

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações Gerais

O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas tem influenciado intensamente a dinâmica de crescimento das cidades, evidenciando novas técnicas de construção, manutenção e modificação de estruturas em geral.

Dentro deste processo, o desenvolvimento de tecnologias para modificação das propriedades físicas e mecânicas de estruturas em serviço merece atenção especial. Este procedimento, chamado de reforço estrutural, visa aumentar a portabilidade dos elementos estruturais envolvidos, e utiliza do menor número possível de intervenções. O reforço estrutural pode ser necessário em decorrência de inúmeros fatores: erros de projeto ou execução, deterioração resultante do envelhecimento natural, da ação de agentes agressivos ou devido a acidentes como choques e incêndio, mudança no tipo de utilização original, ou através do aumento dos carregamentos incidentes ou por alterações na geometria.

Alguns métodos de reforço estrutural estão listados a seguir:

- Reforço de concreto armado utilizando-se barras e/ou chapas de aço com aderência externa;
- Reforço de concreto armado utilizando-se compósitos de fibra de carbono;
- Reforço de concreto armado utilizando-se compósitos de fibra de vidro.

O reforço utilizando-se barras de aço com aderência externa e/ou chapas de aço coladas com resina epóxi vem sendo muito utilizado e há um razoável conhecimento de seu comportamento e métodos de dimensionamento.

A utilização de compósitos de polímeros armados com fibras (CFRP e GFRP) como elemento de reforço é interessante devido às propriedades destes materiais como leveza, alta resistência mecânica, resistência à corrosão, neutralidade eletromagnética e facilidade de aplicação e manutenção das dimensões originais da peça. Dentre os compósitos existentes, o de fibra de carbono obteve melhor aceitação devido a seu alto módulo de elasticidade e baixo fator de relaxação. A escolha do uso de compósitos de polímeros armados com

fibras no lugar de chapas de aço, ou outro sistema de reforço tradicional, depende da sua viabilidade econômica.

Paralelamente ao avanço nas pesquisas experimentais e teóricas dos sistemas apresentados, surgiu a necessidade do desenvolvimento de modelos matemáticos confiáveis, que retratem fielmente as características físicas e mecânicas atuantes antes e após a aplicação do reforço estrutural. A criação deste modelo se origina nas teorias do concreto simples trabalhando em conjunto com barras de aço, modelo próprio para concreto armado. O carregamento é imposto e surgem as deformações relativas a cargas de trabalho usuais em sistemas estruturais. Após a introdução de novas barras e/ou compósitos com propriedades físicas e mecânicas diferentes das do aço existente, as propriedades do elemento estrutural são alteradas e prossegue-se com a análise.

A motivação deste trabalho deve-se à necessidade de programas computacionais específicos a este tipo de análise, que permitam durante o processo introduzir reforços. Outra motivação é a de gerar um software com recursos gráficos sofisticados e de simples utilização, evitando-se gastos desnecessários em softwares genéricos e de modelagem complexa.

## **1.2. Objetivos**

Os objetivos principais do presente trabalho são:

- Apresentar modelos que simulem o comportamento físico do concreto armado e compatibilizá-los ao processo de reforço estrutural pela adição de barras externas e/ou fitas de materiais compósitos;
- Implementar o modelo proposto em um programa de análise por elementos finitos (módulo central de cálculo);
- Criar interface gráfica, em ambiente Windows, para:
  - o Criação dos modelos em concreto armado, conversão numérica para análise por elementos finitos e transferência de execução para o módulo central de cálculo ;
  - o Leitura de dados e resultados do cálculo executado, demonstração gráfica dos resultados através de isovalores, possibilidade de introdução de reforço estrutural no cálculo

corrente, conversão numérica para análise por elementos finitos e transferência de execução para o módulo central de cálculo;

- o Início de novos cálculos e recuperação de cálculos executados anteriormente;
- Aplicar o modelo através do programa de análise à simulação do comportamento de estruturas em concreto armado reforçado com a adição de compósitos em fibra de carbono;
- Validar o programa computacional através de comparação entre resultados numéricos e experimentais.

O modelo para concreto simples a ser apresentado baseia-se na formulação hipoeelástica ortotrópica proposta por Elwi & Murray (1979). O modelo é definido através de uma relação tensão-deformação incremental axissimétrica, incorporando o conceito de deformação axial equivalente de Darwin & Pecknold (1974) e o critério de Willam & Warnke (1975). O aço do concreto armado e os reforços são introduzidos obedecendo à formulação elástica não-linear, de acordo com as características originais dos materiais utilizados. Tais considerações obrigam que o cálculo seja sempre efetuado por aproximações sucessivas, e a utilização do método dos elementos finitos exige estratégias de solução adequadas, tendo em vista as mudanças nas propriedades do material refletidas na matriz constitutiva [C], ao longo de sua história de carregamento.

Como base para o módulo central de cálculo, escolheu-se o programa FEPARCS – *Finite Element Program for Analysis of Reinforced Concrete Structures* (Elwi & Murray, 1980), desenvolvido na Universidade de Alberta, Canadá, próprio a análise linear e não-linear de estruturas em concreto armado e modificado de acordo com as necessidades deste trabalho. O programa original foi escrito em Fortran 77, e compreende uma série de modelos constitutivos para concreto, inclusive o modelo de Elwi & Murray (1979). Sua capacidade de processamento e adaptação à implementação de novos procedimentos e modelos já foi comprovada anteriormente em Nascimento (1996) e Simões (1998).

Para o desenvolvimento do pré e do pós-processador gráfico foi escolhida a ferramenta de desenvolvimento Visual Basic 6.0, onde, através da programação em *Basic*, pôde-se manipular objetos gráficos e aplicar todo desenvolvimento gráfico cabível a este trabalho.

Visando-se avaliar e validar o desempenho dos programas desenvolvidos em todos os aspectos, processa-se a análise de vigas em concreto armado reforçadas através da colagem de compósitos de fibra de carbono (CFRP), retiradas dos estudos experimentais de Pinto (2002) e Araújo (2002), este último desenvolvido no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. Os resultados numéricos e experimentais são comparados em termos de curva “carga x flecha”, desenvolvimento e distribuição de fissuras, progressão das deformações e do escoamento das armaduras e modo de ruptura.

### **1.3. Organização Deste Trabalho**

O presente trabalho encontra-se organizado em seis capítulos. Dando seqüência à introdução, no Capítulo 2 são apresentadas técnicas de reforço estrutural em elementos de concreto armado, que podem ter seu desempenho e comportamento avaliados através dos programas computacionais desenvolvidos neste trabalho. Apresentam-se técnicas de reforço através da colagem de chapas de aço, colagem de materiais compósitos, tais como fibra de carbono e fibra de vidro, adição de estribos pré-tracionados e colagem de vergalhões. Na seqüência, são apresentados estudos experimentais do reforço de vigas em concreto armado através da colagem externa de compósitos em fibra de carbono, sendo estes dados utilizados na validação dos programas desenvolvidos.

No Capítulo 3 discute-se o método dos elementos finitos aplicado a problemas de natureza não-linear e toda implementação feita no programa FEPARCS(Elwi e Murray, 1980). São descritos o modelo constitutivo para o concreto armado com adição de reforços em qualquer etapa de análise do modelo, a formulação do modelo hipoeelástico de Elwi & Murray (1979) para o concreto simples, o critério de ruptura de Willam & Warnke (1974) com cinco parâmetros, e o modelo elasto-plástico de Elwi & Hrudley (1989), que foi modificado para poder ser utilizado na simulação do reforço inicial, versão original, e no reforço durante o cálculo. São apresentadas as estratégias empregadas na solução das equações não-lineares de equilíbrio, o Método de Newton-Raphson e o Método do Comprimento de Arco e os critérios de convergência associados a elas são apresentados.

---

No Capítulo 4 são discutidos os conceitos de programação e computação gráfica utilizados no desenvolvimento dos programas de pré e pós-processamento gráfico desenvolvidos. Por fim, o programa PREPOS é apresentado mostrando-se o seu funcionamento e todos os procedimentos de geração, cálculo, reforço e análise do modelo a ser estudado.

No Capítulo 5 algumas vigas estudadas em trabalhos experimentais são modeladas e analisadas pelo programa desenvolvido. A validação do referido programa é feita pela comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.