccionadas sete vigas iguais de geometria de 110 cm de comprimento, 10 cm de largura e 15 cm de altura. As sete vigas ensaiadas, apresentam 3  $\phi$  8 mm (armadura inferior), sendo uma barra na segunda camada, 2  $\phi$  6,3 mm (armadura superior) e 21 estribos  $\phi$  6,3 mm distribuídos a cada 5 cm como pode ser observado na Tab. 1 e Fig. 1.

**Tabela 1 – Dados das vigas ensaiadas**

Viga	Concreto			Aço ( $\phi$ 8 mm)				Reforço com PRFC				
	b (mm)	h (mm)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ (%)	$f_y$ (MPa)	$d_{méd}$ (mm)	Compr. (mm)	Nº Cam.	$f_t, máx$ (MPa)	$d_{méd}$ (mm)
V1									-	-	-	-
V2								300	1	4900	150,09	
V3								300	2	4900	150,26	
V4	100	150	30,63	3,20	150,72	1,00	500	110	700	1	4900	150,09
V5								700	2	4900	150,26	
V6								700	1	4900	150,09	
V7								700	2	4900	150,26	

**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 1 – Detalhamento das armaduras da viga**



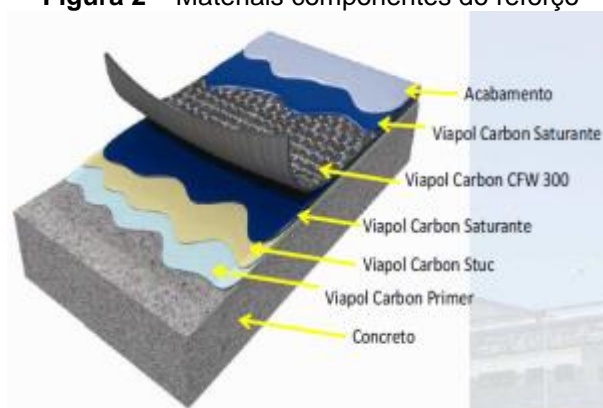
**Fonte:** Autoria própria.

De acordo com Borges (2016) para qualquer procedimento de reforço, se adotado como medida corretiva quando a estrutura já apresenta patologias, é fundamental promover reparos para garantir um substrato íntegro e que disponha de suficiente resistência mecânica para promover a transferência dos esforços da estrutura para o reforço e de boa aderência da superfície para, no caso de reforços colados, impedir que a ruptura ocorra na interface entre o reforço e o substrato.

Os polímeros são materiais de alto desempenho sobre os quais o interesse tem crescido nos últimos anos, pois podem oferecer alta resistência mecânica e grande durabilidade e, como consequência, potencial ganho no ciclo de vida da estrutura segundo, RIBEIRO; DINIZ (2013).

A fibra de carbono utilizada para o reforço foi a Viapol Carbon CFW 300, como mostra a Fig. 2.

**Figura 2 – Materiais componentes do reforço**



**Fonte:** Manual Viapol (2010)

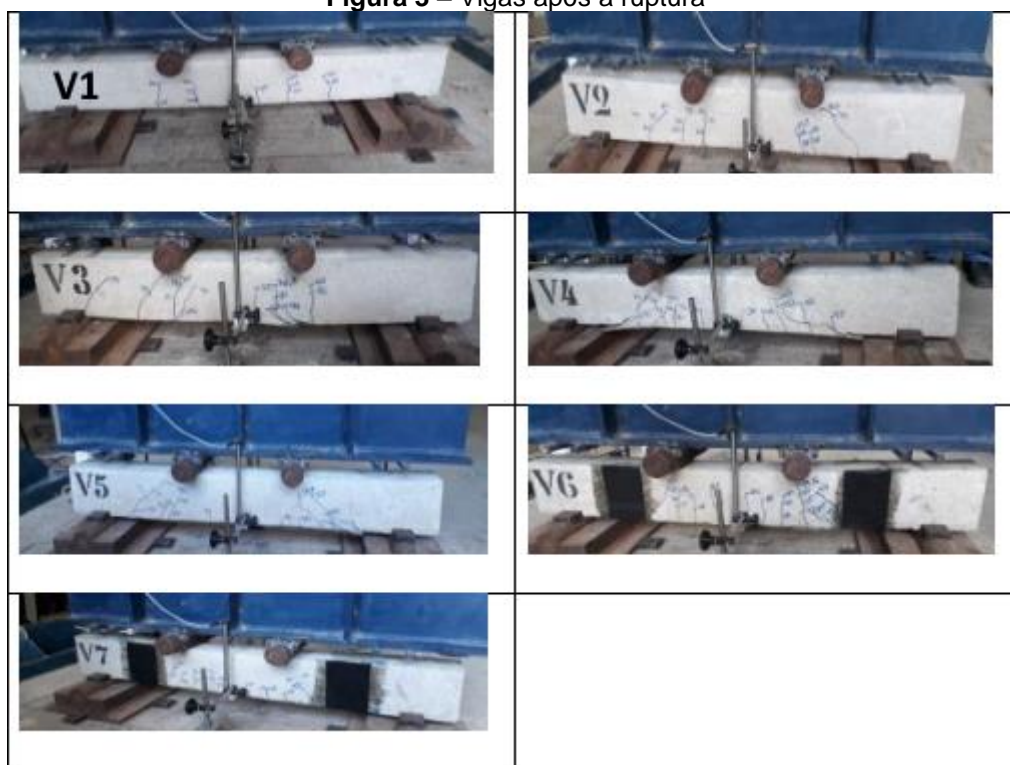
Os ensaios das vigas analisadas foram realizados de acordo com a NBR 6118 (2014), e seguiram a metodologia do tradicional ensaio de Stuttgart com

um trecho bi apoiado de 90 cm sob a aplicação de carga em dois pontos distando 30 cm. O ensaio de Stuttgart caracteriza-se por dividir a viga em dois trechos bem distintos: Trecho sob Flexão Pura (trecho central) e Trecho sob Flexão Simples (trechos laterais).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No total foram ensaiadas 7 vigas. A última etapa ocorreu dez dias após a reabilitação das vigas. A carga foi aplicada de maneira gradativa e uniforme de 10 em 10 kN verificava-se o surgimento de fissuras, como também, a evolução das fissuras já existentes, sempre as demarcando a princípio com um pincel, até chegarem a ruptura, conforme ilustram a Fig. 3.

Figura 3 – Vigas após a ruptura



Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais mostram os valores de resistência à compressão e à tração do concreto (Tab. 2), das vigas submetidas ao ensaio de Stuttgart. Analisando-se esses resultados, foram

identificadas as causas de ruptura do elemento estrutural e avaliada a eficiência do reforço aplicado.

**Tabela 2 – Resultados das vigas ensaiadas**

Viga	$V_u^{(1)}$ (kN)	$V_u/V_u, V1$ (kN)	Modo de Ruína
V1	48,1	1,00	Flexão
V2	66,7	1,39	Flexão
V3	74,0	1,54	Flexão
V4	54,5	1,13	Descolamento da Fibra
V5	55,9	1,16	Descolamento da Fibra
V6	88,7	1,84	Flexão
V7	92,9	1,93	Flexão

(1)  $V_u$  é a carga de ruína da viga.

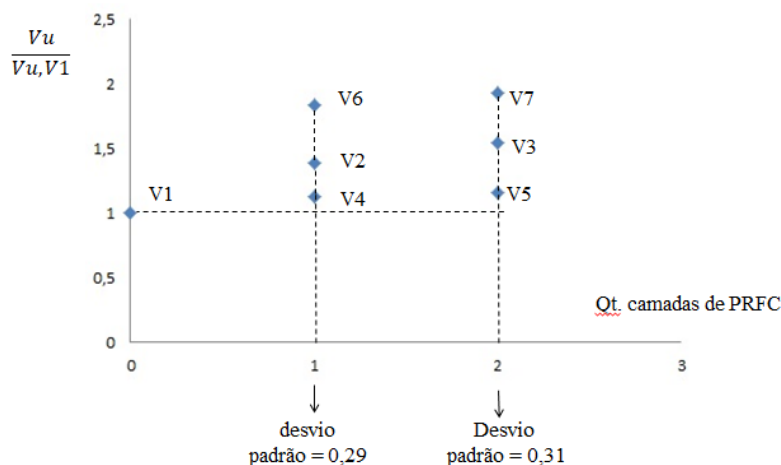
**Fonte:** Autoria própria

Em geral, percebe-se que as vigas que foram reforçadas obtiveram aumento na carga de ruptura. Além disso, houve mudanças nos padrões de fissuração e descolamento do reforço. Como estimado no dimensionamento, todas as vigas, com exceção da V4 e V5, vieram à ruína por flexão, deformação plástica excessiva do aço. O descolamento da fibra nessas duas vigas ocorreu devido às faixas maiores coladas na parte inferior não possuírem ancoragem. Mesmo havendo o descolamento percebe-se um aumento de 13% e 16% respectivamente em relação a viga de referência.

É notório o aumento da carga de ruptura das vigas V6 e V7 em relação a V1, onde tiveram um crescimento de 84% e 93%, respectivamente. Constatando-se que as duas faixas de fibra que abraça as fibras inferiores fornecem uma melhor ancoragem a peça reforçada. A Figura 4 mostra o desvio padrão em relação a quantidade de camadas de reforço com fibra, e dessa forma, é fácil perceber, um maior ganho de capacidade de carga das vigas reforçadas com duas camadas em relação às de uma camada (V2 x V3; V4 x V5; V6 x V7).

As vigas com duas camadas tiveram fissuras mais curtas, em outras palavras ( $x/d$ ) maiores. Menos ductilidade na região de flexão pura. De acordo com a NBR6118 (2014) projetos com  $(x/d) > 0,45$  é proibido.

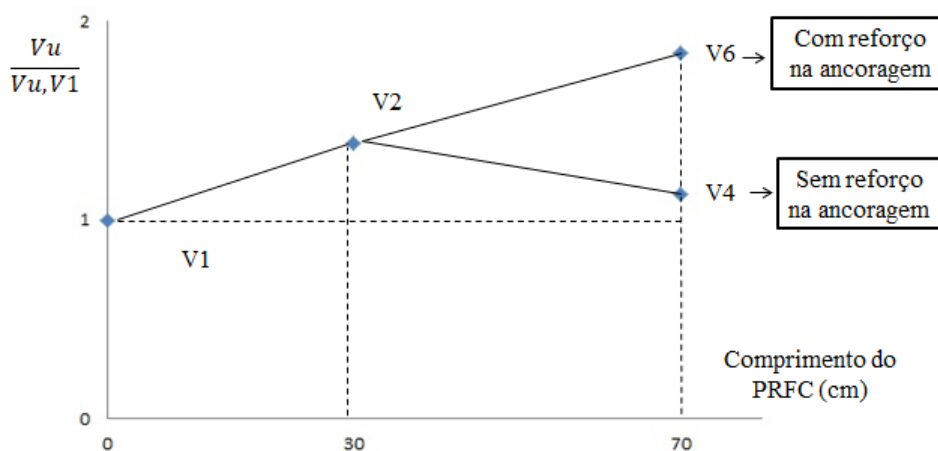
**Figura 4** – Desvio padrão em relação à quantidade de camadas de PRFC



Fonte: Autoria própria

Nas Figs. 5, 6 e 7, são apresentadas as vigas como um conjunto de dados referentes às características do reforço aplicado. Nota-se a variação da utilização do comprimento e da ancoragem das fibras que foram utilizadas, para isso, foi calculada a média e desvio padrão de cada conjunto de vigas, em relação à média, a maior variação é nas vigas com camadas, mas de apenas 20%. E o desvio padrão apresentou uma variação de 363% nas vigas com fibra de comprimento 70 cm.

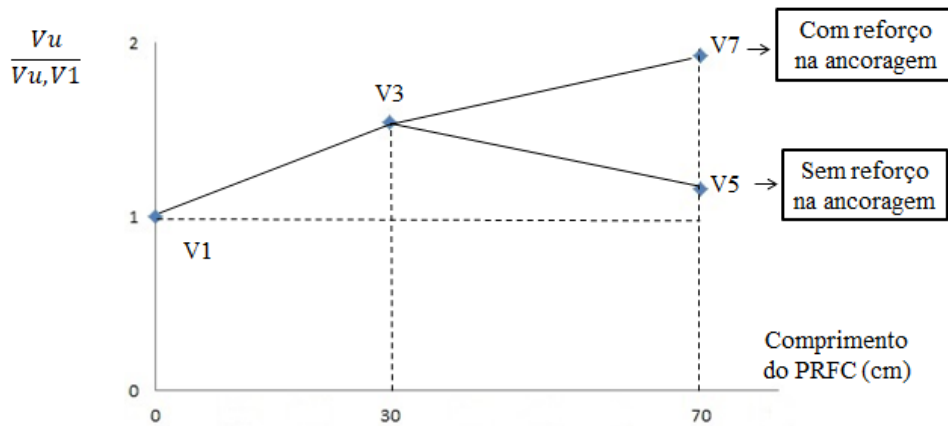
**Figura 5** – Vigas com uma camada



Fonte: Autoria própria

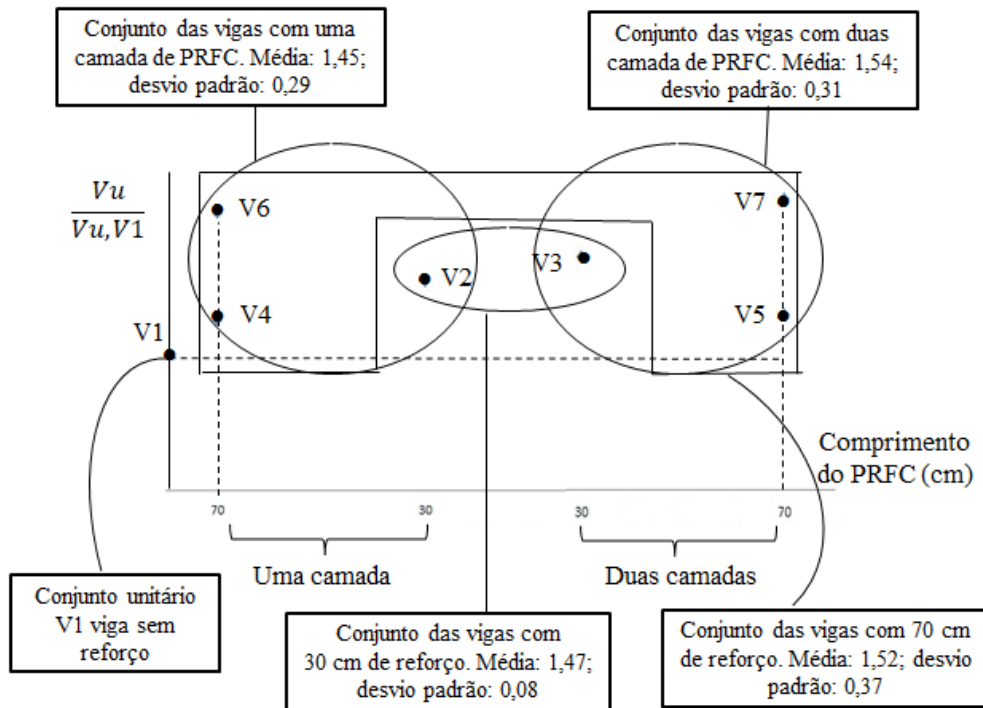


**Figura 6 – Vigas com duas camadas**



Fonte: Autoria própria

**Figura 7 – Conjunto das Vigas**



Fonte: Autoria própria

## 4 CONCLUSÕES

As vantagens de se utilizar o reforço com polímeros de fibra de carbono em relação a outros métodos é o fato de não precisar cortar a viga preservando

suas armaduras longitudinal e transversal, não há mudança geométrica da viga, ou seja, o aumento de seção é praticamente irrelevante.

Apesar dos resultados da viga V4 e V5 terem se mostrado pouco menos satisfatórios em relação as demais vigas ensaiadas, ainda assim, aumentaram suas cargas, ao compará-las a V1. No Gráfico das Figs. 5 e 6 é mostrado que o acréscimo da segunda camada não aumenta significativamente a resistência da viga reforçada, e o gráfico da Fig. 7 mostra que o reforço de comprimento maior só é eficiente com ancoragem das fibras nas vigas. Analisando o comportamento estrutural das vigas ensaiadas, conclui-se que, mesmo diminuindo um pouco a ductilidade das vigas, a técnica proposta pode ser uma alternativa válida às técnicas de reforço utilizadas atualmente, apresentando-se como um método de fácil execução e bom desempenho.

Enquanto não existir uma norma brasileira que regulamente o uso dos laminados de fibra de carbono para reforço de estruturas, cabe aos projetistas optarem pelo método de dimensionamento caso a caso, sempre atentando para aspectos como segurança, responsabilidade, economia e contexto no qual se insere. É importante ressaltar que as conclusões desse trabalho têm como base apenas as vigas analisadas. Outras pesquisas futuras, com vigas com diferentes dimensões e taxas de armaduras, são necessárias para uma melhor validação desta pesquisa.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste estudo.

## **REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS [ABNT]. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.

ALBUQUERQUE, C.S.; SILVA, R. J. C. Estudo teórico de reforço de vigas de concreto armado. **Essentia**, Sobral, 2014, v. 16, n. 1, p. 241-262.

**Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.4, n.2, abril de 2019.**

BORGES, Igor de Oliveira. **Estudo de Reforço de vigas e lajes com Compósitos de Fibra de Carbono colados**. 2016. 59 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

LOU, T.; LOPES, S. M. R.; LOPES, A. V. A comparative study of continuous beams prestressed with bonded FRP and steel tendons. **Composite Structures**, 2015, v. 124, p. 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.009>

RIBEIRO, S. E. C.; DINIZ, S. M. C. Reliability-based design recommendations for FRP-reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, 2013, v. 52, p. 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.026>

VIAPOL. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. 2010.

-----  
**Edição especial** - 8º MCSul - Conferência Sul em Modelagem Computacional e VIII SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica.

**Enviado em:** 20 dez. 2018

**Aceito em:** 08 jan. 2019

**Editores responsáveis:** João Paulo Silva Lima / Liércio André Isoldi / Mateus das Neves Gomes