

6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

São apresentadas as conclusões obtidas neste estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à força cortante com compósitos de fibras de carbono (CFC) por meio de estribos em U. A partir das análises dos resultados experimentais e teóricos pode-se concluir que:

- para as vigas com reforço não foi constatado a ruptura por tração do CFC e sim o colapso da viga por força cortante (ruptura brusca) e o imediato descolamento do reforço na região da ancoragem, ou seja, por tração diagonal na região entre o apoio e o ponto de aplicação de força;
- O sistema de ancoragem adotado (tira de CFC colada na extremidade dos estribos em U) mostrou-se efetivo, pois não ocorreu ruptura prévia por descolamento do reforço;
- o acréscimo da força cortante nas vigas reforçadas das Séries I e II variou de 36% a 54% em relação às vigas de referência, o que mostra a eficácia do compósito de fibras de carbono para esse tipo de reforço estrutural no ganho resistência final da viga. Constata-se também que a pré-fissuração pouco influenciou a resistência das vigas com reforço;
- pela Tabela 5.11, os ângulos das fissuras medidos por meio digital θ_{CR} mostraram-se menos dispersos (C.V. = 6,18%) do que os calculados com as deformações específicas lidas pelos EER colados na superfície do concreto θ_ε . Com base nos valores de θ_{CR} , o valor médio do ângulo de inclinação da fissura que pode ser usado em análises para determinação da força cortante é de 39,13°;
- a hipótese básica do modelo cinemático que assume que o ângulo de fissuração é igual ao ângulo de inclinação da linha de plastificação é comprovada pelos resultados experimentais, pois a razão $\frac{\theta_{CR}}{\theta_{CIN}}$ apresenta uma média de 1,05 e um C.V. = 12,69%, considerando-se as

vigas de referência VR1 e VR2. Sem essas vigas os resultados melhoram, sendo a média igual a 0,94 e o C.V. = 4,15%;

- para a determinação da força cortante teórica para cada uma das vigas, o modelo cinemático apresentou resultados menos dispersos (C.V. = 6,55%) quando comparados com os modelos do ACI-318 (1999) e ACI-440 (2001) que fornecem C.V. = 9,94% para a razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$, conforme

Tabela 5.13. O modelo de Colloti *et al.* (2004) registrou C.V. = 13,81% para os seus resultados teóricos em relação aos valores experimentais. Conclui-se que para esses três modelos, além de apresentarem resultados a favor da segurança, as suas metodologias de cálculo são bastante consistentes para a determinação de $V_{u,teór}$;

- as razões entre as parcelas últimas (experimentais) e as teóricas da força cortante segundo o método do ACI-440 (2001) têm uma dispersão aceitável para a parcela V_{sw} para o ângulo de inclinação da biela, considerando-se θ_{CR} e θ_ϵ , com C.V. igual a 9,17% e 21,09% respectivamente, conforme Tabelas 5.14 e 5.15. A parcela $V_{c,exp}$ referente ao concreto apresentou um alto coeficiente de variação, que variou de 40,97% a 74,96% quando da consideração dos ângulos θ_{CR} e θ_ϵ respectivamente, em relação à parcela teórica;
- segundo as Tabelas 5.14 e 5.15, os valores de $V_{f,exp}$ calculados com os ângulos θ_{CR} e θ_ϵ são, em geral, bem superiores aos valores $V_{f,teór}$ calculados de acordo com o ACI-440 (2001), com média de 73% e 74% acima da parcela teórica, ou seja, esses valores obtidos são conservativos. Para o ângulo θ_{CR} ocorreu uma menor dispersão nos resultados da razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teór}}$ quando comparados com os valores obtidos considerando-se o ângulo θ_ϵ ;
- os valores da contribuição da parcela teórica do CFC $V_{f,teór}$, conforme Tabela 5.18, obtidos por meio dos demais modelos, FIB-Bulletin 14 (2001), Khalifa e Nanni (2002) e Chen e Teng (2002), mostram que

para a maioria das vigas com reforço os resultados desses modelos são inferiores aos resultados da parcela experimental $V_{f,exp}$;

- na hipótese aditiva $V_{u,exp} = V_{c,exp} + V_{sw,exp} + V_{f,exp}$, $V_{c,exp}$ foi calculada determinando-se $V_{f,exp}$ a partir dos ângulos experimentais θ_{CR} e θ_c obtidos nos ensaios, porém ressalta-se que os ângulos para alguns modelos teóricos, como o do ACI-440 (2001) e Khalifa e Nanni (2002), admitem um $\theta = 45^\circ$, que é uma maneira simplista de se calcular $V_{f,teór}$;
- as razões entre os valores experimentais e teóricos mostrados na Tabela 5.18 são superiores à unidade, o que permite concluir que a expressão para o cálculo de V_f baseada no modelo da Treliça Generalizada fornece valores conservativos. Nessa tabela os dados referentes ao modelo da FIB-Bulletin 14 (2001) e ao modelo de Chen e Teng (2002) apresentaram pequenas dispersões para a razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teór}}$, com C.V igual 7,13% e 8,00% respectivamente, o que mostra a boa consistência dessas sistemáticas para a determinação de $V_{f,teór}$. Para as sistemáticas do ACI-440 (2001) e Khalifa e Nanni (2002) a variação da razão $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teór}}$ para cada um desses modelos se mostrou apenas regular, mostrando que alguns de seus parâmetros deveriam ser reavaliados;
- na Tabela 5.19 os valores de efetividade do reforço ν_f mostram que o valor médio para esse parâmetro a ser utilizado no dimensionamento da parcela resistida pelo CFC pode ser adotado como sendo de 46%;
- o ajuste da curva $\nu_f \times E_f \rho_f$ é bom, com $R^2 = 0,922$, e mostra que o aumento da rigidez $E_f \rho_f$ diminui a deformação específica última $\varepsilon_{f,exp}$ do CFC;
- o ajuste da curva $\nu_f \times \frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$ é apenas regular, com $R^2 = 0,590$, e mostra que o aumento da razão $\frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$ leva ao aumento de ν_f , o que

pode levar a altos valores para $\varepsilon_{f,exp}$, e gerar problemas de aderência CFC-concreto;

- o ajuste da curva $\nu_f \times \frac{E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$ é bom, com $R^2 = 0,924$. Essa curva mostra que se f_c diminui a deformação específica $\varepsilon_{f,exp}$ também diminui, indicando que um tipo de ruptura indesejável pode ocorrer, ou descolamento ou arrancamento do substrato de concreto, pois o parâmetro $f_c^{2/3}$ está vinculado à resistência à tração desse substrato;
- os ajustes das curvas $\nu_f \times (E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f)$ e $\nu_f \times \frac{E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$ não são bons, com $R^2 = 0,390$ e $R^2 = 0,383$ respectivamente. Isto mostra que a iteração entre essas duas armaduras deve ser pesquisada com mais acuidade;
- os ajustes das curvas $\nu_f \times \theta$ para o ângulo teórico θ_{CIN} e experimentais θ_{CR} e θ_ε não são bons. O aumento desses ângulos mostra um decréscimo da efetividade do reforço ν_f , ou seja, ocorre uma diminuição da deformação específica $\varepsilon_{f,exp}$.

6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Com o intuito de dar continuidade a esta dissertação são apresentadas a seguir diversas sugestões para futuros trabalhos:

- o estudo de vigas reforçadas com CFC com diferentes resistências à compressão do concreto;
- análises de alternativas para o melhoramento da ancoragem do reforço à força cortante para evitar a ruptura brusca e aumentar a efetividade do CFC;
- o estudo de vigas reforçadas com CFC com diferentes taxas de armadura longitudinal;

- o estudo de vigas reforçadas com CFC com diferentes ângulos de inclinação do reforço, e diferentes taxas de armaduras transversal interna e externa para a elaboração de um banco de dados;
- o desenvolvimento de um estudo teórico-experimental de vigas reforçadas com CFC à flexão e à força cortante simultaneamente;
- estudar o reforço de vigas de concreto armado para diferentes dimensões de seção **T** e vigas de seções retangular, com envolvimento completo da seção com CFC e com estribos em **U**;
- desenvolver análises de vigas reforçadas com CFC variando-se a relação $\frac{a}{d}$, onde a é a distância do ponto de aplicação de força até o apoio mais próximo e d é a altura útil da viga;
- elaborar, segundo os diversos resultados de pesquisas desenvolvidas no Brasil, um manual de procedimentos e técnicas que apresentem uma sistemática normativa de cálculo e execução de vigas reforçadas à força cortante com compósitos de fibras de carbono.