



XIV Congresso Brasileiro
de Pontes e Estruturas

Análise do dimensionamento de reforço estrutural à força cortante utilizando CFRP em vigas de concreto armado

Luiz Fhelipe Fernandes de Oliveira¹, Matheus Pimentel Tinoco², Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho³

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) / luizfhelipe3106@poli.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) / matheustinoco@poli.ufrj.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) / julioholtz@poli.ufrj.br

Resumo

Atualmente, é de grande importância o desenvolvimento de técnicas que permitam a recuperação e o reforço de estruturas de concreto armado. Uma das técnicas de reforço estrutural que mais vêm ganhando notoriedade é a colagem externa de compósitos poliméricos reforçados por fibra de carbono (CFRP). A aplicação do reforço com fibras de carbono possui algumas variações, que dizem respeito à parcela do elemento envolvida (completa, em U, ou aplicação nas laterais), ao espaçamento e largura dos compósitos. Há uma série de normas internacionais que permitem dimensionar esse tipo de reforço, como a norma ACI 440.2R (2017), o Bulletin fib 14 (2001) e o Bulletin fib 90 (2020). No entanto, o dimensionamento ao cortante apresenta particularidades que levam a resultados distintos, dependendo da norma utilizada. Neste sentido, o presente trabalho visa comparar os resultados obtidos a partir de diferentes normas e verificar suas acurácias. Um banco de dados foi desenvolvido, a partir de trabalhos existentes na literatura, a respeito de ensaios recentes em vigas reforçadas à força cortante com CFRP. Através de análise estatística, realizou-se a comparação dos valores nominais, calculados com base nas principais normas, com os valores experimentais. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que os modelos apresentados nas normas têm acurácia afetada por diversos fatores, como presença e tipos de estribos e ângulo de fissuração, geralmente superestimando a contribuição do reforço ao cortante. Também se observou que reforços com ancoragem são mais eficientes, se comparados a reforços sem ancoragem, mas requerem uma atenção especial no dimensionamento, devido à grande variedade de tipos de ancoragens e às particularidades das normas para reforços com a presença de ancoragem.

Palavras-chave

CFRP, Reforço Estrutural, Cortante, Concreto armado.

Introdução

Os compósitos de fibra de carbono foram estudados e utilizados como reforço estrutural pelas primeiras vezes nas décadas de 80 e 90, permanecendo um método pouco adotado até os dias de hoje. Ao longo dos últimos 10 anos, no entanto, muitas normas que tratam desse tema foram atualizadas e publicadas em novas versões, como o Bulletin fib 90 (2020) e o ACI 440.2R (2017). Embora o dimensionamento do reforço esteja consolidado para o reforço à flexão, existe uma grande dificuldade em se dimensionar o sistema para resistir à força cortante. Diversos autores buscaram determinar fatores que influenciam o resultado, como a taxa de estribos de aço, ângulo de fissuração do concreto, largura e espessura do compósito.

A aplicação do CFRP possui algumas variações, que dizem respeito à parcela do elemento envolvida (completa, em U, ou nas laterais), ao espaçamento e largura dos compósitos. O reforço é aderido ao

concreto com uso de resina epóxi, após limpeza e regularização da superfície. Em alguns casos adiciona-se também um sistema de ancoragem para elevar a força cortante última do elemento.

No presente trabalho serão apresentadas as principais normas referentes ao dimensionamento de reforço de CFRP à força cortante. Em seguida, aplica-se os métodos sobre uma base de dados reunida da literatura, contendo ensaios recentes em vigas de concreto, que recebem o reforço de CFRP em U. Nota-se que há uma série de diferenças entre os ensaios, permitindo separá-los em categorias, como presença ou não de estribos de aço e aplicação contínua ou em tiras. Por fim, avalia-se a acurácia de cada método em relação às categorias selecionadas, com objetivo de definir o comportamento das normas para cada caso.

Reuniu-se também resultados de ensaios em vigas reforçadas com CFRP que receberam sistema de ancoragem, verificando em seguida o ganho de resistência providenciado pelo mesmo. Vale ressaltar que existem diversos tipos de ancoragem que podem ser implementados e neste trabalho serão avaliadas a eficiência de cada uma.

Normas de Projeto

Atualmente no Brasil, importantes obras de reforço estrutural com CFRP já foram realizadas, como a reforma no estádio do Maracanã, no Rio de Janeiro e no Viaduto Santa Tereza, em Belo Horizonte, MG. As empresas que realizam esses serviços tomam como base o ACI 440.2R (2017) e o Bulletin fib 14 (2001). Foi recentemente publicada a versão mais atual do fib, o fib 90, que será apresentada nos tópicos seguintes, ressaltando as alterações em relação à anterior. Além disso, também se aborda o código americano ACI 440.2R.

Bulletin fib 90 (2020)

O modelo atual trata de duas formas de aplicação, o envolvimento completo ou em U, podendo haver cobertura total das faces laterais na extensão da viga ou presença de um espaçamento s_f entre reforços de CFRP. O envolvimento completo é indicado para pilares, portanto será apresentado apenas a configuração em U. Vale ressaltar que a norma recomenda evitar o método de colagem apenas nas duas laterais. O valor da força cortante resistida pelo reforço de CFRP está apresentado na Equação 1.

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw}}{s_f} h_f \times f_{fwd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (1)$$

A_{fw} : área do reforço externamente aplicado, medida perpendicular à direção das fibras.

s_f : espaçamento entre os reforços, medido na direção do eixo da viga;

h_f : altura do CFRP interceptado pela fissura principal, igual a $h - 0,1d$ no caso do reforço cobrir toda a altura da face, onde h é a altura da viga e d , a altura útil da viga.

α : ângulo entre as fibras e o eixo da viga;

f_{fwd} : tensão média de projeto Do CFRP interceptado pela fissura principal no ELU.

A expressão para o cálculo da tensão f_{fwd} depende do máximo comprimento de ancoragem l_e que permite comparar com a distância do ponto em que a fissura principal intercepta o reforço até a parte mais alta do mesmo, medida na direção das fibras. As expressões para o cálculo da tensão última são apresentadas na referida norma.

No caso mais comum de aplicação em U sem ancoragem, a tensão última f_{fwd} pode ser definida por equações apresentadas na norma, dependendo do espaçamento entre os reforços, da sua altura e da região interceptada pela fissura principal, conforme mostrado na Figura 1, a depender da relação entre a altura h_f e o seno do ângulo α entre as fibras e o eixo da viga.

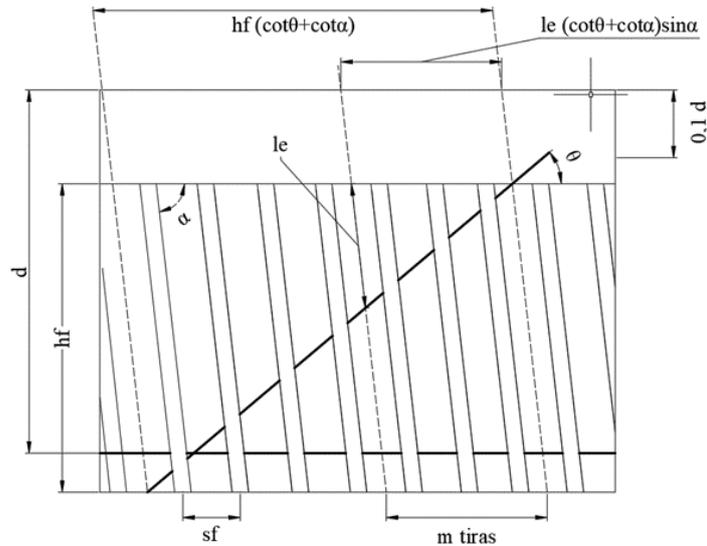


Figura 1 - Variáveis envolvidas no cálculo da tensão última de descolamento no reforço (adaptada do Bulletin fib 90)

ACI 440.2R (2017)

A resistência ao esforço cortante deve ser calculada utilizando-se um fator de redução ϕ , definido em ACI 318 (2018). Adiciona-se a contribuição do reforço às parcelas de resistência do concreto e do aço, multiplicado por outro fator de redução, conforme a Equação 2.

$$\phi Vr = \phi (Vc + Vs + \psi_f \cdot Vf) \quad (2)$$

Onde:

Vr : resistência nominal ao cortante da viga

Vc : contribuição do concreto ao cortante.

Vs : parcela do cortante resistido pelo aço transversal

Vf : contribuição do reforço de CFRP ao cortante

ψ_f : fator de redução adicional e ϕ : fator de redução do cortante nominal

O valor de ψ_f depende da configuração das fibras. Recomenda-se 0,95 para elementos completamente envolvidos e 0,85 para envolvimento em U e colagem apenas nas laterais. A contribuição das fibras Vf é baseada na orientação das mesmas e no padrão de fissuras assumidas (Khalifa et al. 1999). A Figura 2 ilustra as variáveis presentes no cálculo. A Equação 3 define a contribuição do reforço.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (3)$$

Onde:

A_{fv} : área da seção transversal

f_{fe} : tensão última efetiva no reforço

s_f : espaçamento entre os reforços, medido em relação ao eixo dos mesmos

d_{fv} : altura útil do reforço

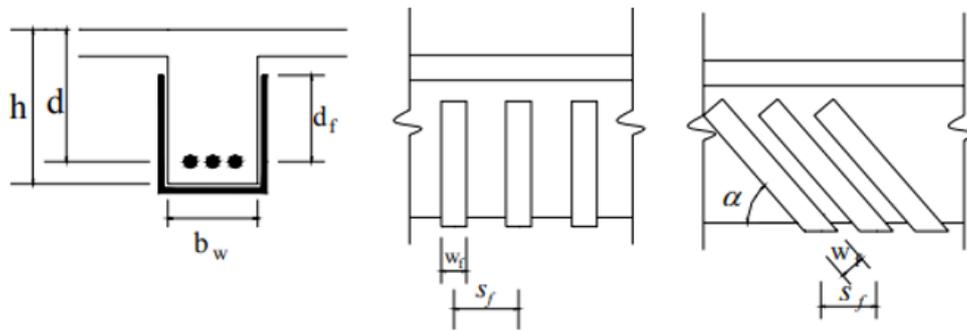


Figura 2 - Variáveis do dimensionamento do reforço com CFRP (ACI 440.2R , 2017)

Base de Dados

Para evidenciar o comportamento do reforço de CFRP à força cortante e verificar os procedimentos de dimensionamento propostos pelas normas, foi levantada uma extensa base de dados, a partir da literatura. Os resultados foram divididos em dois grupos, relativos à presença de ancoragem ou não. Isso se deve ao fato de que o modo de ruptura seria diferente, implicando em procedimentos de dimensionamento distintos. Os artigos referentes a ensaios sem ancoragem se encontram listados na Tabela 1. Em relação aos ensaios com sistema de ancoragem, utilizou-se como referência os estudos de Al Rousan (2017), Bae E Belarbi (2013), Gamino (2010), Mofidi (2011), Khalifa (2000), Oller (2019), Benzeguir (2020), Chen (2016), Kim (2015), Mhanna (2021) e Randl (2018).

Tabela 1 - Resumo das fontes utilizadas na base de dados.

Referência	Assunto	Referência	Assunto
BENZEGUIR & CHAALLAL 2020	Analisa-se a contribuição do CFRP para vigas T de diferentes tamanhos e presença ou não de ancoragem.	ALZATE 2013	Testou-se o ACI 440, fib TG 9.3, CNR e TENG et al (2002), em vigas cujo reforço de CFRP apresentaram configurações variadas.
KARZAD 2019	Testou-se o ACI 440.2R, do fib TG 9.3 e avaliou-se a interação dos estribos de aço com os de CFRP e o efeito da adição de camadas.	ANNAIAH 2020	Examinou-se vigas T reforçadas com mantas de CFRP, avaliando o ganho de resistência proporcionado pelo sistema. Também testou-se um sistema de ancoragem por NSM.
GODAT et al 201	Examinou-se a contribuição do reforço com CFRP em vigas de diferentes tamanhos.	GAMINO 2020	Proucurou-se testar os dimensionamentos propostos pelas normas do ACI 440, fib-14 e formulações mais recentes.
MOFIDI & CHAALLAL 2011	Avaliou-se o efeito da razão largura-espacamento das tiras de CFRP, para diferentes números de camadas.	SPAGNOLO 2013	Avaliou-se a interação dos estribos de aço com os de CFRP e verificou-se a influência do número de camadas.
TAMER 2012	Procurou-se avaliar dois sistemas de ancoragem em vigas previamente rompidas ao cortante.	BEBER 2002	Proucurou-se analisar a eficiência do sistema de reforço à flexão e ao cortante com CFRP, através de um estudo experimental.
CHAALLAL 2011	Analisou-se um sistema de ancoragem inovador. Também foi verificada a interação dos estribos de aço com os de CFRP	NARA 2008	Descreveu-se as normas e dimensionamentos, testando-os através de um estudo experimental com diferentes configurações do reforço de CFRP.

Análise dos Resultados

Separou-se os ensaios sem ancoragem em relação a três características: inclinação da fissura principal de cisalhamento igual a 45° ou 30°; presença ou não de estribos de aço; aplicação contínua ou em tiras. Em seguida, elaborou-se gráficos de dispersão, em que o eixo das abscissas é a força cortante última nominal ($V_{f, nom}$) e o das ordenadas é a força cortante última experimental ($V_{f, exp}$). Traçou-se então a reta de regressão linear, passando pela origem (0,0), e apresentou-se seu coeficiente de determinação. É desejável que a inclinação desta reta seja próxima de 1, assim como o R^2 , pois indica boa correlação dos resultados. Além disso, calculou-se a média da razão $V_{f, nom} / V_{f, exp}$, junto com seu desvio padrão e coeficiente de variação (CoV), como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Médias, desvios padrões e CoVs de $V_{f, nom} / V_{f, exp}$.

$\theta_{cr} = 45^\circ$		
	Vf FIB-90 / Vf exp	Vf ACI-440 2R / Vf exp
MÉDIA	1,64	1,26
DESVIO PADRÃO	1,07	0,90
CoV (%)	64,95	71,75

Primeiramente, observou-se uma melhora na acurácia do fib 90 ao se considerar a inclinação igual a 45° em vez de 30°, pois a média de $V_{f, nom} / V_{f, exp}$ aproximou-se de 1 (de 2,63 para 1,64), assim como o desvio padrão, e a inclinação da reta de regressão também mostrou esse comportamento (de 0,439 para 0,97). O ACI 440.2R não considera a influência do ângulo da fissura principal, e teve a média de $V_{f, nom} / V_{f, exp}$ igual a 1,22, e inclinação da reta de regressão igual a 0,77. De modo geral, o fib 90 superestima a contribuição do reforço, principalmente na presença de armadura transversal e/ou aplicação contínua, onde se nota aumento da média $V_{f, nom} / V_{f, exp}$ de 1,17 para 1,83 e 1,38 para 2,39 respectivamente, e redução do coeficiente angular da reta de regressão de 0,99 para 0,62 e de 0,79 para 0,42. No ACI-440.2R, da mesma forma que no fib 90, a interferência do estribo deve ser levada em conta, pois sua presença eleva a razão $V_{f, nom} / V_{f, exp}$ (de 0,92 para 1,42), além de reduzir o coeficiente angular da reta de regressão (de 1,09 para 0,83) e o R^2 (de 0,853 para 0,733), aumentando a dispersão dos resultados. Conclui-se também que ele é mais preciso em aplicações descontínuas, reduzindo a média de $V_{f, nom} / V_{f, exp}$ de 1,61 para 1,16 e aproximando a inclinação da reta de regressão para 1 (de 0,65 para 1). O coeficiente de determinação e o CoV permanecem em valor próximo a 0,8 para ambos os casos. A Figura 3, a seguir, apresenta os gráficos elaborados a partir dos valores obtidos na literatura.

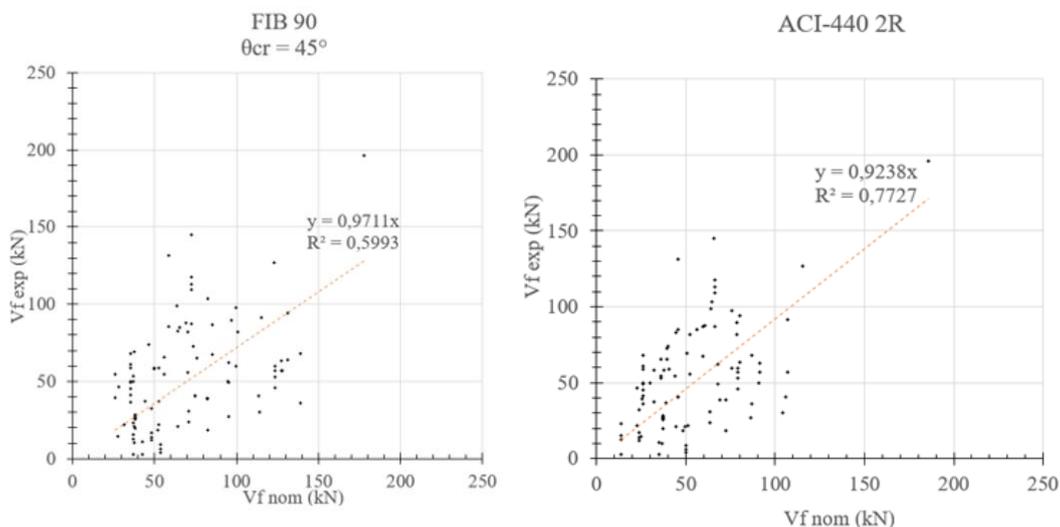


Figura 3 - Gráficos de dispersão das normas fib 90 e ACI 440.2R para inclinação da fissura principal igual a 45°.

Para avaliar a melhora que os sistemas de ancoragem proporcionam na eficiência do reforço de CFRP, realiza-se a comparação do cortante último entre vigas idênticas, sendo a única divergência a presença ou não de ancoragem (V_f, exp e V_f, na). Além disso, a deformação efetiva também é um ótimo indicador da contribuição do reforço, portanto nos artigos em que foram obtidas essas medidas através de strain gauges colados no CFRP, os valores também são comparados. O aumento relativo desses dois índices entre ensaios sem ancoragem e ancorados é calculado, evidenciando o comportamento que a presença da mesma propicia. Também verifica-se o dimensionamento do fib 90 em relação a este aspecto, calculando o k_a , e comparando os valores experimentais de f_{fwd} , a tensão no reforço obtida através da deformação aferida, com os teóricos. A seguir apresentam-se duas das tabelas elaboradas no estudo.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de ancoragem por inserção de placa na mesa.

Referência	Nome	Resultados dos ensaios					
		Vf exp (kN)	Vf na (kN)	$\epsilon_{fe, anc}$	$\epsilon_{fe, na}$	Ef (GPa)	$f_{fwd, exp}$
BENZEGUIR 2020	M S1 Str Anc	98	37	0,0098	0,0009	90	882
	L S1 Str Anc	90	30	0,0035	0,00165	90	315
CHEN 2016	S0-UEA1	142,68	39,72	0,009051	0,0024	226	2045,526
	S0-UEA2	170,51	39,72	0,01151	0,0024	226	2601,26
	S8-UEA1	90,75	29,71	0,00699	0,002067	226	1579,74

Tabela 4 - Análise da ancoragem por inserção de placa na mesa.

Referência	Nome	Comparação sem ancoragem		
		% ganho Vf	% ganho $\epsilon_{fe, anc}$	$f_{fwd, exp}/f_{fwd, nom}$
BENZEGUIR 2020	M S1 Str Anc	164,86	988,89	1,31
	L S1 Str Anc	200,00	112,12	0,47
CHEN 2016	S0-UEA1	259,21	277,13	0,94
	S0-UEA2	329,28	379,58	1,19
	S8-UEA1	205,45	238,17	0,72
Média		231,76	201,40	0,93

A análise das ancoragens permite concluir que sua utilização é altamente recomendada na execução do reforço com CFRP. Apesar de reduzir a praticidade da implementação do sistema, em todos os ensaios foi verificado aumento considerável da eficiência do reforço, elevando o valor de força cortante última ao menos em 57,8 %, no caso de aparafusamento de placa metálica. Nas ancoragens por inserção de placa na mesa, o ganho percentual médio de V_f foi de 231,76 %. No mesmo sentido, o ganho percentual médio na deformação efetiva foi de 62,5% e 201,4% respectivamente. Entretanto, o dimensionamento pelo fib 90 (2020) revelou inconsistências, ao estabelecer um limite para o coeficiente de ancoragem que na maioria das vezes era ultrapassado, ao se realizar seu cálculo a partir dos resultados experimentais. Além disso, observou-se uma grande dispersão nos k_a obtidos.

Conclusões

A partir da análise realizada acerca do dimensionamento da contribuição do reforço de CFRP, pode-se afirmar que as normas tendem a superestimar a força cortante que será sustentada pelo reforço, em especial o fib 90 (2020). Vale ressaltar que a execução incorreta do sistema afeta o resultado, podendo ocorrer descolamento prematuro e contribuições mínimas do reforço. Fora esse fato, a complexidade da resistência da viga à força cortante implica em que as parcelas resistidas pelo concreto e estribos podem apresentar diferenças consideráveis de um ensaio para outro semelhante, o que dificulta o objetivo do dimensionamento. Também se constata a necessidade de uma variável

referente à presença de armadura transversal, que altera consideravelmente o comportamento do CFRP, aumentando a tendência supracitada de superestimar sua contribuição. Quanto à inclinação da fissura principal, apesar de influenciar diretamente no fluxo de tensões, verifica-se que a consideração de 45° leva a uma boa correlação dos resultados, a exemplo do ACI 440.2R (2017), que não utiliza esse dado no cálculo e apresentou acurácia razoável. O modelo de Mofidi e Chaallal (2013) inclui o coeficiente relativo à armadura transversal, além de subestimar em muitos casos (normalmente em vigas sem estribos) a contribuição do reforço, ao contrário das outras normas. No entanto, notam-se os menores coeficientes de determinação, maiores desvios padrões e coeficientes de variação, o que indica grande dispersão dos resultados em relação às demais normas.

Agradecimentos

O autor principal gostaria de agradecer aos orientadores, Professor Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho e Professor Matheus Pimentel Tinoco, pelo esforço e paciência que prestaram durante o desenvolvimento deste trabalho. Também se agradece à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), onde o estudo foi realizado.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI Committee 318. Detroit, 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R-02. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, USA, 2017.

AL-ROUSAN R. Z. Shear behavior of RC beams externally strengthened and anchored with CFRP composites, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 63, No. 4, 2017.

BAE, W., BELARBI, A. Behavior of various anchorage systems used for shear strengthening of concrete structures with externally bonded FRP sheets. *J Bridg Eng.*, 2013.

BULLETIN FIB 90. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. fib Task Group 5.1, Lausanne, Switzerland, 2020.

GAMINO, A.L., SOUSA, J., MANZOLI, O.L., BITTENCOURT, T.N. R/C Structures strengthened with CFRP Part II: analysis of shear models. *Rev IBRACON Estruturas e Mater.*, 2010.

ALZATE, A., ARTEAGA, A., DE DIEGO, A., CISNEROS, D., PERERA, R. Shear strengthening of reinforced concrete members with CFRP sheets. *Structural Engineering and Mechanics*, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R-02 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. MI, USA, 2003.

ANNAIAH, R. *Shear performance of RC beams strengthened in situ with composites*; 2020.

BEBER, A.J. Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono, Tese de Doutorado- CPCEG/UFRGS, Brasil, 2003.

BENZEGUIR, Z. E., CHAALLAL, O. Size Effect of RC T-Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded CFRP L-Shaped Laminates *J. Compos. Constr.*, 2020.

CHAALLAL, O., MOFIDI, A., BENMOKRANE, B., NEALE, K. Embedded through-section FRP rod method for shear strengthening of RC beams: Performance and comparison with existing techniques. *J Compos Constr.*, 2011.

CHEN, G.M. TENG, J.G. Shear Strength Model for FRP-Strengthened RC Beams with Adverse FRP-Steel Interaction. *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2013.

CHEN, G.M., Zhang, Z., Li, Y., Li, X. Q., Zhou C. Y. T-section RC beams shear- strengthened with anchored CFRP U-strips. *Journal of Composite Structures*, 2016.

- GRANDE, E., IMBIMBO, M., RASULO, A. Effect of transverse steel on the response of RC beams strengthened in shear by FRP: experimental study. *J Compos Constr.*, 2009.
- GODAT, A., QU, Z., LU, X. Z., LABOSSÈRE, P., YE L. P., NEALE, K.W. Size effects for reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP strips. *J Compos Constr.*, 2010.
- KARZAD, A. S., LEBLOUBA, M., AL TOUBAT, S., MAALEJ, M. Repair and strengthening of shear-deficient reinforced concrete beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer. *Composite Structures* 223, 2019.
- KHALIFA, A.; NANNI, A. Anchorage of surface mounted FRP reinforcement. *Concrete International: Design and Construction*, v. 21, n.10, p. 49-54, 1999.
- KIM, Y., GHANNOUM W. M., JIRSA, J. O. Shear behavior of full-scale reinforced concrete T-beams strengthened with CFRP strips and anchors. *Construction and Building Materials*, 2015.
- MHANNA, H. H., HAWILEH, R. A., ABDALLA, J. A. Shear behavior of RC T-beams externally strengthened with anchored high modulus carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates, *Journal of Composite Structures* 272, 2021.
- MENON, N. V. Estudo Experimental de Sistemas de Reforço ao Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado Utilizando-se Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC), Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- MOFIDI, A., CHAALLAL, O. Performance of End-Anchorage Systems for RC Beams Strengthened in Shear with Epoxy-Bonded FRP. *Journal of Composites for Construction*, 2012.
- MOFIDI, CHAALLAL, O. Shear Strengthening of RC Beams with EB FRP: Influencing Factors and Conceptual Debonding Model. *J Compos Constr.*, 2011.
- OLLER, E. PUJOL, M., MARÍ, A. Contribution of externally bonded FRP shear reinforcement to the shear strength of RC beams. *Composites Part B Engineering*, 2019.
- OLLER, E., KOTYNIA, R. MARÍ, A. Assessment of the existing models to evaluate the shear strength contribution of externally bonded frp shear reinforcements. *Composite Structures*, 2021.
- PELLEGRINO C., MODENA C. An experimentally based analytical model for the shear capacity of frp-strengthened reinforced concrete beams. *Mechanics of Composite Materials*, 2008.
- RANDL, N., HARSÁNYI, P. Developing optimized strengthening systems for sheardeficient concrete members. *Struct Concr.*, 2018.
- SPAGNOLO, L. A. Estudo Experimental do Reforço à Força Cortante de Vigas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono. Dissertação de Mestrado PUC- RIO, 2013.
- TAMER, E. M., YOUSEF, C., EL-MAADDAWY, T., CHEKFEH Y. Retrofitting of severely shear damaged concrete T-beams using externally bonded composites and mechanical end anchorage. *J Compos Constr.*, 2012.