

## **6. Conclusões e Sugestões**

### **6.1. Conclusões**

A alteração das propriedades de elementos estruturais em concreto armado através da colagem de tecidos ou lâminas de fibra de carbono ou fibra de vidro, colagem de chapas de aço, adição de estribos pré-tracionados e colagem de barras de aço, entre outros, representam uma alternativa extremamente interessante na reestruturação, adaptação e recuperação de estruturas. Seguido a realização de diversos estudos experimentais utilizando-se materiais compósitos, firmam-se os conceitos de aplicação e colagem, junto a leveza, dimensões reduzidas e resistência a altas tensões de tração. Estes materiais não tradicionais, têm através destes estudos e de sua aplicação em campo definido parâmetros e critérios de segurança confiáveis a sua aplicação em projetos.

Levando-se em conta esta evolução e a crescente confiabilidade no material, torna-se cada vez mais presente a necessidade de estudos e ferramentas de análise estrutural pertinentes. Esta evolução, baseada em dados experimentais e nos métodos tradicionais de análise, pode levar a situações de análise e dimensionamento mais elaborados, com melhor aproveitamento do material e a determinação matemática de esforços e deformações de todo o conjunto.

De acordo com esta filosofia, apresentou-se neste trabalho um modelo constitutivo de formulação hipoeelástica proposto por Elwi & Murray (1979) para concreto simples. Essa formulação utiliza o conceito de deformação uniaxial equivalente de Darwin & Pecknold (1974) e o critério de ruptura de Willam & Warnke (1975). Através da incorporação de relações uniaxiais entre tensões e deformações, o concreto simples é descrito em seu comportamento à compressão, à tração e ao cisalhamento. O comportamento à compressão é baseado em tensão máxima, deformação equivalente, rigidez inicial e energia de fraturamento. O comportamento à tração é baseado em tensão máxima, deformação equivalente, rigidez inicial, na perda brusca de rigidez pela energia consumida pela formação da fissura e pela energia de fraturamento. O comportamento ao cisalhamento é descrito de forma semelhante ao descrito para compressão e tração até o valor de tensão máxima, e na parte pós-pico pelo valor secante do módulo de elasticidade

transversal e por um fator representativo da perda de engrenamento do agregado. Junto ao modelo hipoeelástico proposto por Elwi & Murray (1979) foi apresentado o modelo elasto-plástico multilinear, utilizado para descrever o comportamento das armações longitudinais e transversais dentro da malha de Elementos Finitos. De acordo com o objetivo deste estudo, adaptou-se o modelo original de forma a torná-lo capaz de reproduzir o comportamento estrutural de elementos em concreto armado reforçados em serviço. Ou seja, as propriedades do sistema são alteradas com a introdução de uma rigidez adicional e correspondente nos elementos que representam o compósito, durante a atuação das cargas pertinentes.

Para implementação computacional do modelo apresentado foi utilizado o programa de análise por Elementos Finitos FEPARCS (Elwi & Murray, 1980), que incorpora estratégias de solução adequadas a problemas de natureza não-linear, além de dispor de uma série de modelos constitutivos para concreto, inclusive o modelo de Elwi & Murray, (1979). Sendo o FEPARCS (Elwi & Murray, 1980) um programa originalmente de processamento numérico, foi implementado um programa de pré e pós-processamento gráfico. Através deste programa é possível gerar malha de elementos finitos, restrições, aplicar cargas, definir propriedades, definir estratégias de cálculo para elementos bidimensionais planos Q4 e Q8, e transferir automaticamente para a função de cálculo no FEPARCS (Elwi & Murray, 1980). Efetuado o cálculo, pode-se através do pós-processador analisar os resultados de esforços, deformações e deslocamentos para os passos de solução válidos, além de introduzir reforços e reiniciar o cálculo para novas configurações das estratégias de cálculo e análise não-linear.

A validação do programa desenvolvido foi feita utilizando-se os estudos experimentais de Pinto (2000) e Cerqueira (2000) e o estudo de Araújo (2002), onde, os procedimentos experimentais foram analisados, de acordo com o apresentado no Capítulo 2, e algumas vigas escolhidas para serem modeladas e analisadas. A validação consistiu na análise comparativa entre valores experimentais e teóricos de colapso, e dos gráficos: “Carga x Flecha”, “Carga x Deformação do Aço” e “Carga x Deformação do Compósito”, correspondente a posições de monitoramento experimental. Para obtenção de resultados foi utilizada como estratégia de solução não-linear o método de Newton-Raphson, em sua versão *standard*, sem necessidade de utilização do método do comprimento de arco para descrever os pontos pós-pico da curva “Carga x Deslocamento”. Este

fato pode ser justificado pelo comportamento dos elementos estruturais reforçados pela adição de compósitos de fibra de carbono, demonstrando aumento da rigidez na região reforçada, retardo da entrada do aço em escoamento em relação à estrutura não reforçada e ruptura frágil do compósito sem comportamento definido além do ponto limite, exceto em casos de colapso por esmagamento do concreto.

Analisando-se o estudo experimental desenvolvido por Pinto (2000) e Cerqueira (2000), e fazendo-se considerações em relação a acomodações do sistema, pôde-se observar a existência de pontos notáveis sobre a curva “Carga x Flecha” – início da fissuração, início de escoamento do aço de flexão, compatibilização entre as deformações no momento de descolamento do compósito - , para os quais foram representados os campos de tensões na viga , a distribuição de tensões no meio do vão e a configuração das deformações atuantes nas armações (Figuras 5.8 a 5.13). Verificou-se que após um ajuste para desconsiderar acomodações do sistema e de um ciclo de carga e descarga, o comportamento entre as curvas referentes à análise numérica e as curvas obtidas pelo monitoramento do ensaio realizado é praticamente o mesmo, tendo tangentes e pontos notáveis praticamente iguais. Este comportamento, junto ao demonstrado pelos gráficos “Carga x Deformação” do aço e do compósito, também coincidentes até o ponto de descolamento do compósito, mostram a correspondência de resultados entre a análise numérica e os resultados experimentais. O estudo experimental desenvolvido por Araújo (2002) também pode ser verificado e compatibilizado pela análise numérica, apesar de algumas diferenças existentes entre os resultados experimentais. Constatam-se os mesmos pontos notáveis descritos no estudo anterior, e foi possível verificar grande aproximação com o estudo da viga V1, e uma completa concordância com os resultados experimentais da viga V4, representados por gráficos “Carga x Flecha”, “Carga x Deformação aço/compósito”, campos de tensões atuantes no concreto, distribuição de tensões nos pontos de esforço máximo, configuração de deformações do aço e do compósito e campos de tensões principais com indicação de fissuras, representados pelas Figuras 5.23 a 5.28.

Assim, baseando-se nos exemplos verificados, pode-se dizer que o programa desenvolvido foi capaz de descrever com grande aproximação o comportamento estrutural de vigas em concreto armado reforçadas, em carga,

através de compósitos de fibra de carbono. Algumas diferenças encontradas podem ser justificadas pela diferença entre o procedimento experimental e numérico, sendo as diferenças e considerações listadas a seguir:

	Teórico	Experimental
Aplicação do reforço	Numérico e por coordenadas	Desmontam-se os deflectômetros, é inserido um pórtico de ancoragem e retoma-se o ensaio c/ carga atuante diferente da prevista.
Aderência	Perfeita	Podendo variar de acordo com zona de má ou boa aderência do concreto e podendo sofrer acomodações durante o ensaio.
Sistema p/ aplicação de forças	Numérico e com direcionamento vetorial	Mecânico, com direcionamento imposto pelo macaco hidráulico e possibilidade de variação durante o ensaio

Mesmo com os resultados obtidos, deve-se salientar que as implementações realizadas representam apenas um primeiro passo na obtenção de um modelo completo e confiável para este sistema estrutural, sendo necessários outros estudos e novas implementações nos programas desenvolvidos.

Quanto a elaboração de projetos de reforço utilizando-se materiais compósitos, é válido salientar a importância da relação  $( E_f \cdot \epsilon_f / A_f ) / ( E_s \cdot \epsilon_s / A_s )$ , que para valores muito baixos pode mascarar a iminência de ruptura do conjunto, inevitável e quase que imediato ao escoamento do aço. Sendo assim, sua parcela de contribuição no binário resistente é proporcional à relação apresentada, e praticamente acompanha a deformação imposta pelo escoamento do aço, apresentando ruptura do compósito e inevitável ruptura do aço. Nestes casos o compósito não descola, pois mesmo com tensões normais altas, a força de arrancamento e as tensões tangenciais são relativamente baixas.

## 6.2. Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema, propõe-se:

- O estudo experimental da aderência de compósitos ao concreto através de vigas, obtendo relações entre armadura longitudinal e quantidade de fibra empregada no reforço;

- Implementar o controle de aderência nas armações, utilizando-se inclusive parâmetros para determinação de descolamento ou não do compósito utilizado na análise numérica;
- O estudo numérico e experimental de vigas em concreto armado com furos executados após a sua moldagem, reforçados através da adição de compósitos de fibra de carbono;
- O estudo numérico e experimental de consolos e ligações viga coluna reforçados através da adição de compósitos de fibra de carbono;
- Continuar as implementações no programa de pré-processamento, adicionando-se um módulo para criação de malha com qualquer forma, introdução de furos, determinação de diferentes propriedades para partes do concreto que compõe a viga, entre outros.
- Continuar as implementações no programa de pós-processamento, adicionando-se um módulo para interpolação através de isovalores para tensões e deformações nos elementos finitos Q4 e Q8, modulo para elaboração de gráfico que mostre a distribuição de tensões ao longo de uma seção transversal selecionada, entre outros.