

MODELOS TEÓRICOS PARA VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM PRFC

Camila Colhado Gallo ¹

Nara Villanova Menon ²

Ivo José Padaratz ³

RESUMO

O presente trabalho analisa através de modelos teóricos propostos em algumas normas e códigos normativos existentes na literatura atual, o comportamento de vigas retangulares de concreto armado reforçadas ao cisalhamento, utilizando-se materiais compósitos de PRFC (Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono) laminados em forma de “L” e mantas externamente coladas. Para avaliação dos modelos teóricos utilizou-se os resultados da pesquisa experimental realizada por Menon (2008). A maioria dos dimensionamentos de prevenção ao cisalhamento, incorporados nos códigos e guias existentes, usa o conhecido método $V_c + V_{sw}$ de dimensionamento ao cisalhamento que estão baseados na analogia de treliça e acrescentam a contribuição do PRFC através da parcela V_f . Os critérios de projeto, que dizem respeito à resistência do concreto e da armadura transversal ao cisalhamento serão representados pelas normas: NBR: 6118, CEB-FIP, *ACI Code 318M*, EUROCODE 2 e pelo pesquisador Zutty. Os critérios escolhidos para cálculo da resistência do reforço com PRFC são os dispostos nos códigos normativos ACI-440.2R, FIB-bulletin 14 e CNR-DT 200. Após análise dos resultados analíticos para contribuição do concreto e da armadura transversal comprovou-se que o modelo proposto por Zsutty foi o que mais se aproximou do valor obtido experimentalmente. Os critérios propostos pelo CNR-DT 200 apresentaram resultados mais próximos dos experimentais. Considerando a contribuição conjuntamente dos resultados obtidos na análise experimental e dos modelos teóricos, este trabalho pretende contribuir para o estudo de estruturas reais, permitindo melhor avaliar a eficiência e confiabilidade dos reforços com PRFC.

Palavras-chave: concreto armado, reforço estrutural, vigas, cisalhamento: PRFC.

1. INTRODUÇÃO

¹ Acadêmica, Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil-DEC, ra58900@uem.br

² Profa. Dra., Universidade Estadual de Maringá-UEM, Departamento de Engenharia Civil-DEC, nvmenon@uem.br

³ Prof. Ph.D. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Departamento de Engenharia Civil, ecv1ijp@ufsc.br

1. INTRODUÇÃO

Devido à sua curta existência, a utilização de PRF (polímeros reforçados com fibras) não é muito difundida no mercado da construção civil e ainda necessita de estudos mais aprofundados para o aperfeiçoamento dos modelos de equações de projeto já existentes.

As primeiras pesquisas foram realizadas no Japão, há aproximadamente 25 anos, devido a problemas com abalos sísmicos. O reforço estrutural com fibra de carbono é feito de maneira que os nós da estrutura sejam enrijecidos, evitando a liquefação, que é o efeito causado pelo abalo sísmico. Atualmente, usa-se o reforço em estruturas novas como forma de prevenção.

Após os japoneses, os americanos começaram a empregar o reforço para projetos aeroespaciais da NASA, estendendo-se posteriormente para projetos automobilísticos, como revestimento de carros de Fórmula um, a fim de evitar o esmagamento dos membros inferiores dos pilotos no caso de acidentes.

Em meados dos anos 80 realizaram-se os primeiros ensaios em vigas de concreto reforçadas com PRF, efetuados no EMPA (Laboratório Suíço de Materiais) em Zürich pelo Professor Urs. Meier. A intenção desse estudo seria a substituição de chapas de aço, inicialmente usadas para reforço, pelos compósitos, devido à suas melhores propriedades mecânicas, facilidade de aplicação e leveza.

Para tal fim escolheu-se a fibra de carbono, pois essa apresenta um módulo de elasticidade mais alto e, compatível com as deformações do concreto armado. Além disso, a matriz mais compatível com tal fibra demonstrou ser a resina epóxi, pois aglutina melhor, apresentando maior aderência e cura sem retração.

Em 1991, executou-se a primeira obra real com reforço de fibra de carbono, sendo essa a ponte Ibach em Lucerna (Suíça). Nos anos posteriores, realizaram-se mais obras, mas ainda com caráter experimental. Em 1995 o uso sistêmico do método construtivo foi estabelecido e começou-se a comercialização, especialmente na Suíça e Alemanha.

Na América Latina, a utilização de reforço com PRF ainda é atrasada em relação ao Japão, Estados Unidos e Europa, nos quais já existem, inclusive, comitês de organizações profissionais que publicaram códigos normativos, boletins, recomendações e guias de projetos.

O rápido aumento na utilização de materiais de PRF como reforço em estruturas de concreto obrigou que esforços internacionais fossem despendidos para desenvolver diretrizes de dimensionamento. Estes esforços têm resultado na publicação de vários códigos e guias de dimensionamento. A maioria dos dimensionamentos de prevenção ao cisalhamento incorporados nestes códigos e guias está baseada nas fórmulas de dimensionamento de estruturas reforçadas com aço convencional considerando algumas modificações para levar em conta as diferenças significativas entre o PRF e o aço. Estas guias e códigos usam o conhecido método $V_c + V_{sw}$ de dimensionamento ao cisalhamento que estão baseados na analogia de treliça.

No caso do reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado, tem-se verificado que a colagem superficial externa de mantas ou laminados de PRF dispostos transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal à potencial fissura crítica de cisalhamento, permite um aumento significativo da capacidade resistente. BARROS et al. (2006)

2. DESENVOLVIMENTO

Para avaliação dos modelos teóricos foram utilizados resultados da pesquisa experimental realizada por Menon (2008). As vigas foram igualmente dimensionadas: distância entre vãos de 222 cm e seção transversal de 12x25cm. O fck do concreto obtido aos 28 dias foi 31,20 MPa. As armaduras longitudinais de tração e compressão são compostas por duas barras de aço CA-50 com 16 mm de diâmetro. A armadura transversal foi sub-dimensionada, composta por estribos de aço CA- 60 de 4,2 mm de diâmetro com espaçamento de 18cm, como segue na Figura 1.

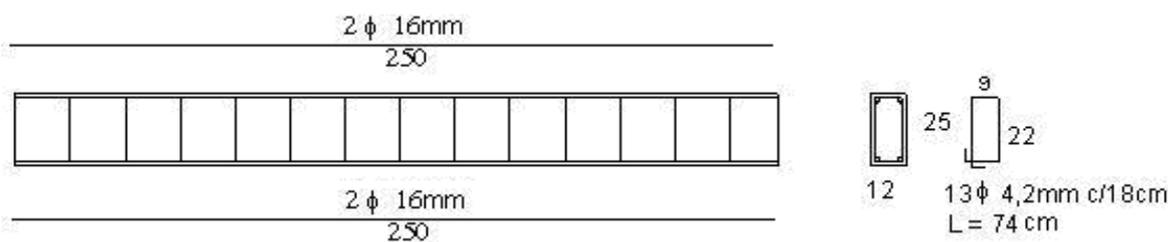
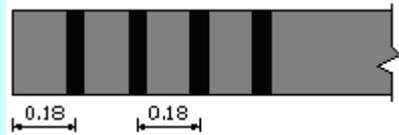
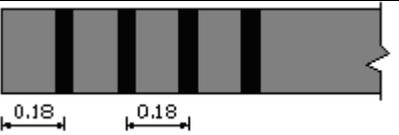


Figura 1 – Modelo das vigas ensaiadas

Fonte: MENON (2008).

Dez vigas foram reforçadas com laminados retangulares comuns colados nas laterais das vigas na superfície do concreto e em seis vigas foram utilizados laminados em forma de L, utilizando-se a configuração em forma de U com transposição das lâminas inferiores. O Quadro 1 ilustra os sistemas de reforços que foram avaliados experimentalmente.

Quadro 1 - Configuração de reforço nas vigas

| Configuração | Tipo | Esquema | Vigas |
|---|----------------|----------|-----------------|
|  | Laminados | Laterais | V18,V24, V30 |
|  | Laminados em L | Tipo U | V21,V32, |

Fonte: MENON (2008)

No Quadro 2 apresentam-se as características dos materiais constituintes dos sistemas com reforços de PRFC obtidas nas fichas técnicas disponibilizadas pelo fornecedor.

Quadro 2- Características dos sistemas de reforço

| Materiais | Resistência à tração (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Deformação unit. ruptura (%) | Espessura (mm) |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| laminado | 2800 | 165 | 1,9 | 1,2 |
| adesivo | - | 10 | - | - |
| laminado em L | 2250 | 120 | 1,7 | 1,4 |
| tecido unidirecional- (0°) | 3450 | 234 | 1,5 | 0,12 |
| adesivo | - | 45 | - | - |

Fonte: MENON (2008)

Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com valores obtidos utilizando-se expressões analíticas. Para a determinação da contribuição do concreto e da armadura transversal, foram utilizados o critério da NBR 6118 (2003) modelo 1, do Eurocode 2 (1992), do Zsutty (1968), da ACI 318M (1997) e da CEB-FIP (1990).

A contribuição do PRFC foi obtida utilizando-se expressões propostas pelo ACI 440 (2008), pela Fib-bulletin 14 (2001) e pelo CNR-DT200 (2004).

A Tabela 3 mostra a comparação dos valores obtidos através de modelos analíticos para determinação da contribuição do concreto e do aço da armadura transversal com o valor experimental.

Tabela 3 – Comparação dos valores analíticos com o valor experimental para contribuição do concreto e do aço para a Viga de Referência.

| MODELO | TEÓRICO | | | EXPERIMENTAL | | |
|--------------------------------------|----------------|------------|------------|--------------|------------|------------|
| | Vc+Vsw (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | Exp./Teór. |
| 1-Modelo 1 da NBR-6118 (2003) | 35,123 | 35,123 | 49,039 | 55,66 | 77,71 | 1,37 |
| 3-Eurocode 2 (1992) | 34,764 | 34,764 | 48,537 | | | 1,38 |
| 4-Zsutty (1968) | 43,072 | 43,072 | 60,137 | | | 1,14 |
| 5-ACI-318M (1997) | 25,309 | 25,309 | 35,336 | | | 1,80 |
| 6-Fib-(1999) | 29,642 | 29,642 | 41,386 | | | 1,58 |

As tabelas 4 e 5, exibem a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com as prescrições normativas da fib (2001), do ACI (2002) e da CNR/DT200 (2004), para os laminados colados em U com transposição da parte inferior e para os laminados colados nas laterais.

Tabela 4 – Comparação dos valores analíticos com o valor experimental para laminados em U

| RESULTADOS EXPERIMENTAIS | | | | | PRESCRIÇÕES NORMATIVAS | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|------------|----------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|----------------|------------|------------|------------|----------------|------------------|------------|------------|----------------|
| VIGAS | Vf (kN) | Vc+Vsw (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | fib (2001) | | | | ACI (2002) | | | | CNR/DT-200(2004) | | | |
| | | | | | Vf (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | Exp./ Teór. | Vf (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | Exp./ Teór. | Vf (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | Exp./ Teór. |
| V19 | 19,70 | 55,66 | 75,36 | 105,22 | 20,89 | 63,96 | 89,29 | 1,18 | 35,44 | 78,52 | 109,61 | 0,96 | 50,8 | 93,87 | 131,07 | 0,80 |
| V20 | 26,30 | | 81,96 | 114,43 | | | | 1,28 | | | | 1,04 | | | | 0,87 |
| V21 | 25,41 | | 81,07 | 113,19 | | | | 1,27 | | | | 1,03 | | | | 0,86 |
| V31 | 28,50 | | 84,16 | 117,50 | | | | 1,32 | | | | 1,07 | | | | 0,90 |
| V32 | 27,85 | | 83,51 | 116,60 | | | | 1,31 | | | | 1,06 | | | | 0,89 |
| V33 | 26,92 | | 82,58 | 115,30 | | | | 1,29 | | | | 1,05 | | | | 0,88 |

Sika® CarboShear L 4/20/50).com o valor experimental para os laminados colados nas

laterais (Sika® CarboDur S512).

| RESULTADOS EXPERIMENTAIS | | | | | PRESCRIÇÕES NORMATIVAS | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------|-------------|---------|---------|------------------------|---------|---------|------------|------------|---------|---------|------------|------------------|---------|---------|------------|
| | | | | | fib (2001) | | | | ACI (2002) | | | | CNR/DT-200(2004) | | | |
| VIGAS | Vf (kN) | Vc+Vsw (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | Vf (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | Exp./Teór. | Vf (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | Exp./Teór. | Vf (kN) | Vu (kN) | Pu (kN) | Exp./Teór. |
| V16 | 10,46 | 55,66 | 66,12 | 92,32 | 22,46 | 65,53 | 91,48 | 1,01 | 5,60 | 48,67 | 67,94 | 1,36 | 31,0 | 74,97 | 103,92 | 0,89 |
| V18 | 22,35 | | 78,01 | 108,92 | | | | 1,19 | | | | 1,60 | | | | 1,05 |
| V22 | 27,16 | | 82,82 | 115,64 | | | | 1,26 | | | | 1,70 | | | | 1,12 |
| V26 | 13,33 | | 68,99 | 96,32 | | | | 1,05 | | | | 1,42 | | | | 0,93 |
| V30 | 0,92 | | 56,58 | 79,00 | | | | 0,86 | | | | 1,16 | | | | 0,76 |
| V35 | 30,30 | | 85,96 | 120,02 | | | | 1,31 | | | | 1,77 | | | | 1,16 |
| V17 | 10,79 | | 66,45 | 92,78 | | | | 1,01 | | | | 1,37 | | | | 0,90 |
| V23 | 13,44 | | 69,10 | 96,48 | | | | 1,05 | | | | 1,42 | | | | 0,93 |
| V24 | 0,00 | | 55,36 | 77,30 | | | | 0,84 | | | | 1,14 | | | | 0,75 |
| V25 | 24,54 | | 80,20 | 111,98 | | | | 1,22 | | | | 1,65 | | | | 1,08 |

3. CONCLUSÃO

A análise dos resultados apresentados juntamente com as observações feitas durante a realização dos ensaios experimentais e os cálculos feitos através dos modelos analíticos conduziu às conclusões que são descritas a seguir.

Quando comparados os modelos analíticos com os experimentais para o sistema que utilizou laminados colados nas laterais, o melhor desempenho foi obtido pelo modelo proposto pelo CNR (2004), sendo que os valores foram os mais próximos dos experimentais. O critério proposto pela fib (2001) mostrou também um bom desempenho, porém um pouco menos conservador e por último os valores calculados através do ACI (2002) foram os que demonstraram menor confiança. Para o sistema de reforço que utilizou laminados em L o critério proposto pelo ACI (2002), apresentou os resultados mais próximos dos experimentais. Em seguida o modelo do CNR (2004) apresentou resultados confiáveis e por último o modelo da fib (2001) apresentou um fraco desempenho que poderá ser devido ao fato da formulação não diferenciar o tipo de reforço nas laterais do reforço em U.

Para os dois sistemas de reforço estudados o melhor desempenho, do ponto de vista da segurança estrutural, foi obtido pelo modelo proposto pelo CNR, registrando-se que este método é também aquele que apresenta o maior número de resultados extremamente conservativos.

As recomendações atuais para o cálculo da capacidade resistente ao cisalhamento de vigas reforçadas com PRFC colados externamente propõem a soma de três contribuições independentes (concreto, aço e PRFC) sem levar em conta que a presença do reforço pode influir sobre as contribuições fornecidas pelo concreto e, sobretudo da armadura. Existe uma interação entre o reforço externo e a armadura interna observada experimentalmente que pode influenciar na eficiência da técnica do reforço. Vários pesquisadores estão estudando um amplo banco de dados experimentais para analisar crítica e meticulosamente a formulação dos principais códigos de

dimensionamento de reforço com PRFC (fib, ACI; CNR dentre outros) para que se obtenham modelos analíticos de dimensionamento com maior segurança estrutural.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR-6118. **Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro; 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 318 – **Building Code Requirements for Structural Concrete**. *ACI Committee 318*. Detroit, 1995.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 440.2R-02 – **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded PRF Systems for Strengthening Concrete Structures**. Farmington Hills, MI, USA, 2002.

BORGES, J.U.A. GASPAR, R. TRAUTWEIN, L.M. **Estudo Comparativo sobre o Cisalhamento em Vigas de Concreto Segundo a Nova NBR-6118/2002 e Outras**

CNR-DT 200/2004. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded PRF Systems for Strengthening Existing Structures, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction**, Rome – Italy, 2004.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. London, Thomas Telford, 1993.

EUROCODE 2 “EN 1992-1-1: Eurocode 2: **Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**, CEN, Brussels, Belgium, 2004.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – fib. **Structural Concrete: Textbook on Behavior, Design and Performance**, (Bulletins 1, 2, 3) Lausanne Switzerland, 1999.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Externally Bonded PRF Reinforcement for RC Structures. Technical report by task group 9.3 PRF reinforcement for concrete structures**, Fédération Internationale du Béton – fib Bulletin 14, 130p. Lausanne Switzerland. Julho, 2001.

KHALIFA, A.; NANNI, A. **Contribution of externally bonded PRF shear capacity of flexural members**. *Journal of Composites for Construction*, v. 2, n.4, p. 195-202, Nov 1998.

KHALIFA, A.; NANNI, A. **Anchorage of surface mounted PRF reinforcement**. *Concrete International: Design and Construction*, v. 21, n.10, p. 49-54, Oct 1999.

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 Doutorado em Estruturas 327f. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2008.

STRATFORD, T.; BURGOYNE, C. **Shear Analysis of Concrete with Brittle Reinforcement.** *Journal of Composites for Construction*, p 939-948. , Nov 2003.

TENG, J.G.; CHEN, J.F.; SMITH, S.T.; LAM, L. **PRF strengthened RC structures.** John Wiley e Sons, LTD, West Sussex, England. 2001.

TRANTAFILLOU, T. C. **Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded PRF composites.** *ACI Structural Journal*. v. 95, n. 2, p. 107-115, Mar- Apr 1998.

ZSUTTY, T.C. **Beam shear strength prediction by analysis of existing data** .ACI - Journal Proceedings, Vol. 65, November,1968.