

6

Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo aplicar a análise de confiabilidade de estruturas ao projeto de reforço à força cortante com compósitos de fibras de carbono de vigas em concreto armado.

Inicialmente, modelos semi-empíricos e prescrições normativas disponíveis na literatura para verificar a capacidade resistente do reforço à força cortante foram analisados e implementados em *MathCad versão 2001 Professional*. Programas experimentais realizados por diversos pesquisadores foram analisados e os resultados dos ensaios reunidos para comparação teórico-experimental. Esta comparação permitiu concluir que, de uma maneira geral, o modelo proposto por CHEN e TENG (2003 a,b) seguido do proposto por TRIANTAFILLOU e ANTONOPOULOS (2000) se mostraram mais apropriados do que os demais estudados. As prescrições do Bulletin 14 da *fib* (2001) seguem integralmente o modelo proposto por TRIANTAFILLOU e ANTONOPOULOS (2000).

Posteriormente, foi desenvolvido um programa para análise de confiabilidade de estruturas em *linguagem C* onde o método FORM foi utilizado. Este programa permitiu:

- avaliar a confiabilidade à força cortante de seções de concreto armado (utilizando as prescrições da NBR 6118 (2003));
- avaliar a confiabilidade à força cortante de seções de concreto armado reforçadas com CFRP (utilizando as prescrições da NBR 6118 (2003) de forma conjunta com o modelo proposto por CHEN e TENG (2003 a,b) ou com as prescrições do Bulletin 14 da *fib* (2001));
- dimensionar o reforço à força cortante para um nível de confiabilidade pré-estabelecido (utilizando as mesmas prescrições e modelos citados acima).

Os exemplos apresentados no Capítulo 5 foram desenvolvidos utilizando este programa de confiabilidade de estruturas.

Com base nestes exemplos conclui-se para a seção de concreto armado original, sem reforço, que:

- como esperado, a seção tem maior probabilidade de falhar devido à ruína de sua alma por tração diagonal do que por compressão diagonal ($\beta_3 < \beta_2$);
- o aumento da proporção de cargas acidentais, sendo mantido o valor da carga total, resulta em valores menores de índices de confiabilidade (β_2 e β_3);
- quando são introduzidos os fatores de modelagem (ϕ_S e ϕ_R), os valores dos índices de confiabilidade diminuem porque as imperfeições dos modelos de cálculo passam a ser consideradas;
- variável aleatória com coeficiente de variação elevado e comportamento representado por distribuição de valores extremos Gumbel apresenta importância significativa na avaliação de falha da seção, caso constatado para a variável aleatória V_q ;
- fatores de modelagem (ϕ_S e ϕ_R), também, apresentam fator de importância significativo por serem variáveis aleatórias que multiplicam toda a parcela solicitante ou resistente da função de estado. Quanto maior o valor do coeficiente de variação da variável e da média maior é o valor de seu fator de importância, caso verificado para a variável ϕ_R ;
- quando existe um modo de falha nitidamente preponderante ($\beta_3 \ll \beta_2$) o valor do índice de confiabilidade equivalente $\beta_{e,série}$, obtido considerando a formulação de sistemas em série, assume o mesmo valor do índice de confiabilidade obtido para o modo de falha preponderante (β_3); e, quando os valores dos índices de confiabilidade são próximos, $\beta_{e,série}$ apresenta valor menor do que os obtidos para β_2 e β_3 .

Para justificar a necessidade de reforçar a seção de concreto armado original foram supostos dois acréscimos distintos de carga acidental.

As taxas geométricas de reforço foram dimensionadas por dois enfoques: o semi-probabilístico, baseado na prática corrente de projeto, e o probabilístico,

baseado em análise de confiabilidade. No enfoque probabilístico, as taxas geométricas de reforço foram obtidas considerando o índice de confiabilidade equivalente avaliado considerando a formulação de sistemas em série com um valor maior ou igual ao valor do índice de confiabilidade escolhido como sendo o de referência ($\beta_{e,série} \geq 3,8$).

Com base nos exemplos do Capítulo 5 conclui-se para a seção de concreto armado reforçada com compósito de fibras de carbono, que:

- o tecido de fibras de carbono mais apropriado para o reforço à força cortante, situação na qual o compósito não deve se deformar muito, é o de alto módulo de elasticidade porque se consegue chegar a resistências maiores com menores quantidades de reforço; e, quanto menor a quantidade de camadas necessárias de compósito mais eficiente é o reforço. As prescrições do Bulletin 14 *fib* (2001) recomendam que não se utilizem mais de cinco camadas de reforço quando este é executado com tecidos;
- o projeto do reforço pelo enfoque semi-probabilístico pode fornecer resultados contra a segurança ($\beta < 3,8$) principalmente quando há predominância de carga acidental e quando os fatores de modelagem são introduzidos;
- a seção tem maior probabilidade de falhar por tração diagonal devido ao descolamento do compósito do que pelos demais modos ($\beta_4 < \beta_3$ e $\beta_4 < \beta_2$), portanto, o reforço é dimensionado pelo enfoque probabilístico tendo como restrição $\beta_{e,série} = \beta_4 = 3,8$;
- quando o reforço é executado com envolvimento completo a função de falha que avalia o descolamento não é considerada. Para esta situação, a compressão diagonal pode passar a ser determinante no dimensionamento do reforço, $\beta_{e,série} = \beta_2 = 3,8$, o que indica a necessidade de sempre se verificar a capacidade resistente das diagonais comprimidas de concreto;
- quando há aumento da proporção de cargas acidentais, sendo mantido o valor da carga total, o dimensionamento pelo enfoque probabilístico fornece maiores taxas geométricas de reforço;

- quando os fatores de modelagem (ϕ_S e ϕ_R) são introduzidos os valores de taxas geométricas de reforço são maiores quando o dimensionamento é realizado pelo enfoque probabilístico;
- quando a quantidade de camadas aumenta o valor do índice de confiabilidade referente ao descolamento do reforço (β_4) diminui para a mesma taxa geométrica de reforço, permitindo concluir que é sempre mais apropriado adotar o menor número de camadas possível. Essa situação é constatada quando se utiliza as equações propostas por CHEN e TENG (2003 a, b), que são dadas em função da espessura do reforço t_f (quando mais de uma camada de compósito é utilizada o valor de t_f é multiplicado pelo número de camadas);
- em relação aos fatores de importância os comentários são os mesmos feitos para a seção de concreto armado;
- no dimensionamento baseado em confiabilidade, tanto as variáveis aleatórias das resistências (f_c , f_{yw} e f_f) como as das solicitações (V_g e V_q) assumem nos pontos de projeto, obtidos para cada função de estado, valores maiores do que seus valores característicos.

No dimensionamento probabilístico o nível de confiabilidade desejado é estabelecido. Como vantagens pode-se ressaltar, também, que a importância de cada variável aleatória é obtida, permitindo saber quais variáveis merecem maior atenção e que o dimensionamento pode ser realizado considerando a formulação de sistemas em série, o que conduz a uma solução sempre a favor da segurança.

Neste trabalho, o reforço é utilizado para complementar a capacidade resistente da seção de concreto armado original quando ocorre acréscimo de carga acidental.

No projeto baseado em confiabilidade o reforço é dimensionado levando em consideração a capacidade resistente da seção de concreto armado antes do acréscimo de carga, ou seja, o reforço é utilizado como calibrador para que se atinja o nível de confiabilidade desejado.

Podem ocorrer situações onde a seção de concreto armado original suportará uma parcela da carga acrescida. Neste caso, a seção reforçada passará a apresentar uma confiabilidade menor do que a seção sem reforço

apresentava para o seu carregamento original, porém ainda assim dentro de um nível aceitável. Em outras situações, o reforço será responsável por aumentar o nível de confiabilidade da seção de concreto armado original, sem reforço, e ainda suportar a carga acidental acrescida mantendo o nível de confiabilidade. Nesta situação o reforço será responsável, também, por suportar uma parcela da carga acidental já existente antes do acréscimo de carga e a seção passará a apresentar nível de confiabilidade maior do que a seção sem reforço apresentava para o seu carregamento original.

6.2. Propostas para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

No que diz respeito ao reforço:

- novos estudos experimentais em vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono para:
 - pesquisar sistemas de ancoragem do reforço eficientes, de forma a prevenir o descolamento do mesmo;
 - medir a deformação específica efetiva do compósito colado à viga;
 - medir o ângulo de inclinação da fissura de cisalhamento e medir o ângulo de inclinação das bielas de concreto comprimidas.
- novos estudos experimentais para avaliar a parcela resistida por mecanismos complementares ao da treliça, comparando os resultados obtidos com a equação proposta pela NBR 6118 (2003);
- aperfeiçoamento dos modelos de cálculo para verificar a capacidade resistente do reforço à força cortante.

No que diz respeito à confiabilidade de estruturas:

- aprimoramento do programa de confiabilidade introduzindo interface gráfica;
- investigar novos modelos probabilísticos, principalmente dos fatores de modelagem;

- introduzir a confiabilidade à flexão de seções transversais de vigas de concreto armado. Utilizar a formulação de sistemas em série de forma conjunta para flexão e força cortante;
- calcular o ponto de projeto equivalente para a formulação de sistemas em série;
- calcular os fatores de importância das variáveis aleatórias para a formulação de sistemas em série;
- varrer o espaço das resistências e solicitações para calibrar os coeficientes parciais de segurança utilizando técnicas de otimização;
- introduzir o RBDO (Reliability-Based Design Optimization) ao projeto do reforço à força cortante com compósitos de fibras de carbono (CFRP) em vigas de concreto armado.