

## 9 Conclusões

Neste trabalho foram apresentados os tópicos desenvolvidos num estudo teórico e experimental de vigas de concreto armado solicitadas à torção reforçadas com compósitos de fibras de carbono. O estudo teórico desenvolvido consta de dois modelos, um para análise e outro para dimensionamento deste tipo de solicitação. O estudo experimental foi composto por ensaios de sete vigas de concreto armado com mesma armadura de aço longitudinal e transversal e concreto de mesma resistência, realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. As vigas ensaiadas foram divididas em três séries, sendo uma viga de referência VRef, três vigas com reforço transversal de CFC da série VT, e três vigas com reforço transversal e longitudinal de CFC da série VTL.

A revisão bibliográfica mostrou que existem poucos trabalhos sobre esse assunto, e que é possível reforçar vigas de concreto armado solicitadas à torção com CFC. Nesta revisão verificou-se que os modelos utilizados não são consistentes em diversos aspectos, principalmente na verificação da aderência entre o material de reforço e o substrato de concreto. Como os modos de ruptura dos elementos devem ser considerados na elaboração dos modelos, pois os mecanismos resistentes das vigas devem ser considerados de maneira global, foi desenvolvida uma sistemática fundamentada no teorema estático da Teoria da Plasticidade (*lower-bound*) para analisar o comportamento global das vigas reforçadas à torção.

A partir da análise dos resultados experimentais e teóricos pode-se concluir que:

- as vigas reforçadas das séries VT e VTL apresentaram em média acréscimo de resistência à torção de 44% e 38%, respectivamente, quando comparados com a viga de referência;
- para as vigas da série VT tem-se  $\rho_{TOTAL} = \rho_{ft} = 0,183\%$  e para as vigas da série VTL tem-se  $\rho_{TOTAL} = \rho_{ft} + \rho_{fl} = 0,209\%$ . Analisando-se estes valores, verifica-se que as vigas da série VT, cujo reforço foi aplicado em duas camadas na forma de estribos fechados,

apresenta-se como a melhor alternativa de reforço, pois além de as vigas desta série apresentarem resistência à torção superior à da série VTL, a taxa geométrica total de armadura de CFC aplicada é menor que a da série VTL;

- a dispersão dos resultados para momento torçor de ruptura para cada série foi baixa, sendo que a série VT apresentou coeficiente de variação de 8,07% e a série VTL apresentou coeficiente de variação de 8,27%;
- o momento torçor de fissuração considerando-se todas as vigas foi em média 16 *kNm*, e a dispersão dos resultados experimentais também foi baixa, sendo que o coeficiente de variação da série VT igual a 6,25% e para a série VTL o coeficiente de variação foi de 6,16%;
- o ângulo de torção por unidade de comprimento experimental quando da ruptura da viga, apresentou dispersão um pouco maior, entretanto, são valores aceitáveis, sendo de 17,79% para a série VT e 16,88% para a série VTL;
- após a fissuração todas as vigas apresentaram grande redução na rigidez à torção, sendo que essa redução foi de 97,52% para a viga VRef, 91,78% em média para a série VT e 90,74% em média para a série VTL;
- com relação ao ângulo de inclinação da biela, observou-se que com exceção da viga de VTL1, obteve-se  $\alpha_\epsilon > \alpha_f > \alpha_{Ap} > \alpha_\sigma$ ;
- o ângulo de inclinação da biela calculado pela expressão 6.135 fornecida por Aprile Bendetti (2004) depende apenas de parâmetros mecânicos e não depende do estado de tensão e deformação do elemento estrutural, ou seja, as vigas pertencentes a uma determinada série apresentam mesmo ângulo de inclinação das bielas, pois têm mesmo concreto, aço e CFC com as mesmas taxas geométricas e características geométricas, mesmo assim, os valores fornecidos por esta expressão são consistentes e esse modelo pode ser usado para a análise do reforço à torção;
- as máximas deformações específicas obtidas nas armaduras de aço transversal e longitudinal foram 0,243% e 0,340%, que ocorreram respectivamente nas vigas VT2 e VTL2;

- as máximas deformações específicas obtidas nas armaduras de CFC transversal e longitudinal foram 0,525% e 0,438% na viga VTL2;
- para a direção transversal observa-se que a relação  $\frac{\varepsilon_{st,exp}}{\varepsilon_{ft,exp}}$  apresenta valores entre 0,396 e 0,615 e na direção longitudinal os valores da relação  $\frac{\varepsilon_{st,exp}}{\varepsilon_{ft,exp}}$  variam entre 0,694 e 0,775.
- o fator de efetividade das deformações específicas dos CFC foi em torno de 0,25, ou seja, mesmo que a deformação específica última indicada pelo fabricante seja de 1,4% verificou-se nos ensaios que a deformação específica foi no máximo de 0,525%, visto que o descolamento do CFC ocorre antes que  $\varepsilon_{fu}$  seja alcançada;
- os fatores de efetividade obtidos pelas diversas formulações foram inferiores aos prescritos pelo Eurocode 2 para vigas de concreto armado, concluindo-se que são necessárias mais pesquisas para se ter uma conclusão sobre o valor desse parâmetro;
- as deformações específicas calculadas a partir das expressões propostas pelo Bulletin 14 da FIB considerando-se os ângulos  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\alpha_f$ ,  $\alpha_\sigma$  e  $\alpha_{Ap}$ , apresentaram-se quase sempre com alto coeficiente de variação, ou seja, superior a 25%; ressalta-se que essas expressões foram obtidas para o dimensionamento à força cortante, e sua aplicação para a torção é uma adaptação teoricamente inconsistente e não deve ser usada;
- a tensão de compressão na biela da viga de referência foi de 10,31 MPa, 10,34 MPa e 10,87 MPa considerado-se para o cálculo os ângulos  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\alpha_f$  e  $\alpha_\sigma$ , respectivamente;
- o fator de efetividade do concreto da viga de referência foi de 0,282, 0,282 e 0,297, considerando-se para o cálculo os valores de  $\sigma_{c\varepsilon}$ ,  $\sigma_{cf}$  e  $\sigma_{c\sigma}$ , respectivamente;
- na série VT a tensão de compressão na biela quando comparada com a da viga de referência aumentou, variando entre 12,65 MPa e 15,89 MPa, considerando-se para o cálculo os valores de  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\alpha_f$ ,  $\alpha_\sigma$  e  $\alpha_{Ap}$ ;

- o fator de efetividade do concreto das vigas da série VT foi superior ao da viga de referência e variou entre 0,346 e 0,434;
- para a série VTL a tensão de compressão na biela também foi superior à da viga de referência, e variou entre 11,85 MPa e 14,26 MPa, considerando-se para o cálculo os valores de  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\alpha_f$ ,  $\alpha_\sigma$  e  $\alpha_{Ap}$ ;
- o fator de efetividade do concreto das vigas da série VT foi superior ao da viga de referência e variou entre 0,324 e 0,390;
- o modelo da Treliça Espacial Generalizada prescrito pelo Eurocode 2 é consistente e pode ser adotado no cálculo do reforço à torção;
- com exceção da viga VRef, os valores obtidos com o modelo da Treliça Espacial com Abrandamento das Tensões (TEAT), quando comparados com os resultados obtidos a partir do programa experimental, apresentaram excelente aproximação para a curva momento torçor e ângulo de torção por unidade de comprimento,  $T \times \theta$ ; esse modelo por sua consistência teórica e pelos resultados fornecidos, é adequado para análise do reforço à torção;
- o momento torçor de ruptura calculado por meio do modelo da treliça espacial generalizada do Eurocode 2 também apresentou boa aproximação, quando comparado com o valor do momento torçor de ruptura experimental;
- nos métodos iterativos utilizados os resultados estão vinculados ao modelo de aderência adotado, então a adoção de outro modelo pode alterar esses resultados, concluindo-se que o aprimoramento desse modelo leva a resultados mais precisos.

### 9.1. Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestões para o prosseguimento dessa pesquisa podem ser citados:

1. o desenvolvimento de uma sistemática fundamentada no teorema cinemático da Teoria da Plasticidade (*upper-bound*) para previsão do momento torçor de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas com CFC;

2. o desenvolvimento de um programa experimental para o estudo de vigas de concreto armado solicitadas à torção com pré-carregamento, com aplicação do reforço com CFC após a viga atingir o momento torçor de fissuração;
3. o desenvolvimento de um estudo teórico-experimental de vigas de concreto armado reforçadas à torção com CFC com a variação da razão  $1 \leq h/b \leq 5$ , onde  $h$  é a altura da viga e  $b$  a sua largura;
4. o desenvolvimento de um estudo experimental para avaliar a contribuição do engrenamento do agregado no valor do momento torçor de ruptura;
5. compilação dos resultados obtidos nas pesquisas descritas anteriormente, e elaboração de estudo estatístico para estabelecimento de expressões para a deformação específica no CFC;
6. pesquisa de uma expressão para a largura efetiva do fluxo de tensões tangenciais considerando-se as armaduras de aço e de CFC;
7. estudo do comportamento da biela flexo-comprimida nas arestas da seção transversal da viga, avaliando o confinamento devido ao CFC para evitar o fendilhamento dessas arestas;
8. estudar outros tipos de seções transversais, tais como, seções T e L.
9. o estudo de vigas de concreto armado reforçadas com CFC com variação da taxa de reforço nas direções transversal e longitudinal e variação da resistência à compressão do concreto;
10. o desenvolvimento de um modelo de análise para vigas de concreto armado reforçadas com CFC solicitadas à torção baseado no modelo do campo de compressão diagonal modificado;

Como sugestões para novas diretrizes de pesquisas sobre o reforço à torção citam-se:

- a. o estudo do comportamento de vigas de concreto armado com aberturas reforçadas com CFC solicitadas à torção;
- b. o desenvolvimento de um estudo teórico-experimental de vigas de concreto armado reforçadas com CFC solicitadas simultaneamente por força cortante e momento torçor;
- c. o desenvolvimento de implementações computacionais utilizando-se o Método dos Elementos Finitos para todos os estudos descritos anteriormente;