

# 1 Introdução

O dimensionamento de estruturas de concreto armado é feito no Brasil segundo a norma NBR 6118-2003. A norma brasileira, como a maioria das normas do mundo, segue a metodologia de dimensionamento semi-probabilístico. Nesse método, as expressões dos estados limites são escritas com as variáveis aleatórias representadas por valores chamados de valores de cálculo ou de projeto que são valores com baixa probabilidade de ocorrência, no sentido de diminuir a probabilidade de falha associada ao estado limite. Todavia, esse método não permite a quantificação dessa probabilidade de falha e, portanto, não é uma medida de segurança uniforme, ou seja, ele pode conduzir a um dimensionamento contra a segurança ou antieconômico no sentido de levar a um projeto com probabilidade de falha, respectivamente, acima ou abaixo da probabilidade de falha desejada. A análise de confiabilidade de estruturas é uma ferramenta que possibilita o cálculo da probabilidade de falha associada a um estado limite e também um dimensionamento para uma probabilidade de falha alvo, entre outras vantagens.

Neste trabalho, duas seções de uma viga de um pavimento de uma residência são inicialmente dimensionadas ao esforço cortante ou à flexão pelo método semi-probabilístico segundo a norma brasileira. Em seguida, a probabilidade de falha dessa seção é calculada via análise de confiabilidade. Por fim, as armaduras são dimensionadas de modo que a maior probabilidade de falha, entre as diversas probabilidades de falha da seção associadas às diversas funções de falha possíveis, seja igual a uma probabilidade de falha alvo recomendada pelo Joint Committee on Structural Safety (JCSS), ou seja, é feito um dimensionamento da seção baseado em confiabilidade.

Em uma segunda etapa é utilizada a hipótese de que a residência foi transformada em escritório e as cargas foram modificadas. Uma verificação da segurança da seção pré-existente mostra a necessidade de reforço da estrutura. A seção então é reforçada com CFC. Em seguida, uma análise de confiabilidade da

seção da viga reforçada é executada. Finalmente, como a probabilidade de falha calculada é diferente da probabilidade de falha alvo, um dimensionamento do reforço baseado em confiabilidade é realizado com metodologia similar à usada para a viga sem reforço.

As variáveis aleatórias consideradas nas análises de confiabilidade são a resistência do concreto, do aço e da fibra e as cargas permanentes e acidentais. As propriedades estatísticas das cargas são definidas conforme as recomendações do JCSS assim como as resistências do concreto e do aço. As propriedades estatísticas da resistência das fibras de carbono foram obtidas com base nos resultados dos ensaios realizados no LEM-DEC da PUC-Rio. A escolha da função de probabilidade mais apropriada para representar a amostra foi feita com base em técnicas estatísticas de aderência usando os métodos de Chi-quadrado e Kolmogorov-Smirnov. As funções testadas foram as funções de distribuição Normal, Lognormal e Weibull.

O método de análise de confiabilidade empregado foi o método analítico de primeira ordem FORM (First Order Reliability Method) após ser comparado com os resultados obtidos pelo método de Monte Carlo, dado que apresenta resultados razoáveis em um tempo de execução muito menor.

Um programa em Matlab foi desenvolvido para realizar todas as tarefas descritas. Tais programas tornam viável o uso dessas técnicas no dia a dia do projeto de estruturas.

## **1.1. Considerações Gerais**

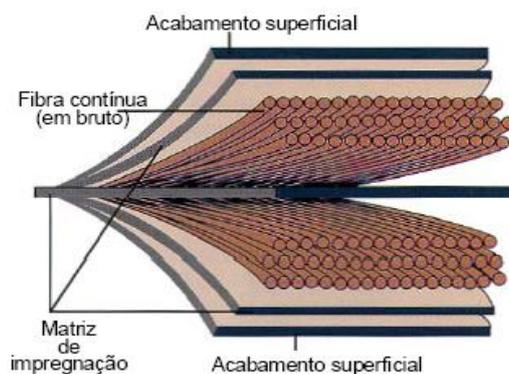
As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez, baseadas na força das ligações carbono-carbono, no grafite, e na leveza do átomo de carbono.

O seu alto módulo de elasticidade  $e$ , de certo modo, sua alta resistência dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre os eixos das fibras.

Os compósitos reforçados com fibras de carbono são os mais apropriados para o reforço de estruturas de concreto. As principais vantagens em recorrer às fibras de carbono traduzem-se nos valores elevados das razões rigidez/peso

específico e resistência/peso específico, nos valores baixos do coeficiente de dilatação térmica longitudinal ou transversal, na reduzida sensibilidade à fadiga e nas excelentes resistências química e à umidade permitindo uma significativa redução nas dimensões do elemento de reforço. Contudo, as mesmas fibras têm como principal inconveniente, o valor baixo de resistência às ações de impacto e, eventualmente, conforme a circunstância da aplicação pode tratar-se de um material bom condutor térmico e elétrico (Costa, 2004).

No compósito de fibras de carbono, basicamente se combina um tecido de fios de carbono (reforço), que fornece flexibilidade e resistência, com uma resina termoestável (matriz), comumente do tipo epóxi, que se solidifica por um agente endurecedor e age ligando as fibras, protegendo-as e transferindo a carga por todo o material; o agente de cura ajuda a converter a resina num plástico duro (Figura 1.1).



**Figura 1.1 – Compósitos com fibras de carbono (CFC); retirada de Juvandes (2002).**

Algumas propriedades dos compósitos de fibras de carbono estão apresentadas na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1 – Propriedades das fibras de carbono (Bulletin 14 da FIB, 2001).**

<b>Fibra de Carbono</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Deformação específica última à tração (%)</b>
Alta resistência	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Ultra resistência	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Alto módulo	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Ultra alto módulo	500-700	2100-2400	0,2-0,4

O reforço externo com Compósitos com Fibras de Carbono (CFC) é adequado para várias aplicações estruturais entre as quais estão:

- Reforçar elementos em boas condições estruturais (sem patologia) para permitir o aumento das cargas solicitantes devido às mudanças de uso.
- Corrigir e minimizar eventuais riscos decorrentes de erros de projeto ou de construção.
- Recuperar a resistência de elementos estruturais com patologias.
- Reforçar em torno de novas aberturas em placas.
- Confinamento passivo para aumentar a resistência sísmica, etc.

O reforço externo com CFC não deve ser usado nas seguintes condições:

- Em zona deteriorada do concreto.
- Quando há uma corrosão substancial no aço de reforço interno.
- Quando o aço existente não é suficiente para proporcionar um comportamento dúctil ao elemento de concreto armado.

## 1.2.

### Revisão Bibliográfica

Resumos de trabalhos recentes sobre reforço de vigas com compósitos de fibras de carbono e também sobre análise de confiabilidade de vigas de concreto armado são apresentados a seguir.

#### 1.2.1. Estudos sobre Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC Solicitadas à Força Cortante

##### **Khalifa e Nanni (2002)**

Esse estudo avaliou o desempenho e modos de ruptura de vigas simplesmente apoiadas reforçadas externamente à força cortante com tecido de fibras de carbono. As variáveis investigadas no estudo incluem armadura transversal, relação comprimento-altura útil ( $a/d$ ) e distribuição do CFC.

O estudo mostrou que a contribuição do reforço externo colado para aumentar a resistência à força cortante é significativa. Foi alcançado um aumento de resistência de 40% a 138% nas vigas reforçadas.

**Taljisten (2003)**

Esse trabalho foi dividido em três etapas: a primeira apresenta um modelo para calcular o valor da resistência à força cortante em vigas reforçadas com compósitos; na segunda, foram testadas vigas reforçadas à força cortante com compósitos de fibras de carbono; na última é apresentado um exemplo de aplicação do reforço com fibras de carbono em uma estrutura de um estacionamento.

No programa experimental foram testadas vigas de concreto com 4,5 m de comprimento e 50 cm de altura, reforçadas à força cortante com folhas de compósito com fibras de carbono. Os dois diferentes parâmetros variados no teste foram o ângulo de reforço e o peso do tecido que é diretamente proporcional à espessura do compósito.

Não foram utilizados estribos na região de força cortante para que fosse possível isolar a contribuição do concreto e do reforço externo. O compósito com fibras de carbono foi colado em forma de “U” ao longo de todo o comprimento da viga com fibras de carbono unidirecionais.

Dois modos de ruptura foram observados, ruptura por compressão no concreto e ruptura do compósito.

**Diagana (2003)**

Esse estudo avaliou o comportamento de vigas de concreto com seção retangular reforçadas à força cortante com tecido de fibras de carbono. Foram utilizadas quatro configurações de reforço colado em faixas. O objetivo foi investigar a influência de parâmetros como comprimento de reforço e tipo de envolvimento da seção transversal com o tecido compósito.

As vigas com reforço em forma de “U” romperam por descolamento de duas ou três faixas do material compósito ao longo da fissura diagonal, o que não permitiu que o compósito fosse solicitado até a tensão última de tração. Nas vigas reforçadas por envolvimento completo da seção houve ruptura por tração das faixas de tecido situadas na fissura diagonal na região de compressão.

A forma mais eficiente de reforço foi o envolvimento completo da seção com tecido de fibras orientadas a 90°. Em comparação com o reforço em “U” o envolvimento completo da seção foi mais eficaz para fibras orientadas a 90°. Já para o reforço com fibras orientadas a 45° a forma de “U” levou a um acréscimo

de resistência maior do que o envolvimento total da seção. Os resultados experimentais mostraram que a contribuição do reforço do tecido compósito varia com o espaçamento das faixas: a resistência aumenta conforme diminui o espaçamento.

### **Beber (2003)**

O autor ensaiou 44 vigas em escala real, com seção transversal de 15 cm de largura por 30 cm de altura e comprimento de 300 cm, reforçadas externamente com compósitos de fibra de carbono. As vigas foram divididas em dois grupos: o primeiro, denominado grupo F, composto de 14 vigas reforçadas à flexão; o segundo, grupo C, com um total de 30 vigas reforçadas à força cortante.

Nas vigas do grupo C foram usados dois sistemas de reforço distintos, sistema laminado pré-fabricado e manta flexível Replark 20. Foram variados os seguintes parâmetros: espaçamento entre faixas, largura das faixas, ângulo das fibras e tipo de envolvimento da seção, totalizando 12 configurações diferentes de reforço à força cortante.

Os incrementos de resistência obtidos com a aplicação do reforço com compósito CFC foram de até 255,6% sendo que os resultados mais expressivos na elevação da resistência foram alcançados para as vigas que receberam reforço contínuo orientado a 90° com envolvimento completo da seção.

Foram observados dois modos de ruptura nas vigas ensaiadas: o descolamento do reforço, como modo de ruptura mais frequente, que está associado ao mecanismo de transferência de esforços entre concreto e reforço e a ruptura do reforço à tração, para as vigas com ancoragem suficiente. Houve situações intermediárias, com a combinação desses dois modos de ruptura.

As vigas reforçadas à força cortante com envolvimento completo da seção tiveram uma modificação fundamental em seu comportamento, apresentando uma ruptura clássica de flexão, com esmagamento do concreto e flambagem da armadura de compressão.

Verificou-se que o fator mais importante para o aumento de resistência depende da solução de ancoragem empregada.

A solução de ancoragem em “L” mostrou ser mais eficiente na elevação da resistência das vigas. Porém, segundo o autor a execução deste reforço com

mantas orientadas a  $45^\circ$  é bastante complexa podendo, inclusive, inviabilizar a adoção desta alternativa.

A utilização do reforço contínuo, embora apresente maior quantidade de reforço não proporcionou incremento de resistência na mesma proporção.

#### **Pereira (2005)**

Esse estudo consistiu na comparação entre modelos para o cálculo da parcela da força cortante resistida pelo reforço externo e na implementação computacional de um procedimento numérico para o dimensionamento da área de reforço à força cortante utilizando a NBR 6118-2003, o modelo da treliça generalizada e a teoria do campo de compressão. O modelo para o cálculo da parcela da força cortante resistida pelo reforço externo, mostrado em Chen e Teng (2003), foi utilizado na implementação computacional por ser o modelo que apresentou melhor desempenho na comparação. As comparações entre os resultados teóricos do dimensionamento e os resultados experimentais encontrados na literatura indicaram a necessidade de se avançar nos estudos para a elaboração de um modelo apropriado para o dimensionamento da área de reforço à força cortante com compósitos de fibras de carbono.

#### **Scheremeta (2007)**

Nesse trabalho estudou-se o reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado utilizando-se CFC, com o objetivo de verificar qual sistema de reforço ao cisalhamento tem um maior aumento da resistência. Foram testadas seis vigas com as seguintes configurações: uma viga de referência (sem reforço); duas vigas com reforço de tecido de fibras de carbono em toda a altura das faces e com largura de 5 cm; duas vigas com reforço de tecido de fibras de carbono com largura de 5 cm em forma de “U”; uma viga com reforço de tecido de fibras de carbono com largura de 5 cm em forma de “U”, sendo coladas tiras horizontais na parte superior para ancoragem das fibras. Os ensaios foram realizados no laboratório da Universidade Federal de Minas Gerais com o objetivo de determinar os valores de resistência em cada caso, verificando-se o aparecimento de fissuras e a ruptura do concreto em cada ciclo de carregamento. Obteve-se como resultado que as vigas reforçadas tiveram 8% de aumento médio na resistência ao cisalhamento, sendo que o maior aumento na resistência se deu para

a viga com reforço em “U” com ancoragem na parte superior, alcançando 15,10% acima da viga de referência.

### **Spagnolo (2008)**

Nesse trabalho foi realizado o estudo experimental de oito vigas de concreto armado precarregadas de seção T (largura da mesa=40 cm, largura da alma=15 cm e altura= 40 cm), com 300 cm de comprimento, biapoiadas e reforçadas à força cortante com CFC. Foram analisadas duas séries de quatro vigas, com uma viga de referência sem armadura para cada série. A taxa de armadura transversal interna foi maior para a série I do que para a série II. Variou-se o número de camadas do reforço em CFC utilizando estribos em U. Os resultados dos ensaios mostraram que as vigas reforçadas apresentaram um aumento mínimo de resistência à força cortante de 36% em relação às respectivas vigas de referência, e que a ruptura de todas as vigas ocorreu por tração diagonal, com o descolamento do CFC na região de sua ancoragem. O modelo cinemático e o do ACI-440 (2001) apresentaram resultados mais próximos aos dos ensaios realizados para a resistência total da força cortante. O resultado experimental da parcela da força cortante resistida pelo CFC apresentou valores superiores aos calculados por diversos modelos teóricos. Os resultados mais consistentes foram obtidos com os modelos do Bulletin 14 da FIB (2001) e Khalifa e Nanni (2002).

### **1.2.2. Estudos sobre Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC Solicitadas à Flexão**

#### **Martins (2000)**

Esse trabalho visou o estudo experimental do comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas à flexão, ou à flexão e à força cortante simultaneamente, com lâminas de fibras de carbono coladas com resina epoxidica.

As vigas foram precarregadas e reforçadas sob carregamento constante. O comportamento estrutural foi avaliado em termos de flecha, deformações do concreto e das armaduras internas e de reforço, e carga de ruptura.

Os resultados mostraram que a técnica de reforço estudada pode ser usada de maneira eficiente, aumentando a resistência e a rigidez das vigas, e que a teoria de flexão simples pode ser utilizada para avaliar a resistência à flexão de vigas

reforçadas, desde que a deformação do reforço seja limitada ao valor compatível com o sistema de reforço usado.

### **Araujo (2002)**

Esse trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento e o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas à flexão utilizando-se compósitos de fibras de carbono. O programa experimental constituído pelo ensaio de sete vigas biapoiadas com um vão em balanço, todas com a mesma seção transversal, armaduras de aço e vãos idênticos, sendo o valor do momento positivo máximo igual ao do momento negativo máximo. Foi ensaiada uma viga de referência sem reforço. As outras seis vigas foram pré-carregadas e reforçadas sob carregamento constante, sendo que três delas foram igualmente reforçadas nas duas regiões de momentos máximos, e as outras três tiveram sua armadura de reforço, em relação às três primeiras, duplicada na região de momento máximo negativo, sendo mantida a área do reforço na região de momento positivo.

O comportamento estrutural dessas vigas foi avaliado em termos de flechas, deformação da armadura, fissuração, modo e carga de ruptura. Por meio da análise realizada verificou-se o aumento de resistência e de rigidez das vigas reforçadas, constatando-se que o reforço em vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono é uma técnica eficiente e de fácil execução.

### **Costa (2004)**

Nesse trabalho foi apresentado um modelo para dimensionamento de reforço externo com compósitos de fibras de carbono em vigas de concreto armado solicitadas à flexão simples. Um algoritmo desenvolvido para este modelo foi implementado e compilado no programa MAPLE. Os resultados numéricos obtidos pelo programa foram comparados com resultados experimentais e teóricos da literatura. Os resultados dos trabalhos experimentais confirmam a eficiência do reforço com CFC em vigas de concreto armado, mostrando ser essa uma alternativa muito interessante para o reforço estrutural desses elementos.

**Gomes (2004)**

Esse trabalho experimental teve como objetivo estudar a ductilidade de vigas retangulares de concreto armado reforçadas à flexão utilizando-se compósitos com tecido de fibras de carbono.

No estudo realizado foi proposta uma nova sistemática para obtenção do índice de ductilidade, baseada nas considerações da energia elástica e da energia inelástica.

O programa experimental consistiu no ensaio de sete vigas bi-apoiadas, sendo uma viga de referência e as demais reforçadas à flexão com tecido de fibras de carbono. Todas as vigas tinham as mesmas características mecânicas e geométricas e foram dimensionadas de modo a garantir a ruptura por flexão.

As vigas reforçadas foram divididas em dois grupos. O grupo A era constituído de duas vigas, reforçadas inicialmente com uma e duas camadas de tecido de fibras de carbono. O grupo B era constituído por quatro vigas que foram reforçadas após um carregamento inicial. Os resultados obtidos em termos de carga, flecha, momento, curvatura, ductilidade energética e rotação plástica foram analisados. Os estudos realizados mostraram que o reforço com compósitos de fibras de carbono é uma técnica eficaz, que as vigas apresentam ductilidade e que os índices energéticos propostos são adequados para esse tipo de estudo.

**Viana (2004)**

Nesse trabalho desenvolveu-se um programa para dimensionamento de reforços à flexão e ao cisalhamento em vigas de concreto armado.

O programa abrange as técnicas de chapa contínua colada, chapas em tiras coladas, tecido ou lâmina de fibra de carbono coladas, barras coladas, estribos externos pré-tracionados, encamisamento e armadura longitudinal pré-tracionada.

A comprovação da eficácia dos métodos de dimensionamento usados no programa desenvolvido foi realizada utilizando-se resultados de vigas ensaiadas em estudos anteriores. Os valores dos reforços necessários obtidos pelo programa e pelos ensaios puderam ser comparados, observando-se, ao final, a existência de divergências muito pequenas. Para alguns casos foram propostas outras alternativas de reforços consideradas mais eficientes.

### 1.2.3. Estudos de Análise de Confiabilidade em Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC

#### **Machado *et al* (2000)**

Esse estudo analisou a confiabilidade de vigas de concreto armado submetidas à flexão e à força cortante, projetadas segundo as prescrições da NBR 6118 (1980) e da NBR 8681. O método AFORM (Advanced First-Order Reliability Method) foi utilizado. Foram consideradas como variáveis aleatórias as resistências dos materiais, os carregamentos e os parâmetros geométricos da seção transversal da viga. Incluiu-se uma variável aleatória para representar o erro contido no modelo utilizado para a flexão.

Foram obtidos valores de índice de confiabilidade para 24 vigas analisadas à flexão e 48 vigas analisadas à força cortante. Para análise à flexão obteve-se o menor índice de confiabilidade quando a resistência do concreto era maior, a razão entre carga acidental e permanente era maior e a taxa de armadura longitudinal era menor. O maior índice de confiabilidade foi obtido para a situação contrária. Para análise à força cortante o menor índice de confiabilidade foi obtido quando a resistência do concreto era maior, a razão entre carga acidental e permanente era maior, a taxa de armadura longitudinal era maior e a taxa de armadura transversal era menor. O maior índice de confiabilidade foi obtido para a situação contrária.

#### **Torno (2007)**

Nesse trabalho a análise de confiabilidade foi aplicada ao projeto de reforço à força cortante com compósitos de fibras de carbono de vigas em concreto armado. Inicialmente, modelos e prescrições normativas para verificar a capacidade resistente do reforço à força cortante foram implementados em *MathCad*. Os resultados teóricos foram comparados com os obtidos de programas experimentais realizados por diversos pesquisadores. Concluindo-se de um modo geral que o modelo proposto por Chen e Teng (2003 a, b) é o que apresenta coeficiente de variação menor e valores sempre menores do que os obtidos nos programas experimentais, exceto para algumas vigas com armadura interna.

Posteriormente, um programa de confiabilidade de estruturas foi implementado em *linguagem C* onde é utilizado o método FORM “First Order

Reliability Method”. Esse programa permite: avaliar a confiabilidade à força cortante de seções de vigas de concreto armado reforçadas ou não, e dimensionar a taxa geométrica de reforço para um valor estabelecido de índice de confiabilidade de referência de acordo com as recomendações do Eurocode EN1990 (2001).

A partir do programa implementado e os exemplos avaliados se concluiu principalmente que 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; 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.

#### **Paliga (2008)**

Nesse trabalho foi estudada a confiabilidade de vigas de concreto armado que tiveram uma perda de 10%, 20% e 30% na armadura tracionada de flexão e foram recuperadas pela colagem, em suas faces tracionadas, com polímeros reforçados com fibras de carbono, projetadas segundo as recomendações do Bulletin 14 da FIB (2001) “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*”. Para avaliar a confiabilidade dessas vigas foi empregado o método de simulação de Monte Carlo juntamente com um modelo não-linear de elementos finitos. Os resultados mostraram que a confiabilidade das vigas recuperadas ficou igual ou superior à confiabilidade das vigas originais.

As vigas foram dimensionadas com as recomendações de projeto do Bulletin 14 da FIB (2001). Para a avaliação da confiabilidade considerou-se que ocorreram perdas de área da seção transversal da armadura tracionada da ordem de 10%, 20% e 30%. Então, seguindo as recomendações do Bulletin 14 da FIB (2001), foram projetados reforços à flexão em lâminas de CFC colados na face tracionada das vigas, recuperando a capacidade de carga original das vigas.

#### **Campos (2009)**

Nesse estudo foi utilizada a Simulação de Monte Carlo para a análise de confiabilidade de 81 vigas de concreto armado reforçadas com compósitos para o estado limite último de flexão. As vigas analisadas foram projetadas segundo as

recomendações do ACI 440 (2006). Foram tomadas como variáveis aleatórias: as dimensões da seção transversal, a resistência à compressão do concreto, a resistência à tração do Polímero Reforçado com Fibras (PRF), o módulo de elasticidade do PRF, a carga permanente e a acidental.

Foram analisadas vigas reforçadas com fibras de vidro para diferentes resistências à compressão do concreto e resistência à tração do compósito, utilizando diferentes carregamentos. A função de falha neste estudo está dada pela comparação do momento atuante e o momento resistente.

O estudo das vigas sujeitas à flexão mostrou que a resistência à compressão do concreto é o fator de maior influência no momento resistente. A simulação do momento resistente permitiu a obtenção da probabilidade de falha associada aos modos de falha “ruptura do PRF” e “esmagamento do concreto”. Os resultados obtidos permitiram observar, em linhas gerais, que as menores probabilidades de falha correspondem à combinação menor resistência à compressão do concreto, maior resistência à tração do PRF, maior razão de carregamento e vigas subarmadas.

### **1.3. Objetivos**

Este trabalho envolve duas linhas de pesquisa do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, o reforço de estruturas com compósitos de fibras de carbono e a análise de confiabilidade.

O principal objetivo deste trabalho é propor uma metodologia que possibilite o dimensionamento de vigas de concreto armado, submetidas à força cortante e à flexão com e sem reforço com compósitos com fibras de carbono, para uma determinada probabilidade de falha.

Na análise de confiabilidade, a resistência à tração dos compósitos de fibras de carbono foi utilizada como variável aleatória. Para determinar a distribuição de probabilidade desta variável, quarenta corpos de prova de compósitos de fibras de carbono foram testados à tração no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio (LEM-DEC). Os testes foram

realizados de acordo com as recomendações da norma ASTM D3039/3039M-07 *Standard Test Method for Tensile Properties of Matrix Composite Material* (2007). O Módulo de Elasticidade dos compósitos também foi determinado nestes ensaios.

Nos exemplos, inicialmente, duas seções de uma viga de concreto armado, sem e com reforço de compósitos de fibras de carbono foram dimensionadas de acordo com o método semi-probabilístico proposto na Norma Brasileira NBR 6118-2003. Posteriormente, as mesmas seções foram dimensionadas utilizando a metodologia apresentada neste trabalho. No dimensionamento foi utilizado o método FORM. A necessidade de reforço da viga surgiu porque houve um aumento no valor das cargas atuantes provocado pela mudança de uso da edificação. Os resultados obtidos pelo método semi-determinístico e utilizando a análise de confiabilidade foram analisados e comparados.

#### **1.4. Organização do Trabalho**

O trabalho está dividido da seguinte forma:

O primeiro capítulo consiste numa introdução e uma breve revisão bibliográfica de vigas de concreto armado submetidas à força cortante e à flexão e análise de confiabilidade.

No capítulo dois são apresentados os conceitos fundamentais para o cálculo de vigas de concreto armado submetidas à força cortante e à flexão com e sem reforço com compósitos de fibras de carbono mediante modelos propostos nas normas e na literatura. Também são descritos os tipos de ruptura das vigas submetidas à força cortante e à flexão.

O capítulo três apresenta os conceitos de confiabilidade utilizados no trabalho como probabilidade de falha e índice de confiabilidade. Os métodos de análise de confiabilidade de Monte Carlo e FORM são discutidos. O programa FERUM, usado no desenvolvimento do trabalho é apresentado.

No capítulo quatro é apresentado um programa experimental constituído por 40 corpos-de-prova de compósitos de fibras de carbono com o fim de se obter as propriedades estatísticas do material necessárias na análise de confiabilidade realizada.

No capítulo cinco são descritas as funções de falha para uma seção de viga biapoiada submetida à força cortante ou flexão com e sem reforço com compósitos de fibras de carbono. São elaborados dois exemplos de duas seções de uma viga submetida à força cortante e à flexão, analisando a confiabilidade da seção de viga sem reforço e com reforço com compósitos de fibras de carbono. Um projeto de reforço com CFC baseado em confiabilidade é elaborado para os exemplos.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.