

Dimensionamento do reforço ao cisalhamento com compósitos de resina e fibras em vigas-parede de concreto

Fábio G. Ávila*, Ana M. A. J. Abreu, Luiz A. V. Carneiro

Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*fabiogavila@gmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta estudos encontrados na literatura sobre o ensaio de vigas-parede de concreto armado reforçadas com compósitos de resina e fibras (FRP) colados. A partir dos resultados de ensaios destes estudos, propõe-se uma metodologia para o dimensionamento do reforço ao cisalhamento de vigas-parede com FRP. Constatou-se que o tipo, a configuração e taxa de armadura de reforço, a resistência do concreto à compressão, a relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil e a taxa de armadura interna das vigas são os parâmetros mais influentes na resistência das vigas-parede de concreto armado reforçadas com FRP colados.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço. Vigas-parede. Concreto armado. Fibras de carbono.

ABSTRACT: This paper presents some studies about tests of reinforced concrete deep beams strengthened with fiber reinforced plastics (FRP) bonded encountered in literature. From test results of these studies, design methodology is proposed for shear strengthening of deep beams with bonded FRP. It was found that the type, configuration and reinforcement ratio of FRP, the compressive strength of concrete, the shear span ratio and the internal reinforcement ratio of beams are the most influential parameters in the strength of strengthened reinforced concrete deep beams with bonded FRP.

KEYWORDS: Strengthened. Deep beams. Reinforced concrete. Carbonfibers

1. Introdução

Vigas-parede são vigas com sua altura grande o suficiente de modo que não são consideradas elementos lineares. A hipótese de Bernoulli não se aplica no caso de vigas-parede, pois as seções não permanecem planas sob a ação das cargas, mesmo para um material perfeitamente elástico [1]. Vigas-parede são as vigas altas em que a relação entre o seu vão e a sua altura (L/h) é inferior a 2, em vigas biapoiadas, e inferior a 3, em vigas contínuas [2].

Entretanto, não há consenso entre as principais normas internacionais sobre os limites da razão L/h que diferenciam as vigas e as vigas-parede

[3]. Na Inglaterra, vigas-parede são definidas como as vigas com esta razão menor que 2 para vigas biapoiadas e menor que 2,5 para vigas contínuas [4]; no Canadá, o limite é 1,25, para vigas biapoiadas, e 2,5, para vigas contínuas [5]; e nos Estados Unidos da América, todas as vigas com a razão menor que 4 são vigas-parede [6].

As vigas-parede são frequentemente utilizadas em diversas aplicações estruturais, tais como paredes diafragmas, pontes, reservatórios de água, peças pré-moldadas de concreto protendido, fundações, silos, abrigos subterrâneos, estruturas offshore e edifícios altos [7].

O reforço de elementos estruturais, como vigas e colunas, tornou-se vital hoje em dia,

devido a muitas circunstâncias inevitáveis, como revisão das condições de carregamento, mudança nas condições de ocupação e deterioração da estrutura existente devido a efeitos ambientais [8]. Compósitos de fibras de alta resistência não metálicas, feitos de carbono, vidro ou aramida, encapsuladas em uma matriz polimérica sob a forma de arames, barras, fios, telas armadas em cruz, lâminas, tiras ou mantas têm mostrado grandes potenciais como reforço de concreto, particularmente onde a durabilidade é a preocupação principal [9].

Estes materiais são conhecidos como compósitos de resina e fibras (FRP), podendo ser de três tipos: compósitos de resina e fibras de carbono (CFRP), compósitos de resina e fibras de vidro (GFRP) e compósitos de resina e fibras de aramida (AFRP). Dentre os três tipos de FRP, o CFRP é o que apresenta melhor eficácia no aumento da capacidade resistente ao cisalhamento de vigas [10].

O CFRP propicia adicional reforço na flexão ou cisalhamento e a confiabilidade na aplicação deste material depende de como ele está ligado ao concreto e quanto de tensão o concreto pode transferir para o compósito de CFRP [11]. O CFRP oferece ao engenheiro projetista excelentes propriedades que não estão disponíveis em materiais tradicionais. Este material de reforço é resistente à corrosão e possui maior resistência e rigidez em relação ao aço [12].

As aplicações de FRP em engenharia civil podem ser divididas em três grandes grupos: novas construções, reparação e reconstrução [13]. O primeiro reparo no local por FRP colado externamente foi em 1991 e, em 1995, após o terremoto HyogokenNanbu, no Japão, houve um aumento repentino na utilização de materiais FRP [13]. Desde então, o reforço de estruturas com o

uso de materiais FRP colados externamente tem sido estudado em todo o mundo.

2. Estudos de reforço em vigas-parede

Em 2002, o reforço de oito vigas-parede subdimensionadas ao cisalhamento, com tiras de CFRP em diferentes inclinações (0° , 45° e 90°) foram estudadas com dois tipos de carregamento (uma carga central ou duas nos terços do vão), conforme esquematizado na **figura 1** [14]. Concluiu-se que o reforço a 45° foi o mais eficaz e que a 0° , o menos de acordo com o apresentado na **tabela 1**.

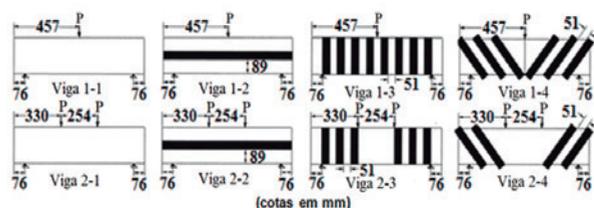


Fig. 1 – Representação das vigas-parede estudadas em 2002. Fonte: [14].

Em 2005, avaliou-se o comportamento do reforço de seis vigas-parede idênticas com o uso de mantas (2 camadas), tiras (50 mm x 1,2 mm) e telas armadas em cruz (áreas da seção transversal de $6,6 \text{ mm}^2$, $17,5 \text{ mm}^2$ e $39,2 \text{ mm}^2$) de CFRP em diferentes configurações, como mostra a **figura 2** [9]. Concluiu-se que o uso de sistemas de FRP aumentou a capacidade resistente da viga estudada, como ilustra a **tabela 2**, e que o reforço com telas armadas em cruz coladas com orientação normal demonstrou ser o sistema mais eficaz com relação à quantidade de material utilizado.

Em 2014, apresentou-se um modelo analítico para vigas-parede de concreto armado reforçadas

ao cisalhamento externamente com tiras coladas de CFRP [15]. Um programa baseado no método dos elementos finitos foi utilizado para modelar as vigas-parede estudadas em 2002. Concluiu-se que a modelagem apresentou uma excelente correlação com os resultados experimentais.

Ainda em 2014, estudou-se o comportamento de doze vigas-parede de mesmas características (**figura 3**) submetidas a duas cargas simétricas em seis diferentes posições [16]. Metade das vigas foi reforçada com folhas de CFRP colada. Concluiu-se que, para a mesma configuração de carregamento, o reforço conduziu à diminuição da deformação transversal da viga-parede e ao aumento da sua capacidade resistente (**figura 4**).

Neste mesmo estudo, constatou-se ainda que, quanto maior a relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil da viga (a/d), maior sua deformação transversal e menor sua carga de ruptura. A partir deste estudo, foi estabelecida uma relação empírica para ajustar o valor da deformação principal de tração em vigas-parede reforçadas com CFRP, calculado por meio do método das bielas e tirantes [17].

Em 2015, estudou-se o comportamento de vigas-parede de concreto auto-adensável reforçadas ao cisalhamento com folhas de CFRP [12]. Para isso, foram feitas onze vigas-parede com concreto auto-adensável, projetadas para romper ao cisalhamento, sendo dez delas reforçadas com folhas de CFRP coladas em diferentes configurações, cujos resultados são apresentados na **tabela 3**.

Tab. 1 – Resultados obtidos no estudo de 2002.

Viga	Carga última (kN)	Flecha para carga última (mm)
1-1	94,3	2,308
1-2	97,9	2,074
1-3	168,1	3,292

Viga	Carga última (kN)	Flecha para carga última (mm)
1-4	193,5	5,224
2-1	144,6	1,943
2-2	204,2	2,745
2-3	207,7	3,104
2-4	240,7	2,784

Fonte: [14].

Tab. 2 – Resultados encontrados no estudo de 2005.

Viga	Carga de primeira fissura		Carga última (kN)
	Flexão (kN)	Diagonal (kN)	
B0	130	280	1.040
B1	160	–	1.402
B2	150	370	1.400
B3	195	490	1.410
B4	130	350	1.292
B5	190	330	1.482

Fonte: [9].

Neste estudo, concluiu-se que, em todas as vigas-parede reforçadas, o reforço com o uso de CFRP levou ao aumento, em média, de 33% em relação à carga máxima da viga sem reforço e à redução da flecha da viga para o mesmo nível de carga. O uso de folhas de CFRP inclinadas de 45° em relação ao eixo longitudinal da viga propiciou um maior acréscimo na carga última e um maior decréscimo na flecha e na abertura das fissuras em relação ao uso de folhas verticais (90°).

3. Proposta de dimensionamento do reforço ao cisalhamento

Baseando-se nos resultados experimentais dos artigos apresentados, este trabalho propõe a metodologia descrita a seguir para o dimensionamento do reforço ao cisalhamento de vigas-parede sem abertura com a utilização de compósitos de resina e fibras colados externamente.

3.1 Condições gerais

Esta metodologia considera que, no vão de cisalhamento (a), definido pela região compreendida entre o apoio e o ponto de aplicação do carregamento, a força cortante (V) pode ser decomposta em uma força de compressão, que corresponde ao caminho da carga até o apoio, e uma força de tração, ortogonal a essa força de compressão, conforme apresentado na **figura 5**.

O ângulo de inclinação das diagonais de compressão em relação ao eixo longitudinal da viga (θ) é definido pelo arco cuja tangente é a razão entre a sua altura útil (d) e o seu vão de cisalhamento (a), não sendo menor que 30° . A determinação da força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto (V_{Rd2}) é feita segundo o Modelo de Cálculo II (v. **equações 1 e 2**), onde α é a inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal [2].

$$V_{Rd2} = 0,6\alpha_{v2}f_{cd}b_wzsen^2\theta(\cot\alpha + \cot\theta) \quad (1)$$

$$\alpha_{v2} = (1 - f_{ck}/250), \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (2)$$

O braço de alavanca z deve ser calculado conforme as **equações 3, 4 e 5** [18]. No caso de vigas-parede com $L/h > 2$, estas são calculadas como se vigas esbeltas fossem [2] (v. **equações 5 a 10**), onde M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo, α_c é o parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão (v. **equações 7 e 8**) e λ é a relação entre a profundidade y do diagrama retangular de compressão equivalente e a profundidade efetiva x da linha neutra na ruptura (v. **equações 9 e 10**).

$$z = 0,6L, \text{ para } L/h \leq 1 \quad (3)$$

$$z = 0,15h[3 + (L/h)], \text{ para } 1 < L/h \leq 2 \quad (4)$$

$$z = d - \lambda x/2, \text{ para } L/h > 2 \quad (5)$$

$$x = \frac{\alpha_c f_{cd} \lambda d \pm \sqrt{(\alpha_c f_{cd} \lambda d)^2 - 2\alpha_c f_{cd} \lambda^2 M_{Sd}}}{\alpha_c f_{cd} \lambda^2} \quad (6)$$

$$\alpha_c = 0,85, \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\alpha_c = 0,85[1,0 - (f_{ck} - 50)/200], \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$\lambda = 0,80, \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (9)$$

$$\lambda = 0,80 - (f_{ck} - 50)/400, \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (10)$$

A força cortante resistente de cálculo relativa à ruína por tração diagonal (V_{Rd3}) é calculada pela **equação 11**, onde V_c é a parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares ao modelo em treliça, V_{sw}^* é a parcela de força cortante resistida pela armadura de cisalhamento na direção ortogonal à diagonal comprimida e V_{fw}^* é a parcela

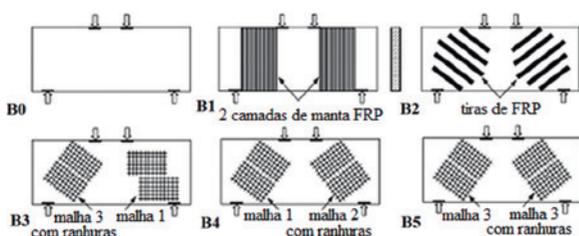


Fig. 2 – Vigas-parede estudadas em 2005. Fonte: [9].

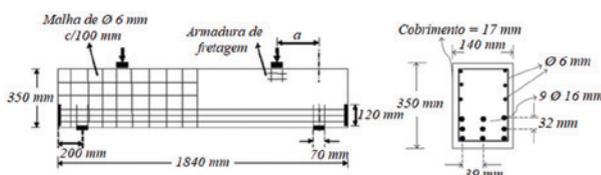


Fig. 3 – Vigas estudadas em 2014. Fonte: [16].

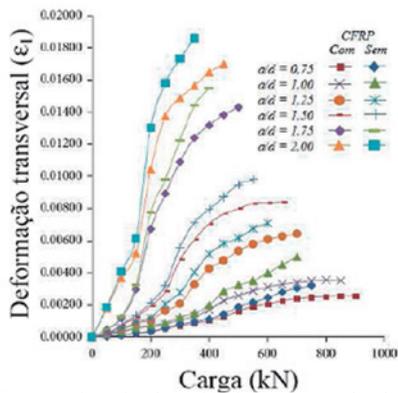


Fig. 4 – Resultados obtidos no estudo de 2014. Fonte:[16].

Tab. 3 – Resultados encontrados no estudo de 2015.

Viga	Tipo de reforço	Carga de fissuração (kN)	Carga última (kN)
SCCUS2-1	Sem reforço (viga de referência)	175	400
SCCUS2-2	Folhas a 90° em 2 lados, com altura de 300 mm, espaçadas a 50 mm	190	490
SCCUS2-3	Folhas a 45° em 2 lados, com altura de 300 mm, espaçadas a 50 mm	211	496
SCCUS2-4	Folhas em 3 lados (em forma de U), com altura de 300 mm, espaçadas a 50 mm	215	500
SCCUS2-5	Envolvimento total com folhas espaçadas a 50 mm	225	520
SCCUS2-6	Folhas a 90° em 2 lados, com altura de 300 mm, espaçadas a 20 mm	200	504
SCCUS2-7	Folhas a 45° em 2 lados, com altura de 300 mm, espaçadas a 20 mm	217	507
SCCUS2-8	Folhas em 3 lados (em forma de U), com altura de 300 mm, espaçadas a 20 mm	227	512
SCCUS2-9	Envolvimento total com folhas espaçadas a 20 mm	241	532
SCCUS2-10	Folhas a 90° em 2 lados, com largura de 80 mm e altura de 300 mm, espaçadas a 50 mm	221	509
SCCUS2-11	Folhas verticais e horizontais em 2 lados, com altura de 300 mm, espaçadas a 50 mm	200	498

Fonte: [12].

de força cortante resistida pelo reforço ao cisalhamento na direção ortogonal à diagonal comprimida.

$$V_{Rd3} = V_c + (V'_{sw} + V'_{fw}) / \cos \theta \quad (11)$$

A parcela V_c é obtida interpolando-se linearmente quando $V_{c0} < V_{Sd} < V_{Rd2}$ e adotando-se $V_c = V_{c0}$, quando $V_{Sd} \leq V_{c0}$ e $V_c = 0$, quando $V_{Sd} = V_{Rd2}$, onde V_{c0} é calculado através da equação 12 [2]. O valor de f_{ctd} , em MPa, pode ser determinado pelas equações 13 a 15, onde $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral do concreto e $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão do concreto.

$$V_{c0} = 0,6f_{ctd}b_wd \quad (12)$$

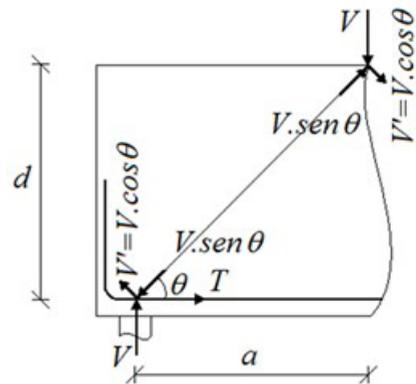


Fig. 5 – Representação esquemática da decomposição da carga em vigas-parede.

$$f_{ctd} = 0,9f_{ct,sp} / \gamma_c \quad (13)$$

$$f_{ctd} = 0,7f_{ct,f} / \gamma_c \quad (14)$$

$$f_{ctd} = 0,21f_{ck}^{2/3} / \gamma_c \quad (15)$$

Nesta metodologia, a parcela V'_{sw} considera a resistência fornecida pela armadura transversal e pela armadura de pele, que é frequentemente utilizada em vigas-parede. Para o caso mais comum de armadura de cisalhamento, composta por estribos verticais e horizontais, o valor de V'_{sw} pode ser calculado por meio da equação 16, onde s é o espaçamento entre os estribos verticais, $A_{sw,v}$ é

a área da seção transversal do estribo vertical, $A_{sw,v}$, é a área da seção transversal do estribo horizontal, n_h é o número de estribos horizontais que compõe a armadura de pele (desconsiderando a armadura longitudinal e a armadura de montagem).

$$V'_{sw} = \frac{d \cdot \cot \theta}{s} A_{sw,v} f_{ywd} \cos \theta + n_h A_{sw,h} f_{ywd} \sin \theta \quad (16)$$

A contribuição da armadura de pele deve ser desconsiderada caso $\tan \theta > d/a$. A **figura 6** apresenta esquematicamente as componentes da parcela V'_{sw} . Para o cálculo da parcela V'_{sw} , deve-se considerar o tipo do reforço utilizado para se definir sua deformação e seu módulo de elasticidade, bem como sua espessura e configuração, contendo o número de camadas, a inclinação, a largura e o espaçamento de cada camada de reforço. As equações propostas para o cálculo desta parcela são apresentadas nos itens 3.2.2 a 3.2.5.

3.2 Condições específicas

Esta seção descreve os procedimentos específicos que devem ser adotados, tendo em vista a singularidade dos principais casos de reforço ao cisalhamento em vigas-parede.

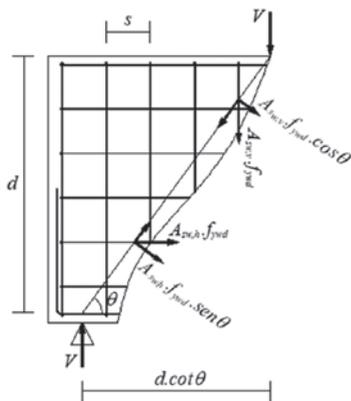


Fig. 6 – Representação esquemática das componentes da parcela V'_{sw} .

3.2.1 Vigas com $L > 2h$

Tendo em vista a divergência na definição de vigas-parede por algumas normas internacionais, existem vigas que não são consideradas viga-parede segundo a norma brasileira ($L/h > 2$), mas são consideradas por outras. Desta forma, para vigas com altura inferior à metade do seu vão teórico, deve-se realizar os seguintes procedimentos:

- Quando a razão a/d for menor que a tangente de 30° , o valor do ângulo θ será igual a 30° e a contribuição da armadura de pele em V'_{sw} deverá ser desconsiderada.
- Quando uma carga concentrada for aplicada a uma distância $a \leq 2d$ do eixo teórico do apoio em vigas com apoio direto, a verificação da resistência relativa à ruína por tração diagonal (V_{Rd3}) deve ser feita considerando a força cortante de cálculo reduzida pelo fator $a/(2d)$, denominada nesta metodologia como V_{red} , conforme prescreve a alínea b) do item 17.4.1.2.1 da norma brasileira [2].
- A redução supracitada não modifica a força cortante de cálculo (V_{sd}) para a verificação da resistência relativa à ruína por compressão diagonal (V_{Rd2}) e para o cálculo da parcela V_c .

3.2.2 Reforço unidirecional com FRP

A parcela V'_{fw} do reforço em uma única direção com FRP pode ser calculada por meio da **equação 17**, onde α_f é o ângulo que as fibras do reforço fazem com o eixo longitudinal da viga, ϵ_{fud} é a deformação última de cálculo do compósito (definida no item 3.2.5), E_f é o módulo de elasticidade do reforço, t_f e b_f são a espessura total e a largura de cada tira do reforço, e n_f é a quantidade de tiras que atravessa

a diagonal comprimida, expressa pela **equação 18**, onde s_f é a distância entre o centroide de duas tiras consecutivas. A **figura 7** apresenta esquematicamente esta contribuição.

$$V'_{fw} = 2 \cdot n_f \cdot b_f \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \text{sen}(\alpha_f + \theta) \quad (17)$$

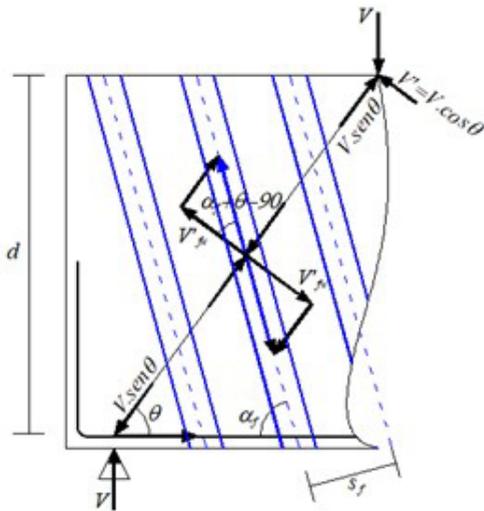


Fig. 7 – Representação esquemática da parcela V'_{fw} do reforço unidirecional.

$$n_f = \frac{d}{s_f} (\cot \alpha_f + \cot \theta) \text{sen} \alpha_f \quad (18)$$

3.2.3 Reforço multidirecional com FRP

Para o cálculo da resistência ao cisalhamento do reforço com FRP em várias direções, soma-se a contribuição de cada uma das direções, obtidas de forma similar ao reforço unidirecional, conforme apresentado na **equação 19** e **figura 8**. Entretanto, apenas em uma direção, a deformação do reforço será igual à deformação última de cálculo. Na determinação da deformação do reforço em cada direção, considera-se que o deslocamento relativo à tração da diagonal comprimida seja perpendicular a mesma, sendo obtida por meio da **equação 20**.

$$V'_{fw} = \sum_i 2 \cdot n_{fi} \cdot b_{fi} \cdot t_{fi} \cdot E_{fi} \cdot \varepsilon_{fi} \cdot \text{sen}(\alpha_{fi} + \theta) \quad (19)$$

$$\varepsilon_{fi} = \frac{\Delta L}{L_{fi}} \cdot \cos(\alpha_{fi} - \theta) \leq \varepsilon_{fud} \quad (20)$$

3.2.4 Reforço contínuo com FRP

Um caso particular de reforço é o com FRP colado externamente de forma contínua e abrangendo a totalidade do vão de cisalhamento. Para este tipo de reforço, a parcela n_f da **equação 17** (ou n_{fi} da **equação 19**, conforme o caso) é igual a 1. Quando este reforço contemplar a altura total da viga em suas faces laterais, pode-se considerar que toda a tensão de tração transversal que atua no concreto naquela região seja resistida pela armadura transversal e pelo reforço, caso a resistência relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto (V_{Rd2}) seja insuficiente.

Dessa forma, a força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto pode ser expressa pela **equação 21**. Embora a mudança de seu estado de tensões altere a tensão resistente máxima do concreto das diagonais comprimidas em regiões com

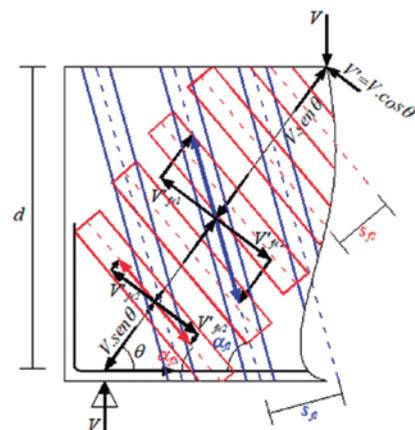


Fig. 8 – Representação esquemática da parcela V'_{fw} do reforço em duas direções.

tensões de tração transversal ($f_{cd2} = 0,60 \alpha_{v2} f_{cd}$) para regiões sem tensões de tração transversal ($f_{cd1} = 0,85 \alpha_{v2} f_{cd}$), a tensão resistente máxima no concreto é limitada ao valor de sua região nodal ($f_{cd3} = 0,72 \alpha_{v2} f_{cd}$), uma vez que esta biela possui nós onde conflui um tirante tracionado (nós CCT). Caso seja adotada esta mudança, a parcela V_c deverá ser desconsiderada.

$$V_{Rd2}' = 0,72 \alpha_{v2} f_{cd} b_w z \text{sen}^2 \theta (\cot \alpha + \cot \theta) \quad (21)$$

3.2.5 Deformação última de cálculo do compósito

Embora todos os compósitos de resina e fibras utilizados como reforço possuam deformação última informada pelo respectivo fabricante, este valor não pode ser utilizado diretamente para o cálculo da resistência do reforço, uma vez que existem outros mecanismos de falha do reforço, além da ruptura da fibra. Estes mecanismos são o descolamento e o destacamento.

Descolamento como o desligamento dos materiais concreto e de reforço, ocorrido na interface material de reforço – cola, sem haver camada de concreto aderida ao material de reforço [19]. Já destacamento é entendido como sendo a separação entre o reforço e o elemento reforçado de maneira que haja concreto aderido ao material de reforço [19].

Tendo em vista que, quando ocorrer qualquer mecanismo de falha do reforço, o colapso da viga será iminente, a deformação última de cálculo do reforço (ϵ_{fud}) deve ser limitado. Então, para esta metodologia, foram utilizadas as equações prescritas na norma americana [20] para o cálculo da deformação efetiva do reforço ao cisalhamento, quando não há sistema de ancoragem deste reforço, e as equações propostas

em [21], caso contrário.

O projetista deverá considerar todos os modos de falha possíveis na estrutura de concreto armado reforçado com compósitos de resina e fibras e usar uma deformação efetiva (ou deformação última de cálculo) representativa do modo da falha crítica [20]. Para vigas de concreto armado reforçadas externamente por compósito de resina e fibras com envelopamento total, a perda do engrenamento dos agregados do concreto foi observada ocorrendo com deformações menores que a deformação última da fibra [20]. Para evitar este tipo de falha, a deformação máxima de projeto deverá ser limitada pela **equação 22**, onde ϵ_{fu} é a deformação última do reforço.

$$\epsilon_{fud} = 0,75 \epsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (22)$$

Para sistemas de reforço com compósitos de resina e fibras que não envelopam toda a seção (colados em duas ou três faces), foi observado que o destacamento do concreto ocorre antes da perda do engrenamento dos agregados da seção. Por esta razão, tensões de aderência foram analisadas para determinar a utilidade destes sistemas e o nível de deformação efetiva que pode ser alcançado. Dessa forma, a referida norma propõe que a deformação efetiva seja calculada usando um coeficiente de redução do efeito de ligação K_v aplicável ao cisalhamento, conforme **equação 23**.

$$\epsilon_{fud} = K_v \epsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (23)$$

O coeficiente de redução do efeito de ligação é uma função da resistência do concreto, da configuração do reforço utilizado e a rigidez do compósito. Este coeficiente pode ser calculado pelas **equações 24 a 28**. O comprimento efetivo da

ligação, L_e , é o comprimento em que a maior parte da tensão de aderência é mantida e é calculado pela **equação 25**, onde n_f é o número de camadas do reforço, t_f é a sua espessura de cada camada em mm e E_f é o seu módulo de elasticidade em MPa.

$$K_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (24)$$

$$L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0,58}} \quad (25)$$

$$k_1 = \left(\frac{f_{cm}}{27} \right)^{2/3} \quad (26)$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}}, \text{ para reforço colado em "U"} \quad (27)$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}}, \text{ para reforço colado em duas faces} \quad (28)$$

O coeficiente de redução do efeito de ligação também depende de dois fatores de modificação, k_1 e k_2 , que consideram a resistência do concreto e a configuração do reforço utilizado, respectivamente, conforme as **equações 26, 27 e 28**, onde f_{cm} é a resistência à compressão média do concreto em MPa e d_{fv} é a altura efetiva do reforço ao cisalhamento em mm (**figura 9**).

Esta norma ressalta que as equações para a determinação do K_v foram validadas para elementos em regiões com alto cortante e baixo momento fletor, entretanto ainda não foram confirmadas para reforço ao cisalhamento em áreas sujeitas à combinação de altas tensões de flexão e cisalhamento ou em regiões com momento negativo. Contudo, este fator de redução é suficientemente conservativo para estes casos.

Ancoragens mecânicas usadas nas extremidades do reforço propiciam ao mesmo

maior eficácia, possibilitando o aumento de sua deformação efetiva, calculada pela **equação 23** [20]. Dessa forma, sugere-se a utilização das **equações 29, 30 e 31** para determinar a deformação última de cálculo de reforço com fibras de carbono, quando o mesmo for ancorado na extremidade por uma tira horizontal de mesma largura para se evitar o descolamento do reforço (**equação 29**)

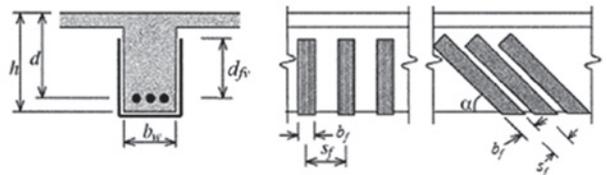


Fig. 9 – Representação esquemática das principais variáveis dimensionais do reforço ao cisalhamento.

e para se evitar o descolamento do reforço (**equações 30 e 31**) [21].

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\tau_{lim}}{E_f \left(\frac{h_f + 4b_{ext}}{2n_f t_f} \right)} \quad (29)$$

$$\varepsilon_{fud} = 5\%, \text{ para reforço pré-fabricado} \quad (30)$$

$$\varepsilon_{fud} = 6\%, \text{ para reforço } in\ situ \quad (31)$$

Na **equação 29**, b_{ext} é o comprimento mostrado na **figura 10**, considerado igual ao menor valor entre a largura da tira de ancoragem e a metade da distância horizontal sem reforço entre duas tiras sucessivas, h_f é a altura do reforço, n_f é o número de camadas do reforço, t_f é a espessura de uma camada do reforço, E_f é o módulo de elasticidade do reforço e τ_{lim} é a tensão cisalhante limite a ser resistida pelo concreto, expressa pela **equação 32**, onde f_{ctd} é a resistência de cálculo à tração do concreto (**equações 13 a 15**).

$$\tau_{lim} = 0,50 f_{ctd} \quad (32)$$

3.3 Validação da metodologia

Visando a validação da metodologia proposta de dimensionamento do reforço ao cisalhamento com FRP colados externamente em vigas-parede, aplicaram-se as equações deste trabalho, desconsiderando todos os fatores de segurança, nas vigas B0, B1 e B2 de 2005, [9], nas 12 vigas-parede estudadas em 2014, [16], e nas 336 vigas-parede da base de dados utilizadas em um estudo de vigas-parede sem reforço que possuíam armadura de cisalhamento [22].

As **figuras 11 e 12** apresentam a comparação dos resultados experimentais com os valores calculados de acordo com esta metodologia para as 15 vigas provenientes dos estudos com reforço e para as 336 vigas dos estudos sem reforço, onde percebe-se uma boa aproximação entre a resistência real e a resistência esperada. Os valores da média e do desvio padrão da razão entre a resistência real ($V_{u,exp}$) e a resistência esperada ($V_{u,calc}$) para as vigas dos estudos com e sem reforço foram iguais a 1,05 e 0,07 e 1,48 e 0,86.

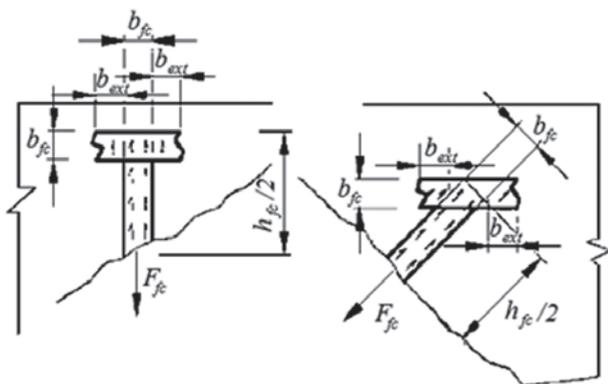


Fig. 10 – Representação esquemática da Área de Contato do Compósito com o Concreto.

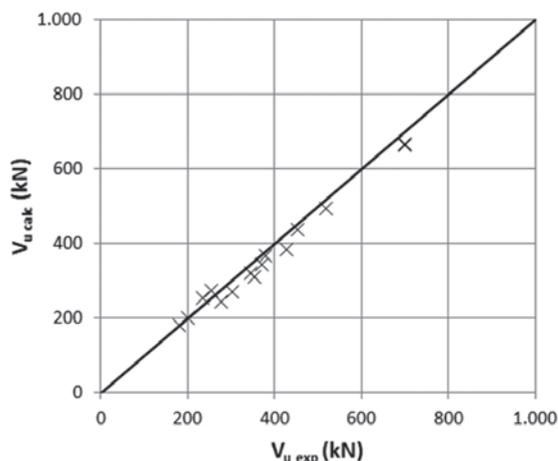


Fig. 11 – Comparação dos resultados experimentais com os valores calculados para as vigas dos estudos com reforço.

4. Conclusões

Constatou-se que o tipo, a configuração e taxa de armadura de reforço, a resistência do concreto à compressão, a relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil e a taxa de armadura interna das vigas são os parâmetros mais influentes no comportamento das vigas-parede de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com FRP colados.

Tendo em vista que não há um método normatizado ou proposto em outros estudos de dimensionamento de reforço ao cisalhamento de vigas-parede com materiais compósitos de resina e fibras colados externamente, este trabalho propôs uma metodologia preliminar para este dimensionamento.

Ao se comparar as cargas de ruptura determinadas com as obtidas, usando-se as equações propostas neste artigo sem os fatores de segurança previstos, encontrou-se uma boa aproximação entre elas, com a média e o desvio padrão da razão entre elas para as vigas dos

estudos com e sem reforço foram iguais a 1,05 e 0,07 e 1,48 e 0,86, respectivamente.

Entretanto, esta metodologia é válida apenas para vigas-parede sem aberturas biapoiadas sujeitas a cargas concentradas e reforçadas por folhas ou lâminas de

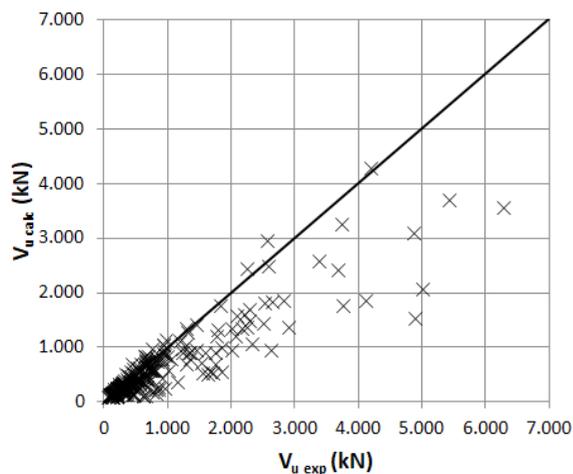


Fig. 12 – Comparação dos resultados experimentais com os valores calculados para as vigas dos estudos sem reforço.

materiais compósitos de resina e fibras, sem

ancoragem [20] ou ancoradas por tiras horizontais em suas extremidades [21].

Embora esta proposição tenha se baseado em resultados experimentais com compósitos de resina e fibras de carbono, ela pode ser usada para o dimensionamento de reforço com outros tipos de compósitos de resina e fibras, desde que colados externamente, uma vez que as equações para a determinação da deformação última de cálculo não se limitada apenas ao reforço com compósitos de resina e fibras de carbono [20]. Contudo, necessita-se de estudos complementares para a determinação da deformação última de cálculo de reforço com outro tipo de ancoragem que não a apresentada neste trabalho [21].

O modelo proposto não dimensiona o reforço de vigas-parede sem armadura transversal, uma vez que seu mecanismo de ruptura sem reforço é definido pela resistência do arco ou do engaste dos dentes definidos entre fissuras de flexão consecutivas e, ao se reforçá-las, o compósito passa a atuar como estribo, modificando este mecanismo de ruptura.

Referências bibliográficas

- [1] F. Leonhardt, E. Mönnig, Construções de concreto: Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Vol.1. Interciência, Rio de Janeiro, 1977.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. ABNT NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [3] S. D. Kore, S. S. Patil, Analysis and design of R. C. deep beams using code provisions of different countries and their comparison. International Journal of Engineering and Advanced Technology, Vol. 2, p. 166-169, 2013
- [4] Construction Industry Research and Information Association. CIRIA Guide 2 – The design of deep beams in reinforced concrete. London, 1984.
- [5] Canadian Standard Association. CAN-A23.3-M84 – Design of concrete structures for buildings. Ontario, 1984.
- [6] American Concrete Institute. ACI 318M – Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, 2011.
- [7] K. M. Heiza, N. N. Meleka, N. Y. Elwkad, Shear strengthening of self-compacting reinforced concrete deep beams with external bonded layers. Concrete Research Letters, Vol. 3, No.4, p. 507-527, 2012.

- [8] M. R. Patel, T. Tank, Finite element modeling of RC deep beams strengthened in shear with CFRP strips. *The Indian Concrete Journal*, Vol. 88, p. 69-76, 2014.
- [9] M. R. Islam, M. A. Mansur, M. Maalej, Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FR systems. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, p. 413-420, 2005.
- [10] M. R. Patel, R. K. Gajjar, Shear strengthening of different beams using FRP. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, Vol. 1, p. 290-294, 2012.
- [11] M. Ekenel, V. Stephen, J. J. Myers, R. Zoughi, Microwave NDE of RC beams strengthened with CFRP laminates containing surface defects and tested under cyclic loading. *Electrical and Computer Engineering*, University of Missouri-Rolla, Rolla, p. 1-8, 2004.
- [12] J. A. Khudair, R. S. Atea, Shear behavior of self compacting concrete deep beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets. *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 4, p. 187-191, 2015.
- [13] M. B. S. Alferjani, A. A. A. Samad, B. S. Elrawaff, N. Mohamad, M. Hilton, A. A. S. Saiah, Use of carbon fiber reinforced polymer laminate for strengthening reinforced concrete beams in shear: A review. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, Vol. 2, pp. 45-53, 2013.
- [14] J. E. Moren, Shear behavior of reinforced concrete deep beams strengthened with CFRP laminates. *Dissertação de Mestrado*. New Jersey Institute of Technology, New Jersey, 2002.
- [15] M. R. Patel, T. Tank, Finite element modeling of RC deep beams strengthened in shear with CFRP strips. *The Indian Concrete Journal*, Vol. 88, p. 69-76, 2014.
- [16] M. Panjehpour, H. K. Chai, Y. L. Voo, Strut deformation in CFRP-strengthened reinforced concrete deep beams. *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, p. 1-9, 2014.
- [17] M. Panjehpour, A. A. A. Ali, Y. L. Voo, F. N. Aznieta, Modification of strut effectiveness factor for reinforced concrete deep beams strengthened with CFRP laminates. *Materiales de Construcción*, Vol. 64, p. 1-8, 2014.
- [18] E. C. S. Thomaz, L. A. V. Carneiro, Considerações sobre o dimensionamento de vigas paredes de concreto com o uso do método das bielas e tirantes. *52º Congresso Brasileiro do Concreto*. Fortaleza, IBRACON, 2010.
- [19] L. A. V. Carneiro, Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resina e fibras. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [20] American Concrete Institute. ACI 440.2R – Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, 2008.
- [21] E. C. Cerqueira, Reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado com fibras de carbono. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- [22] J. Liu, B. I. Mihaylov, A comparative study of models for shear strength of reinforced concrete deep beams. *Engineering Structures*, Vol. 112, p. 81-89, 2016.